



Journal Home Page: www.jmatpro.ir

Evaluation of Mechanical Properties and Structure of Multi Layered Al/Ti Composites Produced by Accumulative Roll Bonding (ARB) Process

Arian Eghbali Miandoab*, Mohammad reza Toroghinejad

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 May 2010

Accepted: 19 Jul. 2010

Keywords:

Severe plastic deformation
Accumulative roll bonding
Ti/Al Composite
Mechanical properties

ABSTRACT

Techniques of severe plastic deformation have been of continual interest in the production of novel metallic microstructures. Among these, accumulative roll bonding has been extensively used to produce multi-layered composites. Multi-layered Al/Ti composites were produced by accumulative roll bonding (ARB) process using Al 1100 and commercial Ti sheets. Mechanical properties of these multilayer composites were evaluated at different passes of ARB process. During ARB, it was observed that as the strain increased with the number of passes, the strength and micro-hardness of produced composites increased as well.

* Corresponding author: Arian Eghbali Miandoab, a.eghbalimiandoab@ma.iut.ac.ir



بررسی ساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت لایه‌ای آلومینیم-تیتانیم تولید شده توسط فرایند نورد تجمعی

آرین اقبالی میاندوآب^{*}، محمدرضا طرقي نژاد

دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>فرایند نورد تجمعی که از روش‌های تغییر شکل پلاستیکی شدید است، اخیراً برای تولید کامپوزیت‌های لایه‌ای در حالت جامد گسترش زیادی داشته است. در این تحقیق فرایند نورد تجمعی روی ورق‌های آلومینیم و تیتانیوم تا ۸ سیکل انجام گرفت و کامپوزیت لایه‌ای آلومینیم-تیتانیم تولید شد. برای این منظور از آلومینیم ۱۱۰۰ و تیتانیوم خالص تجاری استفاده شد. بررسی خواص مکانیکی شامل ریزسختی سنجی و تست کشش انجام شد. چسبندگی لایه‌ها به وسیله میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی در پاس‌های مختلف نورد مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش تعداد پاس‌ها سختی و استحکام کامپوزیت تولیدی افزایش یافت.</p>	<p>تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۴/۲۸</p> <p>واژگان کلیدی: تغییر شکل پلاستیکی شدید نورد تجمعی کامپوزیت آلومینیم-تیتانیم خواص مکانیکی</p>

۱- مقدمه

وجود می‌آید و در هر دو فلز زمینه و تقویت کننده دانه‌های ریز ایجاد می‌کند. هنگامی که از فلزات غیرمشابه در فرایند ARB استفاده می‌شود، ساختار میکروسکوپی و ماکروسکوپی ایجاد شده به دلیل تفاوت در سختی فلز زمینه و تقویت کننده کمی پیچیده‌تر از حالتی است که از یک فلز استفاده می‌شود. در حالت کلی، هنگامی که روی یک کامپوزیت چند لایه از فلزات غیرمشابه کرنش اعمال می‌شود، به دلیل تفاوت در خواص سیلان فلزات مورد استفاده، ناپایداری پلاستیک در ساختار به وجود می‌آید و با افزایش میزان کرنش، فاز سخت‌تر در زمینه فاز نرم‌تر شده شکسته و گسسته خواهد شد [۶ و ۷]. در این پژوهش فرآیند نورد تجمعی روی نوارهای آلومینیم و تیتانیم برای تولید کامپوزیت لایه‌ای آلومینیم-تیتانیم به کار گرفته شد و ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

به منظور ساخت کامپوزیت آلومینیم-تیتانیم لایه‌ای، از ورق آلومینیم AA1100 و تیتانیم خالص تجارتي استفاده شد. برای بررسی ترکیب شیمیایی آلومینیم و تیتانیم مورد استفاده، از کوانتومتری استفاده شد که نتایج آن در جداول ۱ و ۲ آمده است.

تغییر شکل پلاستیکی شدید فرایندی است که با اعمال کرنش پلاستیک شدید به ماده، منجر به تولید مواد حجیم با دانه‌های فوق ریز می‌گردد. ویژگی منحصر به فرد تغییر شکل پلاستیکی شدید ثابت ماندن ابعاد نمونه حین فرایند می‌باشد که در نتیجه آن، اعمال کرنش‌های بسیار بالا بر ماده امکان‌پذیر می‌شود. در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری برای توسعه‌ی روش‌های جدید تغییر شکل به منظور دستیابی به تغییر شکل پلاستیکی شدید انجام گرفته است. روش نورد تجمعی (ARB) به عنوان یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) برای تولید مواد بسیار ریزدانه مورد استفاده قرار گرفته است [۱-۴]. در اکثر تحقیقات صورت گرفته از یک فلز یا آلیاژ برای فرایند ARB استفاده شده است و استفاده از دو یا چند فلز یا آلیاژ غیرهمجنس یا اصطلاحاً تولید کامپوزیت‌های لایه‌ای کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هنگامی که فرایند ARB روی یک فلز یا آلیاژ انجام می‌شود، تغییر شکل پلاستیکی شدید موجب شکسته شدن دانه‌ها شده و مرزهای اصلی جای خود را به مرزهای فرعی می‌دهند و در نهایت قطعه بسیار ریز دانه با مرزهای تعادلی بیشتری به وجود می‌آید [۵]. در فرایند ARB فلزات غیرهمجنس، جوش سرد بین فلزات غیرمشابه به وسیله نورد تجمعی به

جدول ۱- ترکیب شیمیایی نوار آلومینیم مورد استفاده در این تحقیق.

Table 1. Chemical composition of aluminum strip used in this study

Others	Mn	Si	Fe	Cu	Al	Element (%)
0.09	0.02	0.17	0.49	0.12	99.11	Percent

جدول ۲- ترکیب شیمیایی نوار تیتانیوم مورد استفاده در این تحقیق

Table 2. Chemical composition of titanium bar used in this study

C	H	N	O	Fe	Ti	Element (%)
0.08	0.15	0.03	0.2	0.25	99.3	Percent

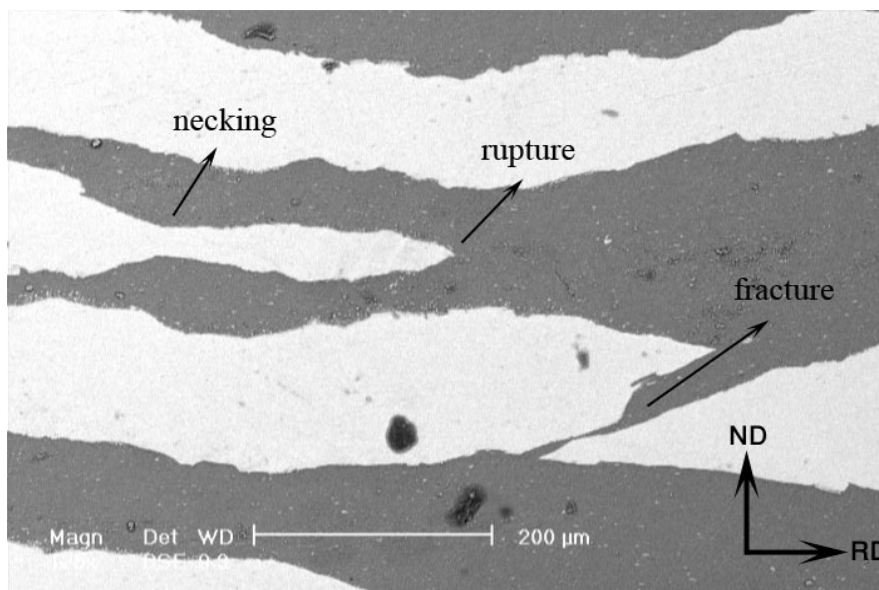
آلومینیومی آماده شده و روی هم قرار گرفتند. مجدداً دو نوار بریده شده روی هم قرار گرفته و ۴ گوشه آن توسط مفتول فولادی محکم شد. نمونه حاصل مجدداً تحت نورد با ۵۰٪ کاهش در ضخامت قرار گرفت. این فرایند تا ۸ سیکل در دمای اتاق، بدون روانکار و بدون آنیل میانی بین سیکل‌ها بر روی نمونه‌ها انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تحولات ریزساختاری

تحولات ریز ساختاری توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که استحکام تیتانیوم زیاد است، در پاس دوم فرایند دچار گسیختگی می‌شود. با افزایش تعداد پاس‌های فرایند فلز تیتانیوم در زمینه آلومینیوم توزیع می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود تیتانیوم در زمینه آلومینیوم دچار شکست و گسیختگی می‌شود. شکل ۲ تصویر میکروسکوپ نوری از پاس‌های فرایند را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است لایه تیتانیوم فقط در پاس اول پیوستگی خود را حفظ کرده است و در پاس دوم دچار شکست و جدایش شده است.

برای ساخت کامپوزیت ابتدا ورق‌های آلومینیوم و تیتانیوم در ابعاد مشخص برشکاری شدند. از دو نوار آلومینیومی با ضخامت ۵۰۰ μm و یک نوار تیتانیومی با ضخامت ۳۰۰ μm با ابعاد یکسان ۱۰×۵ سانتی‌متر برای شروع فرایند استفاده شد. ساندویچ اولیه شامل دو نوار آلومینیوم و یک نوار تیتانیوم در بین آن‌ها بود. در ابتدا برای از بین بردن چربی‌ها و دیگر آلودگی‌های سطحی نوارها به مدت ۱۰ دقیقه در استون غوطه‌ور شدند. سپس برای ایجاد یک پیوند مناسب توسط برس خورشیدی و دریل به صورت افقی برشکاری انجام شد به این ترتیب که دو سطح نوار تیتانیوم و یک سطح از نوارهای آلومینیومی مورد برشکاری قرار گرفتند. قطر سیم‌های برس انتخاب شده ۰/۳ mm و طول سیم‌ها ۲۵ mm از جنس آهن بود. به علت سختی بالاتر تیتانیوم نسبت به آلومینیوم برای برشکاری به نیروی بیشتری نیاز بود. نوارهای برشکاری شده روی هم قرار گرفته و ۴ گوشه آن‌ها توسط مفتول فولادی محکم شد. ضخامت ساندویچ اولیه ۱/۳ mm بود که پس از پاس اول ۰/۶۵ mm شد (۵۰ درصد کاهش ضخامت). دستگاه نورد مورد استفاده دارای غلتک‌هایی به قطر ۱۲۵ mm بوده و سرعت نورد ۲ m/min تنظیم شد. نمونه ۳ لایه حاصل از وسط در راستای طولی نصف شده و دو سطح

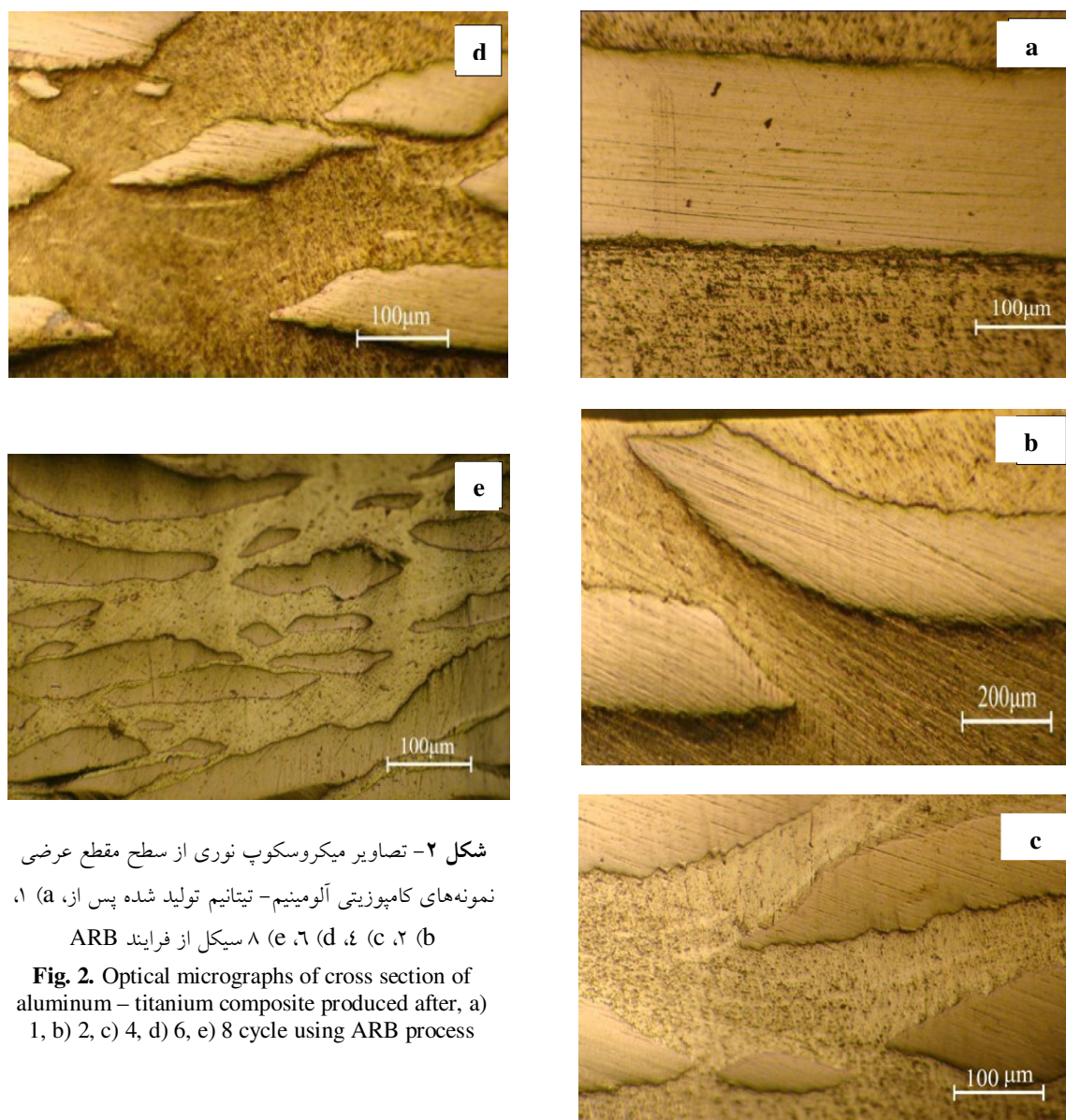


شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح مقطع عرضی کامپوزیت ۶ سیکل ARB شده که نحوه ریز شدن و توزیع تیتانیم را در زمینه آلومینیم نشان می دهد.

Fig. 1. SEM image of composite cross section after 6 cycles ARB showing fine sized and distribution of titanium in aluminum

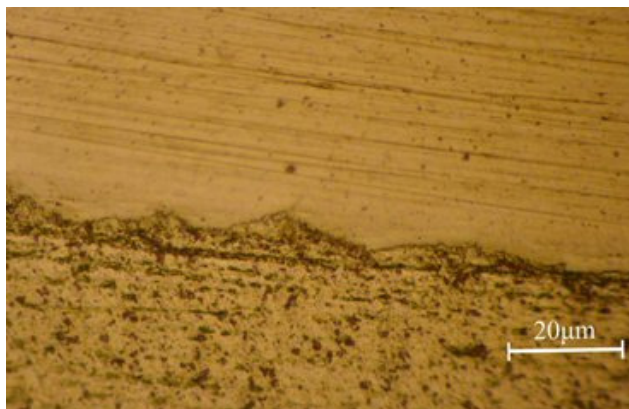
می دهد. در سیکل اول از فرایند، اکستروژن فلز بکر از میان ترکها باعث می شود فصل مشترک حالت دنداندار به خود بگیرد. اما با افزایش تعداد سیکل های فرایند ARB سختی افزایش یافته و قابلیت اکستروژن شدن کاهش می یابد. لذا با توجه به تئوری فیلم در نمونه های با سختی بالاتر به دلیل دشوار بودن اکستروژن ماده زیرلایه از میان ترک های تشکیل شده در فصل مشترک، پیوند ضعیف تری تشکیل می شود.

مکانیزم اصلی تشکیل پیوند بین لایه های فلزی در دمای کم، مکانیزم فیلم می باشد. بر این اساس با شکسته شدن لایه اکسیدی، ماده زیر لایه از میان ترکها اکستروژن شده و پیوند تشکیل می گردد [۹]. شکل ۳ و شکل ۴ تصویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی را برای نمونه یک سیکل ARB شده را نشان می دهد. بررسی تصویر میکروسکوپی از سطح مقطع عرضی نمونه کامپوزیتی آلومینیم-تیتانیم پس از یک سیکل از فرایند مورد تجمعی هم خوانی مناسبی را با تئوری فیلم نشان

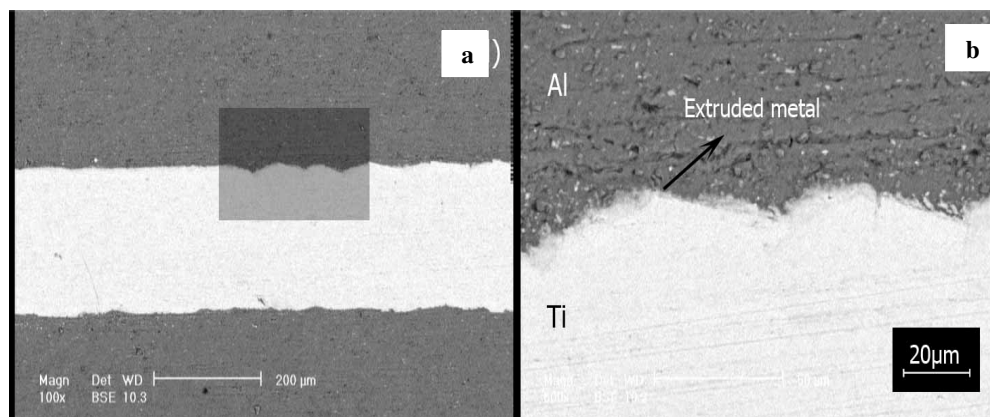


شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع عرضی نمونه‌های کامپوزیتی آلومینیم- تیتانیوم تولید شده پس از، ا) ۱، ب) ۲، ج) ۴، د) ۶، ه) ۸ سیکل از فرایند ARB

Fig. 2. Optical micrographs of cross section of aluminum – titanium composite produced after, a) 1, b) 2, c) 4, d) 6, e) 8 cycle using ARB process



شکل ۳- تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه یک سیکل ARB شده: حالت دنداندار شدن فصل مشترک لایه‌های آلومینیم و تیتانیم
Fig. 3. Optical micrograph of the sample by 1 cycle ARB sample showing serrated interface of aluminum and titanium



شکل ۴- (a) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع عرضی نمونه کامپوزیتی یک سیکل ARB شده و منطقه‌ای در فصل مشترک آلومینیم- تیتانیم، (b): بزرگ‌نمایی منطقه انتخاب شده در (a)

Fig. 4. a) SEM image of cross section 1 cycle ARB sample, (b) enlarged magnification of cross section showed in (a)

پژوهش شکست و جدایش لایه‌های سخت تیتانیم در سیکل دوم رخ داد یعنی پس از اعمال کرنش ۱/۶.

معیار تعیین میزان کرنش مورد نیاز برای وقوع پدیده شکست و جدایش لایه‌های سخت در نورد کامپوزیت‌های لایه‌ای از فلزات غیر مشابه، میزان اختلاف در خواص مکانیکی فلزات موجود در کامپوزیت است. در این

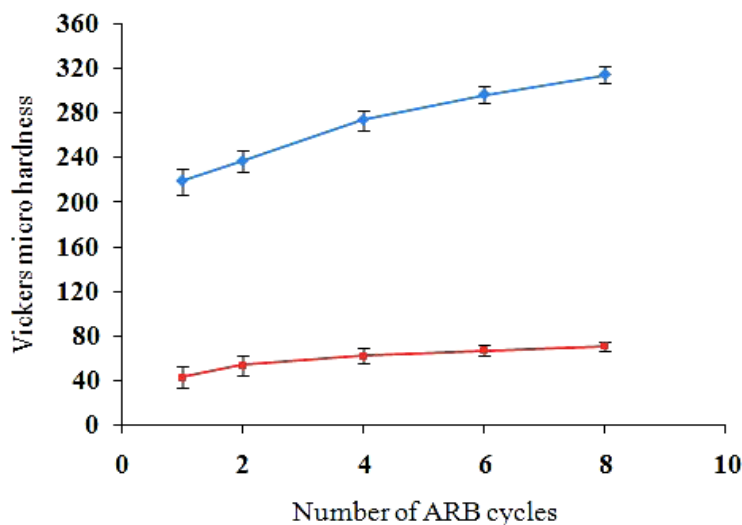
۲-۳- بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های

آلومینیم- تیتانیوم تولید شده با روش ARB

بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های لایه‌ای با توجه به تفاوت رفتار مکانیکی فلزات موجود در کامپوزیت، همواره مورد توجه محققین قرار گرفته است. جهت بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیم و تیتانیوم طی فرایند ARB، همان‌طور که پیشتر اشاره شد آزمون‌های میکروسختی و کشش تک‌محوری روی نمونه‌ها صورت گرفت.

۳-۲-۱- تغییرات سختی

سختی لایه‌های آلومینیمی و تیتانیومی روی نمونه‌ها در سیکل‌های مختلف فرایند به وسیله دستگاه ریزسختی سنج و با انتخاب ۵ نقطه در سطح نمونه اندازه‌گیری شد. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش پاس‌های فرایند سختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد و نرخ افزایش سختی در پاس‌های اولیه بیشتر از پاس‌های بعدی است زیرا عمده تجمع نابجایی‌ها و کارسختی در پاس‌های اولیه رخ می‌دهد. شکل ۵ افزایش میکروسختی با افزایش تعداد پاس‌های فرایند را نشان می‌دهد.



شکل ۵- میکروسختی لایه‌های آلومینیم و تیتانیوم بر حسب تعداد پاس‌های فرایند ARB

Fig. 5. Variation of micro hardness of aluminum and titanium layers in by the number of pass ARB passes

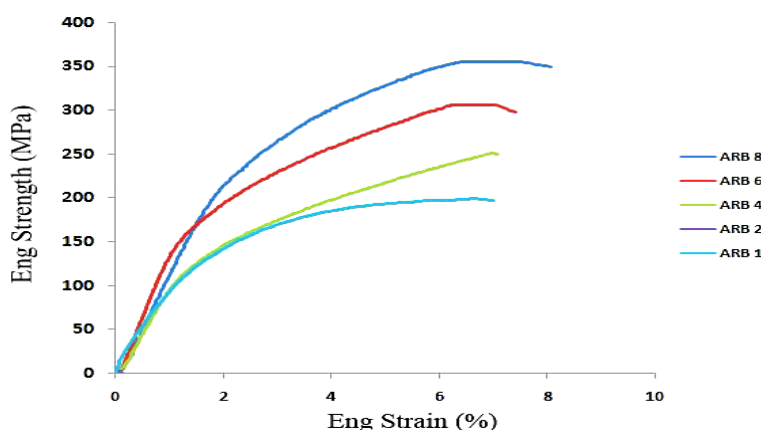
کریستالی آلومینیم FCC است و روش اصلی تغییر شکل در آن به دلیل انرژی نقص چیدن بالا (166 mJm^{-2}) لغزش می‌باشد. شبکه کریستالی تیتانیوم HCP است و روش تغییر شکل در آن دوقلویی است، به همین دلیل میزان کارسختی در تیتانیوم بیشتر از آلومینیم است و

مشاهده می‌شود که پس از نورد اتصالی اولیه آلومینیم-تیتانیوم، افزایش قابل ملاحظه‌ای در سختی آلومینیم و تیتانیوم رخ می‌دهد که این افزایش سختی در تیتانیوم بیشتر از آلومینیم است و سپس با پیشرفت فرایند ARB، نرخ افزایش سختی در هر دو فلز کاهش یافته است. شبکه

۳-۲-۲- تغییرات استحکام و ازدیاد طول

نمونه‌های آزمون کشش طبق استاندارد ASTM-E8 برای بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیم-تیتانیوم ساخته شد. شکل منحنی‌های تنش مهندسی- کرنش مهندسی در سیکل‌های مختلف شبیه به هم است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، تنش سیلان سریعاً به مقدار حداکثر رسیده و سپس شکست در کرنش کمتر از ۸ درصد رخ می‌دهد. استحکام نهایی کشش پس از سیکل اول فرایند ARB، که شامل ۳ لایه است، ۱۸۰ MPa می‌باشد که در نمونه ۸ سیکل از فرایند ARB، به ۳۶۰ MPa رسیده است.

افزایش سختی تیتانیوم بیشتر از آلومینیم می‌باشد [۸]. نکته قابل توجه افزایش قابل ملاحظه سختی در پاس‌های ابتدایی و کاهش نرخ افزایش سختی در ادامه فرایند می‌باشد. در پاس‌های ابتدایی اثر عمده ایجاد شده کارسختی می‌باشد، اما با پیشرفت فرایند و ریز شدن دانه‌ها و تحولات ریزساختاری ایجاد شده عامل اصلی و کنترل کننده ریز شدن دانه‌ها می‌باشد که پدیده اثر کمتری بر افزایش سختی داشته لذا افزایش سختی در این پاس‌ها کاهش می‌یابد [۱۰].



شکل ۶- تغییرات منحنی تنش مهندسی-کرنش مهندسی کامپوزیت آلومینیم-تیتانیوم در سیکل‌های مختلف از فرایند ARB.

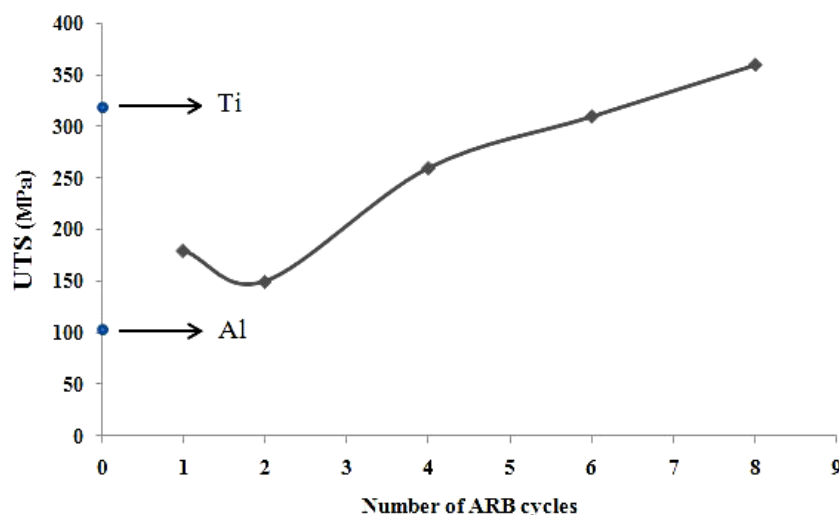
Fig. 6. Curve variations engineering stress-strain curves of aluminum-titanium Composite after various cycles of ARB process

شده‌اند ولی پیوستگی لایه‌ها مشاهده می‌شود. در حالی که در سیکل دوم به دلیل تفاوت رفتار مکانیکی آلومینیم و تیتانیوم و افزایش میزان کرنش و کارسختی در نمونه، شکست و جدایش در لایه‌های تیتانیوم اتفاق می‌افتد و پیوستگی لایه‌های تیتانیوم از بین می‌رود. ذرات نسبتاً

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، پس از پاس اول فرایند ARB استحکام نهایی کششی کاهش یافته و پس از آن روند افزایش استحکام ادامه می‌یابد. فقط تا سیکل دوم ساختار لایه‌ای اولیه آلومینیم و تیتانیوم حفظ شده است. لایه‌های آلومینیم و تیتانیوم در راستای جهت نورد کشیده

لایه‌ای نسبت داد. این باندهای برشی سبب تشکیل میکروتورها در ساختار شده و لذا شکست را در حین آزمون کشش تسریع می‌کنند [۱۱]. در ادامه با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند ARB به دلیل ریز شدن دانه‌های آلومینیم و تیتانیوم و افزایش مرز دانه‌ها به عنوان مانعی در برابر حرکت نابجایی‌ها، استحکام کامپوزیت افزایش می‌یابد. همان‌طور که شکل ۷ نشان می‌دهد با پیشرفت فرایند استحکام تسلیم افزایش یافته است.

بزرگ و توزیع غیر یکنواخت تیتانیوم باعث کاهش استحکام می‌شود. به علت ضخامت زیاد لایه تقویت‌کننده و توزیع غیر یکنواخت آن در مناطقی، زمینه به شدت تحت تمرکز تنش قرار گرفته و در نتیجه به سرعت دچار تسلیم و شکست می‌شود. در ادامه با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند، توزیع یکنواخت‌تر و ذرات ریزتر تیتانیوم در زمینه آلومینیم کارسختی را بالا می‌برد. از طرف دیگر، دلیل کاهش استحکام در فاصله بین سیکل اول و دوم را می‌توان ایجاد باندهای برشی در نمونه کامپوزیت



شکل ۷- تغییرات استحکام کششی نهایی بر حسب تعداد سیکل فرایند ARB

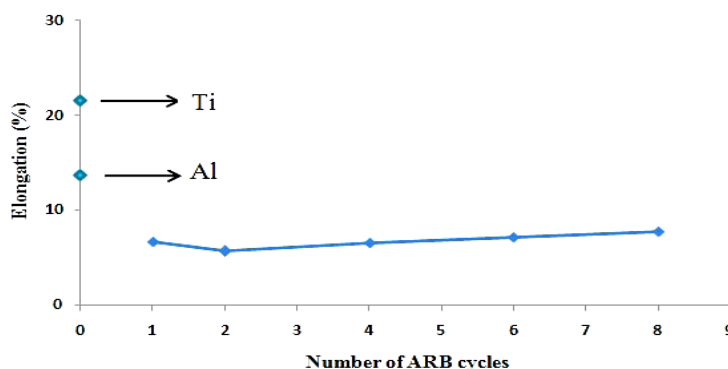
Fig. 7. Ultimate tensile strength changes with the number ARB cycles

پدیده دوم را می‌توان به انباشت نابجایی‌ها در داخل دانه‌ها در ابتدای فرایند نورد تجمعی دانست که قابلیت تغییر شکل را کاهش داده و به سرعت باعث ناپایداری نمونه‌های کشش شده و این نمونه‌ها به سرعت می‌شکنند. اما پیشرفت فرایند، با افزایش یکنواختی توزیع با افزایش

شکل ۸ مقادیر افزایش طول کلی نمونه‌ها را در سیکل‌های مختلف فرایند نورد تجمعی نشان می‌دهد. در ابتدا مقدار افزایش طول کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. این کاهش اولیه را می‌توان به دو پدیده نسبت داد. پدیده اول نحوه توزیع تقویت‌کننده‌ها در زمینه است.

و ابتدا به مرزهای زاویه کم و سپس به مرزهای زاویه زیاد تبدیل شده‌اند. نتیجه این پدیده کاهش دانسیته نابجایی‌های درون دانه‌ها می‌باشد که باعث افزایش قابلیت تغییر شکل نمونه‌ها می‌شود.

سیکل‌های فرایند مقدار افزایش طول بیشتر شده است. به علاوه با پیشرفت فرایند با ایجاد و انباشت هرچه بیشتر نابجایی‌ها در نمونه‌ها، با توجه به مکانیزم‌های ریزدانه شدن، این نابجایی‌ها درون دانه‌ها آرایش خاصی پیدا کرده



شکل ۸- تغییرات درصد ازدیاد طول برای نمونه‌های کامپوزیتی آلومینیم- تیتانیوم در سیکل‌های مختلف فرایند ARB.

Fig. 8. Variation of elongation percent with the number of ARB cycles

۳- انجام فرایند نورد تجمعی تا ۸ سیکل باعث افزایش استحکام و سختی کامپوزیت و کاهش داکتیلیته آن شد.

پی‌نوشت‌ها

1- Accumulative Roll Bonding (ARB)

[2] Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, T. Sakai, "Novel ultra-high straining process for bulk materials development of the accumulative roll-bonding (ARB) process", Acta materialia, Vol. 47, 1999, pp. 579-583.

[3] Z.P. Xing, S.B. Kang, H.W. Kim, "Softening behavior of 8011 alloy produced by accumulative

۴- نتیجه‌گیری

۱- نورد هم‌زمان کامپوزیت لایه‌ای آلومینیم-تیتانیوم باعث شکست و جدایش فاز سخت تیتانیوم در زمینه آلومینیم در سیکل دوم از فرایند ARB می‌شود.

۲- بررسی فصل مشترک آلومینیم-تیتانیوم در پاس اول فرایند توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی، چسبندگی خوب دو فلز را نشان داد.

مراجع

[1] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakari, R.G. Hong, "Ultra-fine grained bulk aluminum produced accumulative roll-bonding (ARB) process", Scripta Materialia, Vol. 39, 1998, pp. 1221-1227.

- [8] F.J. Humphreys, M. Hatherly, "Recrystallization and Related Annealing Phenomena", Second editioned, Elsevier Science Ltd, United Kingdom, 2004.
- [9] H.Y. Wu, S. Lee, J.Y. Wang, "Solid state bonding of iron-base alloy, steel-brass and aluminum alloy", Journal of Materials processing Technology, Vol. 75, 1998, pp. 173-179.
- [10] K.T. Park, H.J. Kwon, W.J. Kim, Y.S. kim, "Microstructural characteristics and thermal stability of ultrafine grained 6061 Al alloy fabricated by accumulative roll bonding process", Materials Science and Engineering A, Vol. 316, 2011, pp. 45-152.
- [11] D. Yang, P. Cizek, P. Hodgson, C. Wen, "Ultrafine equiaxed grain Ti/Al composite produced by accumulative roll bonding", Scripta Materialia, Vol. 47, 2002, pp. 893-899.
- roll bonding process", Scripta Materiala, Vol. 45, 2001, pp. 597-604.
- [4] N. Tsuji, Y. Saito, H. Utsunomiya, S. Tanigawa, "Ultra-fine grained bulk steel produced by accumulative roll-bonding (ARB) process", Scripta Materialia, Vol. 40, 1999, pp. 795-800.
- [5] S. Li, Y. Saito, T. Sakai, H. Utsunomia, "Microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding", Materials Science and Engineering A, Vol. 325, 2002, pp. 228-235.
- [6] S.L. Semiatin, R.Yavari, "Multiple necking and deformation behavior of multilayer composites prepared by cold rolling", Zeitschrift fuer metallkunde, Vol. 81, 1990, pp. 130-135.
- [7] G. Min, J. Moo Lee, S.B. Kang, H.W. Kim, "Evolution of microstructure for multilayered Al/Ni composites by accumulative roll bonding process", Materials Letters, Vol. 60, 2006, pp. 3255-3259.