

بررسی تجربی چقرمگی شکست برای کامپوزیت چندلایه‌ی آلومینیم/مس/منیزیم تولید شده با استفاده از فرایند پیوند سرد نوردی

Original Article

احمد شیخی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

داود رحمت آبادی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی هندی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت

مسلم طیبی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی هندی مواد، دانشگاه صنعتی سهند

راهین هاشمی* (دانشیار)

دانشکده‌ی هندی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت

در این پژوهش کامپوزیت لایه‌ی آلومینیم/مس/منیزیم با روش پیوند سردی با اعمال کاهش ضخامت 60° تولید و چقرمگی شکست برای نمونه‌های اولیه‌ی آلومینیم، مس و کامپوزیت آلومینیم/مس/منیزیم به صورت تجربی بررسی شد. نتایج نشان داد که چقرمگی شکست به هر دو عامل استحکام و شکل‌پذیری وابسته است و چقرمگی شکست کامپوزیت لایه‌ی تولید شده به $32/1$ رسید که نسبت به نمونه‌های اولیه‌ی آلومینیم، مس و منیزیم به ترتیب $3/24$ ، $18/2$ و $73/2$ برابر افزایش یافت. استحکام کششی برای نمونه‌ی تولید شده به $3/22$ مگاپاسکال رسید که نسبت به آلومینیم، مس و منیزیم به ترتیب $44/1$ ، $23/2$ و $29/2$ افزایش می‌یابد. همچنین میکروسختی برای هر لایه به صورت جداگانه محاسبه شد و برای لایه‌های آلومینیم، مس و منیزیم به ترتیب $136/1$ ، $84/2$ ، $41/2$ افزایش یافت. عکس‌های میکروسکوپ الکترون روبشی نشان داد که سطح مقطع شکست لایه‌های آلومینیم و مس نرم، در صورتی که سطح مقطع شکست لایه‌ی منیزیم کاملاً ترد است.

واژگان کلیدی: کامپوزیت لایه‌ی آلومینیم/مس/منیزیم، پیوند سرد نوردی، چقرمگی شکست، خواص مکانیکی و ریزساختار.

ash_7800@yahoo.com
davood.rahmatabadi@yahoo.com
moslem.tayyebi1990@gmail.com
rhashemi@iust.ac.ir

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، کامپوزیت‌های فلزی چندلایه به سبب خواص مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی مورد توجه قرار گرفته است.^[۱] مطالعات انجام گرفته در خصوص کامپوزیت‌های چندلایه حاکی از بهبود خواص چقرمگی شکست، رفتار خستگی، انعطاف‌پذیری، خواص سایشی و ... است.^[۲] در میان فلزات مطلوب برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی چندلایه، آلومینیم به سبب خصوصیات ویژه مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است.^[۳] از بین تکنولوژی‌های موجود برای تولید آلیاژهای چندلایه، در سال‌های اخیر روش پیوند سرد نوردی به دلیل ویژگی‌های کاربردی و منحصر به فرد در مقایسه با سایر روش‌های دیگر رشد و توسعه‌ی سریعی داشته است.^[۴]

از جمله‌ی این ویژگی‌ها می‌توان به ساده بودن و همچنین قابلیت خودکار کردن

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۸/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱۰/۳۰، پذیرش ۱۳۹۶/۱۱/۱۶

DOI:10.24200/J40.2018.10831.1448

جدول ۱. خصوصیات اولیه آلومینیوم ۱۰۵۰، مس خالص و منیزیم AZ ۳۱B.

ماده	ترکیب شیمیایی (%)	میکروسختی (ویزکرز)	استحکام کششی مگاپاسکال
آلومینیوم ۱۰۵۰	Al ۹۹/۱۷, Mg °/۰۵, Fe°/۴, Cr °/۲, Si °/۲۵, Mn °/۰۵, Zn °/۰۵, Ti °/۰۳	۲۵	۹۰/۵
مس خالص	Cu ۹۹/۹, Fe °/۰۰۶ and other element ware balanced	۷۴/۵	۱۷۹/۵۶
منیزیم AZ ۳۱B	Mg ۹۵/۸, Al ۳, Zn ۱, Mn °/۲	۶۷/۳	۱۷۰/۳۵

نسبت به دیگر سیستم‌هایی شود که فلز زمینه و تقویت‌کننده‌های آن دارای ساختاری کریستالی یکسانی هستند.^[۳۹] علاوه بر بررسی چقرمگی شکست، خواص مکانیکی و ریزساختار آلومینیوم/مس/منیزیم تولیدی به روش پیوند سرد نوردی، با استفاده از آزمون‌های مختلف نظیر آزمون کشش تک‌محوره، آزمون میکروسختی و بکرز برای هر لایه به صورت مجزا (لایه‌های آلومینیوم، مس و منیزیم)، شکست‌نگاری به وسیله‌ی میکروسکوپ روبشی الکترونی و میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفته و با نمونه‌های اولیه مقایسه شده است.

۲. روش تحقیق

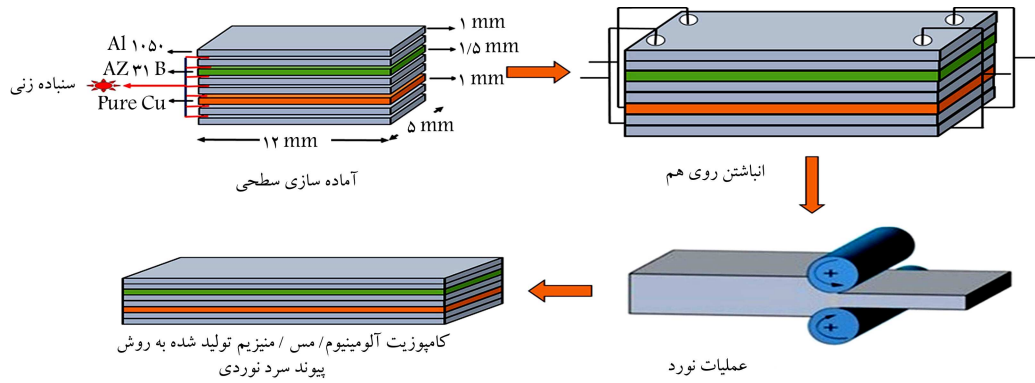
۱.۲. مواد اولیه

خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی ورق‌های اولیه استفاده شده در این پژوهش (آلومینیوم ۱۰۵۰ و مس خالص با ضخامت ۱ میلی‌متر و منیزیم با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر) در جدول ۱ ارائه شده است.

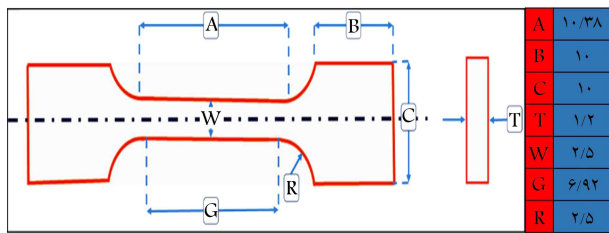
۲.۲. فرایند پیوند سرد نوردی

در فرایند پیوند سرد نوردی، دو یا چند ورق، صفحه یا نوار فلزی یا آلیاژ با جنس‌های یکسان و غیریکسان روی هم قرار می‌گیرد و سپس با گذر از یک ماشین نورد، کرنش مورد نظر اعمال می‌شود تا تغییر شکل مناسبی برای یک اتصال حالت جامد^۱ بین لایه‌های در تماس به دست آید. مطابق شکل ۱، قبل از اعمال نورد، عملیات آماده‌سازی اولیه‌ی سطحی برای لایه‌هایی که در تماس با یکدیگرند انجام می‌شود. عملیات آماده‌سازی به منظور برداشتن هر گونه اکسید و آلودگی سطحی است که می‌تواند شامل شستن با آب و صابون، غوطه‌ور کردن در استون و برداشتن لایه‌ی از سطح توسط برس خورشیدی باشد. مهم‌ترین مرحله در ایجاد پیوند مناسب بین لایه‌های در تماس، مرحله‌ی آماده‌سازی است. در طول فرایند، کاهش ضخامت بالا (۵۰٪ یا بیشتر) تحت فشار اعمالی توسط غلتک‌ها به دست می‌آید. این کاهش ضخامت باعث تولید حرارت و ایجاد پیوند در لایه‌های در تماس می‌شود. بدین ترتیب، اتصال (معمولاً اتصال مکانیکی) در کامپوزیت لایه‌ی از طریق اتصال مکانیکی و اتمی میان دو فلز و لایه به دست می‌آید. تاکنون، تحقیقات و نظریه‌های زیادی در

در سال‌های اخیر از فرایند پیوند سرد به‌طور گسترده برای تولید ورق‌ها و فویل لایه‌ی بزرگ استفاده می‌شود.^[۱۸] مطالعات بسیاری روی پارامترهای حاکم باند به منظور درک ماهیت پیچیده‌ی سازوکار اتصال انجام شده، و شرایط روند به خوبی تعریف شده است. بر اساس گزارش‌های پیوند سرد نوردی فلزات متأثر از پارامترهای مختلفی مثل کاهش ضخامت در طول نورد،^[۲۴-۲۴،۲۰،۱۹،۱۲] درجه حرارت اتصال،^[۲۵،۱۶] مدت زمان آنیلینگ قبل و بعد از فرایند،^[۲۸-۲۶] سرعت نورد^[۳۰،۲۹،۲۶،۲۵] ضخامت اولیه،^[۲۶،۲۵] جهت نورد،^[۲۶] و حضور ذرات بین ورق^[۳۲،۳۱] است. همچنین از نورد سرد پیوندی در تولید مواد مختلفی نظیر آلومینیوم،^[۱۸] فولاد،^[۳۳] مس،^[۳۲] کامپوزیت آلومینیوم/مس،^[۲] آلومینیوم/تیتانیوم،^[۳۵] آلومینیوم/منیزیم^[۲۶] استفاده شده است. در این تحقیق برای اولین بار کامپوزیت چندلایه با سه جنس مختلف آلومینیوم، منیزیم و مس با استفاده از روش پیوند سرد نوردی و در دمای محیط تولید شده و چقرمگی شکست تنش صفحه‌ی، خواص مکانیکی، ریزساختار و سطح مقطع شکست مورد بررسی قرار گرفته شده است. منیزیم با چگالی حدود ۱۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب به عنوان سبک‌ترین فلز صنعتی با ویژگی‌های منحصر به فرد متالورژیکی، کاربردهای وسیعی در صنایع مختلف دارد، و علی‌رغم محدودیت‌های ذاتی در تولید، استفاده و کاربرد آن در صنایع مختلف روز به روز افزوده می‌شود. یکی از این محدودیت‌ها شکل‌پذیری دشوار منیزیم به خصوص در دمای پایین است که با توجه به خواص مطلوبی مانند چگالی پایین و نسبت استحکام به وزن بالا، کم‌تر مورد توجه محققین قرار گرفته است. البته در سال‌های اخیر استفاده از آن در صنایع مختلف مانند هوافضا و خودرو با هدف سبک‌سازی در قطعات تولیدی توسعه یافته است. یکی از پارامترهای بسیار مهم برای قطعات قابل استفاده در این صنایع چقرمگی شکست و مقاومت به رشد ترک بالا است. در این تحقیق به‌منظور بررسی چقرمگی شکست ورق منیزیمی و کامپوزیت آلومینیوم/مس/منیزیم تولید شده به روش پیوند نوردی، از روش منحنی R استفاده شده است. قبلاً با استفاده از این روش، چقرمگی شکست تنش صفحه‌ی ورق‌های لایه‌ی آلومینیوم و کامپوزیت لایه‌ی آلومینیوم/مس تولید شده به روش پیوند سرد نوردی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصله بیان می‌دارد که میزان چقرمگی در نمونه‌های تولید شده افزایش یافته است.^[۳۷،۳۸] هدف این تحقیق ساخت کامپوزیت لایه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم برای اولین بار و بررسی چقرمگی شکست آن است. همچنین اختلاف در ساختار کریستالی آلومینیوم، مس و منیزیم می‌تواند سبب تغییرات ریزساختاری و مکانیکی حین فرایند نورد



شکل ۱. شماتیک فرایند پیوند سرد نوردی.



شکل ۲. ابعاد نمونه‌های آزمون کشش استفاده شده بر اساس استاندارد جی ای اس.

آلومینیوم/مس/منیزیم با روش پیوند سرد نوردی به وسیله‌ی آزمون‌های کشش تک‌محوره و میکروسختی ویکرز مورد بررسی تجربی قرار گرفت. پس از آزمون کشش تک‌محوره، سطح مقطع شکست نمونه‌های اولیه و کامپوزیت فرآوری شده به وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین ریزساختار کامپوزیت لایه‌یی تولید شده به منظور بررسی ناپایداری پلاستیکی در لایه‌های تقویت‌کننده مس و منیزیم با میکروسکوپ نوری مشاهده و مورد بحث قرار گرفت.

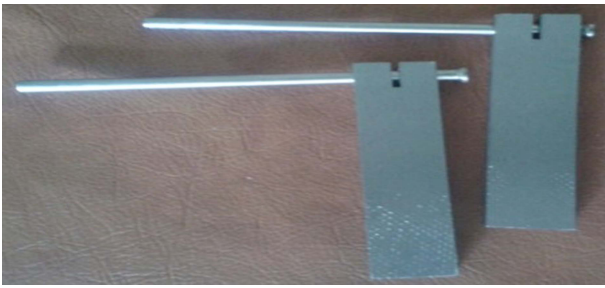
برای نمونه‌های اولیه‌ی مس خالص، آلومینیوم ۱۰۵۰، منیزیم آلایزی و نمونه کامپوزیتی تولید شده، سه نمونه برای آزمون کشش در جهت نورد (صفحه‌ی طول در عرض) به وسیله‌ی ماشین وایرکات و مطابق با ابعاد شماتیک شکل ۲ و بر اساس استاندارد (جی ای اس^۷) آماده شد. آزمون کشش تک‌محوره در دمای اتاق و با نرخ کرنش $1 \times 10^{-4} s^{-1}$ و با استفاده از دستگاه ستام انجام شد. با استفاده از نتایج آزمون کشش، مقادیر استحکام کششی، ازدیاد طول نهایی محاسبه و نمودار تنش کرنش برای همه‌ی نمونه‌ها ترسیم شد.

آزمون میکروسختی ویکرز نیز برای همه‌ی نمونه‌ها تحت بار یکسان ۲۰۰ گرم و زمان اعمال بار ۱۰ ثانیه در راستای عمود بر جهت نورد (در صفحه ضخامت و طول) اندازه‌گیری شد. میکروسختی ویکرز برای هر نمونه به صورت تصادفی در بیش از ۱۰ نقطه‌ی مختلف با استفاده از دستگاه جنیوس اندازه‌گیری شد و پس از حذف بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین مقادیر، با میانگین گرفتن از بقیه مقادیر تعیین شد. قبل از انجام آزمون‌های میکروسختی و بررسی ریزساختار، برای تسهیل در جابه‌جایی نمونه‌ها از مانع استفاده شد. پس از مانع نمونه‌ها، سطح نمونه‌ها به کمک دستگاه پولیش و با استفاده از سنباده‌های ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ برای میکروسختی و سنباده‌های ۸۰۰ تا ۵۰۰۰ برای بررسی ریزساختار (عکس‌برداری با استفاده از میکروسکوپ نوری) پرداخت شد. در نهایت به منظور رفع اکسید لایه‌های منیزیم، با استفاده از الکل و آلومینا بدون استفاده از آب، پولیش نهایی قبیل از عکس‌برداری به وسیله‌ی میکروسکوپ نوری انجام شد. برای بررسی ریزساختار از میکروسکوپ نوری مدل توسن^۸ استفاده شد.

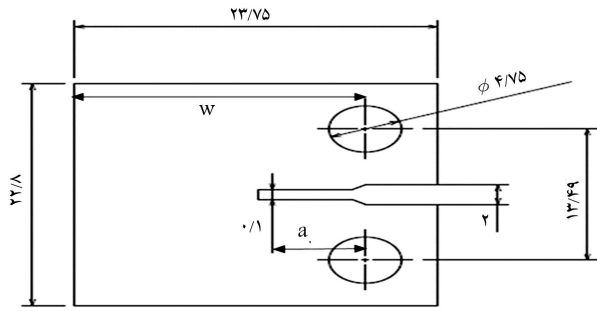
رابطه با سازوکارهای پیوند نوردی ارائه شده است. با توجه به روش مورد استفاده و آنالیزهای مختلف - نظیر میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی و غیره - برای ایجاد پیوند اتم به اتم بین لایه‌های فلزی، تاکنون چهار نظریه برای توضیح سازوکارهای مرتبط در پیوند نوردی پیشنهاد شده است. نظریه‌ی فیلم^۲، نظریه‌ی سد انرژی^۳، نظریه‌ی پیوند نفوذی^۴ و نظریه‌ی تبلور مجدد^۵. در این میان محققین به‌خاطر پایین بودن دما در فرایند پیوند سرد نوردی، نظریه‌ی فیلم را به عنوان سازوکار اصلی در برقراری پیوند عنوان کرده‌اند. بای^۶ بر اساس نظریه‌ی فیلم دو سازوکار پیشنهاد کرد: شکستن لایه‌های سطحی سخت‌کاری شده، فیلم آلودگی‌های اکسیدی. تشکیل لایه‌ی سطحی کارسخت شده در لایه‌های سطحی در تماس با یکدیگر از طریق خراشیدن به وسیله‌ی برس خورشیدی و شکستن همین لایه‌های سطحی یا لایه‌ی اکسیدی تشکیل شده و بیرون آمدن فلز از بین ترک‌ها، نقش اساسی در ایجاد پیوند فلزی دارد.^[۴۰]

در این تحقیق، به منظور بررسی خواص مکانیکی، ریزساختار، سطح مقطع شکست و چقرمگی شکست تنش صفحه‌یی برای کامپوزیت لایه‌یی آلومینیوم/مس/منیزیم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی، ابتدا نمونه‌های اولیه (شش ورق آلومینیوم ۱۰۵۰، یک ورق مس خالص و یک ورق منیزیم) در ابعاد یکسان ۱۲۰ میلی‌متر طول، ۵۰ میلی‌متر عرض بریده شدند. شماتیک فرایند نورد سرد پیوندی در شکل ۱ نشان داده شده است. بر این اساس، فرایند پیوند سرد نوردی شامل سه مرحله‌ی آماده‌سازی اولیه، روی هم قرار دادن ورق‌های اولیه و اعمال فشار به وسیله‌ی فرایند نورد است. در مرحله‌ی آماده‌سازی که مهم‌ترین مرحله در ساخت کامپوزیت‌های لایه‌یی است، ابتدا هر لایه با استفاده از آب و صابون شسته می‌شود و به منظور چربی‌زدایی و اکسیدزدایی نهایی از حمام استون استفاده می‌شود. سپس لایه‌های در تماس با یکدیگر توسط برس سیمی خورشیدی از جنس فولاد که به انتهای مته‌های ستونی بسته شده‌اند خشن‌کاری و زبر می‌شوند.^[۴۱] در مرحله‌ی بعد، چهار طرف همه‌ی لایه‌ها به وسیله‌ی مته با قطر یک میلی‌متر سوراخ می‌شود و پس از قرار دادن نمونه‌ها روی هم با استفاده از سیم نرم فولادی محکم روی هم بسته می‌شوند. هدف این مرحله، جلوگیری از لغزش و سر خوردن لایه‌های روی هم در هنگام اعمال نیرو در فرایند نورد است. نهایتاً در مرحله‌ی آخر با اعمال فشار از طریق کاهش ضخامت ۶۶٪ در حین فرایند نورد، بین پیوند قوی بین لایه‌ها برقرار می‌شود. همچنین توصیه می‌شود که به منظور جلوگیری از اکسایش لایه‌های سطحی، زمان بین مراحل آماده‌سازی سطوح و عملیات نورد کم‌تر از ۱۵۰ ثانیه باشد.^[۴۱]

۳.۲. بررسی ریزساختار، خواص مکانیکی و سطح مقطع شکست
در این پژوهش خواص مکانیکی نمونه‌های اولیه و کامپوزیت لایه‌یی تولیدشده‌ی



شکل ۵. قید و بند استفاده شده برای آزمون چقرمگی.



شکل ۳. نقشه و ابعاد نمونه‌های کششی فشرده.

استفاده شده باید صلب و به گونه‌ای باشد که در حین بارگذاری، تغییر شکل نداشته باشد و موجب بروز خطا در آزمایش نشود. همچنین نباید در حین آزمایش، امکان پیچیدن نمونه و خارج شدن از راستای بارگذاری باشد. در این تحقیق طبق استاندارد ۳۹۹ قید و بندی طراحی و ساخته شده که تصویر آن در شکل ۵ ارائه شده است. باید توجه شود که نمونه‌های آماده شده برای به دست آوردن چقرمگی شکست در مود اول است. همه‌ی نمونه‌ها تحت کنترل جابه‌جایی، تحت بارگذاری شبه استاتیکی، با سرعت 5 mm/min و با استفاده از دستگاه سنتام در دمای محیط انجام شد.



شکل ۴. نمونه‌های کششی فشرده قبل از آزمون شکست.

۳. نتایج و تفسیر آن

۱.۳. خواص مکانیکی و ریزساختار

در شکل‌های ۶ و ۷ ریزساختار و چگونگی برقراری اتصال نوردی بین لایه‌های آلومینیوم - آلومینیوم، آلومینیوم - مس و آلومینیوم - منیزیم نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود پیوند قوی و مناسب و بدون هیچ‌گونه انفصال بین لایه‌های آلومینیوم - مس و آلومینیوم - منیزیم برقرار شده است و لایه‌ها کاملاً به هم پیوند خورده‌اند.

همچنین به وضوح ناپایداری‌های پلاستیک (گلوبی و شکست) در لایه‌های تقویت‌کننده مشاهده می‌شود. بنابر تحقیقات قبلی و گزارش‌های انجام شده، ناپایداری‌های پلاستیک به سبب اختلاف در خواص سیلان تقویت‌کننده‌ها و زمینه رخ می‌دهد.^[۲۵،۱۶،۲] از مقایسه‌ی دو شکل ۶ و ۷ در می‌یابیم که گلوبی شدن و شکست در تقویت‌کننده‌ی منیزیم سریع‌تر نسبت به لایه‌ی مس رخ می‌دهد که این امر را می‌توان به شکل‌پذیری کم منیزیم نسبت به مس نسبت داد. گزارش شده است که کرنش مورد نیاز برای شکست نسبت به گلوبی شدن بیشتر است.^[۲۵] در شکل ۸ نمودار تنش - کرنش برای کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم/مس فرآوری شده با استفاده از پیوند سرد نوردی و نمونه‌های اولیه استفاده شده در این پژوهش (آلومینیوم 50° ، مس خالص و منیزیم AZ ۳۱ B نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود استحکام کششی نهایی برای کامپوزیت تولید شده آلومینیوم/مس/منیزیم به مراتب بالاتر از استحکام مواد اولیه آلومینیوم، مس و منیزیم است و مقدار آن برای نمونه‌ی کامپوزیتی به $220/3$ مگاپاسکال می‌رسد که نسبت به هر کدام از نمونه‌های اولیه‌ی آلومینیوم، مس خالص و منیزیم به ترتیب 144% ، 27% و 29% افزایش یافته است. البته مقدار ازدیاد طول برای نمونه‌ی کامپوزیتی نسبت به مواد اولیه (حتی منیزیم) کم‌تر است که البته با توجه به اعمال کرنش زیاد (بیشتر از 6%) و کارسرد در دمای محیط، افزایش استحکام کششی (بیش از $2/5$ برابر نسب به نمونه اولیه آلومینیوم) و کاهش ازدیاد طول نسبت به نمونه‌های اولیه، کاملاً منطقی و قابل پیش‌بینی است. همچنین تحقیقات پژوهش‌گران دیگر نیز روند تغییرات در خواص مکانیکی به دست آمده در کار حاضر را تأیید می‌کند.

سطح نمونه‌های شکست، پس از انجام آزمون کشش تک‌محوره، به منظور بررسی چگونگی برقراری اتصال نوردی بین لایه‌ها و تعیین سازوکار شکست برای نمونه کامپوزیتی تولید شده و مقایسه با مواد اولیه، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، مدل وگانتسکان^۹ مورد بررسی قرار گرفت.

۴.۲. آزمون چقرمگی شکست تنش صفحه‌یی

در این تحقیق به منظور محاسبه و نیز مقایسه‌ی مقدار چقرمگی شکست در حالت تنش صفحه‌یی برای نمونه‌ی تولید شده به روش پیوند نوردی (ورق چندلایه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم) و ورق‌های اولیه (آلومینیوم خالص تجاری 50° ، منیزیم آلیاژی AZ ۳۱ B و مس خالص تجاری) از روش منحنی R استفاده شد. به منظور تکرارپذیری آزمایش و بررسی دقیق‌تر نمونه‌های کششی فشرده 1° برای هر نمونه به تعداد سه نمونه، برای انجام آزمایش در نظر گرفته شد. این نمونه‌ها بر اساس استاندارد E ۶۴۷ و با استفاده از ماشین وایرکات آماده شد. نقشه‌ی نمونه‌های کششی فشرده در شکل ۳ ارائه شده است. نمونه‌های کامپوزیتی و چندلایه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم در جهت نورد بریده شدند. مطابق شکل ۴ ابعاد نمونه‌های کششی فشرده $1/5 \times 22/8 \times 23/75$ میلی‌متر است که دارای یک شیار نازک با عرض ۱ و طول حدود ۸ میلی‌متر است که این شیار نیز به وسیله‌ی ماشین وایرکات ایجاد شده است. همچنین این شیار به یک ناچ V شکل با زاویه‌ی 60° درجه ختم شده، و پس از آن به اندازه‌ی ۱ میلی‌متر و عرض $2/5^\circ$ میلی‌متر گسترش می‌یابد. این شیار با استفاده از ماشین وایرکات با قطر سیم 2° میلی‌متر ایجاد شد. این روش ایجاد و گسترش ترک اولین بار توسط موراد^[۲۲] و پس از آن توسط دیگر محققین^[۲۳،۲۴] استفاده شد. در شکل ۵ نمونه‌های کششی فشرده با شیار و مشخصات ذکر شده ارائه شده است. با توجه به شرایط آماده‌سازی و ابعاد یکسان نمونه‌های اولیه، برای همه‌ی نمونه‌ها نسبت یکسان $4/0 = \frac{a}{b}$ برقرار است. قید و بند‌های استفاده شده در آزمون چقرمگی شکست نیز باید طبق استاندارد E ۳۹۹ برای نمونه‌های کششی فشرده، طراحی و ساخته شود. طبق این استاندارد قید و بند

جدول ۲. تغییرات میکروسختی قبل و بعد از فرایند پیوند نوردی.

ماده	میکروسختی قبل از فرایند پیوند نوردی (ویکرز)	میکروسختی بعد از فرایند پیوند نوردی (ویکرز)
آلومینیوم ۱۰۵۰	۲۵	۵۹
مس خالص	۷۴	۱۳۶
منیزیم AZ۳۱B	۶۷٫۳	۹۴٫۶

از علل اصلی افزایش میکروسختی برای لایه‌های مختلف، می‌توان به کار سرد، اعمال کرنش زیاد و افزایش چگالی نابه‌جایی اشاره کرد که در کارهای مشابه قبلی نیز ذکر شده‌اند و از عوامل موثر در افزایش سختی بوده‌اند.^[۱۴] همچنین با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲ علاوه بر افزایش میکروسختی برای همه‌ی لایه‌ها مشاهده می‌شود که درصد افزایش میکروسختی برای لایه‌ی آلومینیومی بیشتر است به طوری که این افزایش به ترتیب برای آلومینیوم ۱۳۶٪، برای مس ۸۴٪ و برای منیزیم ۴۱٪ است. دلیل این اختلاف در افزایش میکروسختی برای نمونه‌های آلومینیوم، مس و منیزیم را می‌توان اختلاف در انرژی حاصل از چینش ورق‌های اولیه دانست.

۲.۳. چقرمگی شکست تنش صفحه‌یی

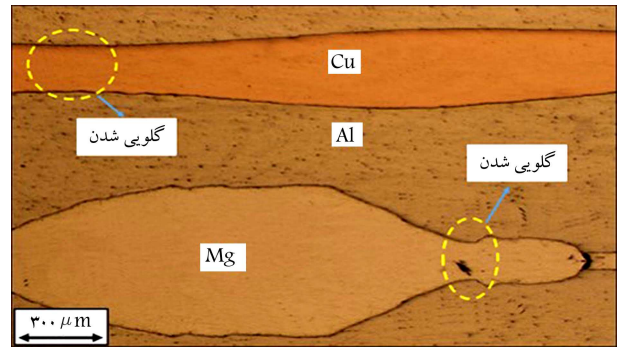
در این پژوهش به منظور محاسبه چقرمگی شکست تنش صفحه‌یی مطابق با استاندارد E۵۶۱ از منحنی R استفاده شد. در این روش و پس از انجام آزمایش چقرمگی شکست تنش صفحه‌یی، باید طول ترک به صورت پیوسته و در نیروهای مختلف اندازه‌گیری شود. این مرحله، مهم‌ترین بخش در محاسبه‌ی دقیق مقدار چقرمگی شکست تنش صفحه‌یی در روش استفاده از منحنی R است. به همین منظور طبق استاندارد E۶۴۷ در روش بصری برای اندازه‌گیری طول ترک در حین انجام پیشنهاد شده است که مبتنی بر استفاده از اختلاف پتانسیل الکتریکی است. در این پژوهش، اندازه‌گیری رشد ترک به صورت بصری و با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل سلسترون^{۱۱} انجام شده است.

در روش منحنی R، در یک طول ترک، تغییرات مقاومت به رشد ترک بر حسب تغییر طول ترک ترسیم می‌شود و مقاومت به رشد ترک با افزایش نیرو و طول ترک افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات ضریب شدت تنش اعمال شده^{۱۲} بر حسب تغییرات طول ترک در سه سطح مختلف از نیروهای ثابت نیز به وسیله‌ی خط‌چین ترسیم می‌شود. در این روش، مقدار چقرمگی شکست تنش صفحه‌یی از محل تماس دو نمودار مقاومت به رشد ترک و فاکتور شدت تنش اعمال شده محاسبه می‌شود. مقدار مقاومت به رشد ترک با استفاده از فرمول ۱ محاسبه می‌شود. از فرمول ۲ نیز برای به دست آوردن ضریب هندسه‌ی ترک استفاده می‌شود. همچنین مقدار ضریب شدت تنش اعمال شده در چند نیروی ثابت در سطوح مختلف و بر حسب تغییرات طول ترک ترسیم می‌شود. محل تماس بین منحنی‌های ضریب مقاومت به رشد ترک و شدت تنش اعمال شده، چقرمگی شکست یا ضریب شدت تنش بحرانی برای نمونه‌ی مورد نظر است.

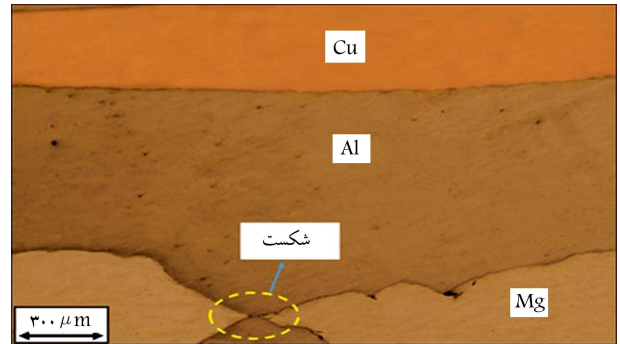
$$k_{r,i} = \frac{p_i}{b\sqrt{w}} \times f_i\left(\frac{a}{w}\right) \quad (1)$$

$$f_i\left(\frac{a}{w}\right) = \left[\frac{2 + \frac{a}{w}}{\left(1 - \frac{a}{w}\right)^{\frac{3}{2}}} \right] \left[0.886 + 4/64 \left(\frac{a}{w}\right) - 13/32 \left(\frac{a}{w}\right)^2 + 14/72 \left(\frac{a}{w}\right)^3 - 5/6 \left(\frac{a}{w}\right)^4 \right] \quad (2)$$

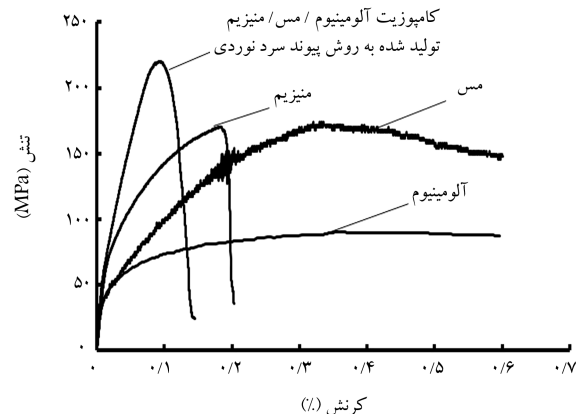
رابطه‌ی ۲ برای $\frac{a}{w} \geq 0.35$ صادق است.



شکل ۶. ریزساختار کامپوزیت آلومینیوم/مس/منیزیم فرآوری شده با استفاده از پیوند سرد نوردی.



شکل ۷. ریزساختار کامپوزیت آلومینیوم/مس/منیزیم فرآوری شده با استفاده از پیوند سرد نوردی.



شکل ۸. نمودار تنش - کرنش ورق‌های اولیه و کامپوزیت لایه‌یی فرآوری شده آلومینیوم/مس/منیزیم با استفاده از پیوند سرد نوردی.

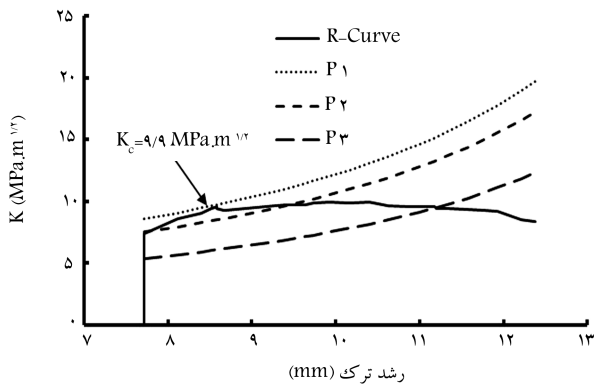
به منظور بررسی خواص مکانیکی، علاوه بر آزمون کشش تک‌محوره، آزمون میکروسختی نیز برای هر کدام از لایه‌های آلومینیوم، مس و منیزیم موجود در کامپوزیت لایه‌یی آلومینیوم - مس - منیزیم تولید شده با روش پیوند سرد نوردی به صورت مجزا انجام شده و با مقادیر اولیه میکروسختی برای هر نمونه مقایسه شد. نتایج میکروسختی ویکرز برای هر نمونه قبل و بعد از فرایند پیوند سرد نوردی در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج حاصل از آزمون میکروسختی ویکرز نشان می‌دهد که مقدار میکروسختی برای هر سه لایه با شیب زیاد افزایش یافته است و به ترتیب قبل و بعد از فرایند پیوند نوردی، برای لایه‌های آلومینیوم از ۲۵ به ۵۹، لایه‌ی مس از ۷۴ به ۱۳۶ و برای منیزیم از ۶۷٫۳ به ۹۴٫۶ می‌رسد.

معادلات ۱ و ۲ محاسبه شد. منحنی R برای نمونه‌های اولیه آلومینیوم ۱۰۵۰، مس خالص تجاری و کامپوزیت لایه‌بی آلومینیوم/مس/منیزیم تولید شده با استفاده از روش پیوند سرد نوردی در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ ارائه شده است. خطوط ممتد، منحنی R و نمودارهای خط‌چین، ضریب شدت تنش اعمال شده در نیروهای مختلف و ثابت است و مقدار چقرمگی شکست برای هر نمونه از تماس بین منحنی R و شدت تنش اعمال شده در نیروی ثابت به دست می‌آید. مطابق با این سه شکل، به بیان دیگر، نقاط تماس بین منحنی‌های R و خطوط نقطه‌چین، ضرایب شدت تنش بحرانی در طول ترک مورد نظر است. این بدان معناست که در لحظه‌ی

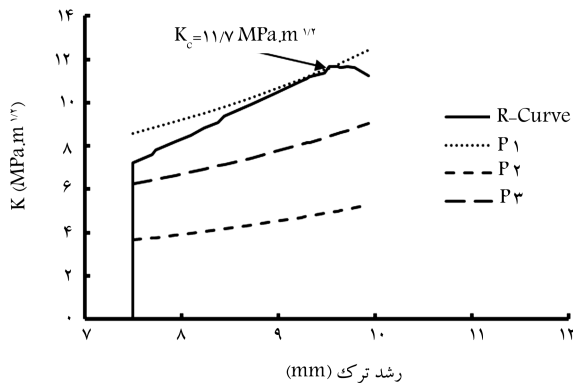
در شکل ۹ نمونه‌ی تغییر شکل یافته‌ی منیزیم اولیه پس از آزمون چقرمگی شکست تنش صفحه‌یی، قید و بند و میکروسکوپ نوری ارائه شده است. همچنین در این شکل مشخص است که رشد ترک برای ورق منیزیم آلیاژی در یک مسیر مستقیم و در راستای همان ترک اولیه است.

در شکل ۱۰ نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه‌ی منیزیم آلیاژی و کامپوزیت لایه‌بی آلومینیوم/مس/آلومینیوم، تولید شده به روش پیوند سرد نوردی ارائه شده است. جابه‌جایی نمودار، جابه‌جایی دهانه‌ی ترک در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل، واضح است که نیروی گسترش ترک با افزایش رشد ترک و تا نقطه بیشترین مقدار نیرو، برای هر دو نمونه افزایش می‌یابد و این افزایش برای نمونه‌ی کامپوزیتی به صورت خطی است. این مقدار نیرو در شکل ۱۰ بیان‌گر مقاومت به گسترش ترک است که در ماده‌ی کامپوزیتی و چندلایه‌ی تولید شده به مراتب بیشتر از نمونه‌ی منیزیم اولیه است. قابل ذکر است که آلیاژ منیزیم اولیه دارای استحکام و ضخامت بیشتر نسبت به نمونه‌های اولیه آلومینیوم ۱۰۵۰ و مس خالص است. مقدار نیروی بیشینه با استفاده از شکل ۱۰ به دست می‌آید. مقدار بیشینه نیروی قابل تحمل در هنگام شروع شدن رشد ترک به مقدار استحکام کششی وابسته است و به همین دلیل بیشینه مقدار نیروی مقاومت به رشد ترک، در نمونه‌ی کامپوزیتی که استحکام بالاتری دارد، به مراتب بیشتر است. این مقدار نیرو در حالت بیشینه برای کامپوزیت آلومینیوم/مس/منیزیم و نمونه‌های اولیه آلومینیوم، مس و منیزیم در جدول ۲ ارائه شده است.

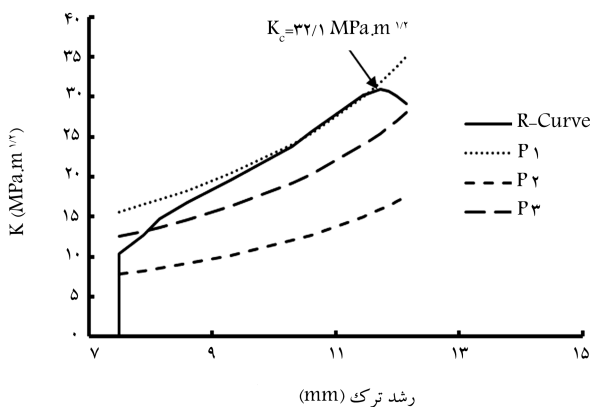
چقرمگی شکست برای هر نمونه بر اساس استاندارد E ۵۶۱ و با استفاده از



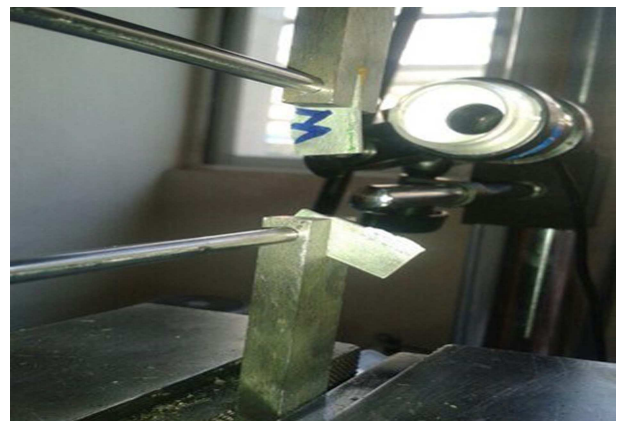
شکل ۱۱. منحنی R برای آلومینیوم ۱۰۵۰.



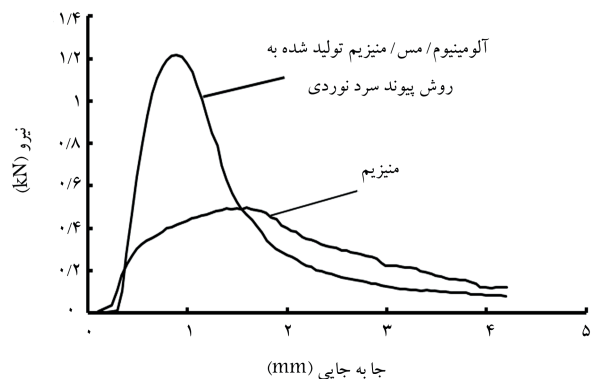
شکل ۱۲. منحنی R برای منیزیم آلیاژی AZ ۳۱ B.



شکل ۱۳. منحنی R برای آلومینیوم/مس/منیزیم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی.



شکل ۹. نمونه‌های کششی فشرده بعد از آزمون شکست.



شکل ۱۰. نمودار نیرو - جابه‌جایی در آزمون شکست برای نمونه‌ی اولیه منیزیم و کامپوزیت لایه‌بی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی.

جدول ۳. نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی و شکست.

ماده	چقرمگی شکست (مگاپاسکال متر ۱/۲)	نیروی بیشینه (نیوتن)	استحکام کششی (مگاپاسکال)	ازدیاد طول (%)
آلومینیوم خالص ۱۰۵۰	۹/۹	۱۷۹	۹۰/۵	۳۵/۶
مس خالص تجاری	۱۴/۶	۳۶۸	۱۷۸	۳۴/۴
منیزیم آلیاژی AZ ۳۱B	۱۱/۷	۴۹۷	۱۷۰	۱۸/۴
کامپوزیت Al/Cu/mg تولید شده با روش پیوند نوردی	۳۲/۱	۱۲۱۷	۲۲۰/۳	۹/۳

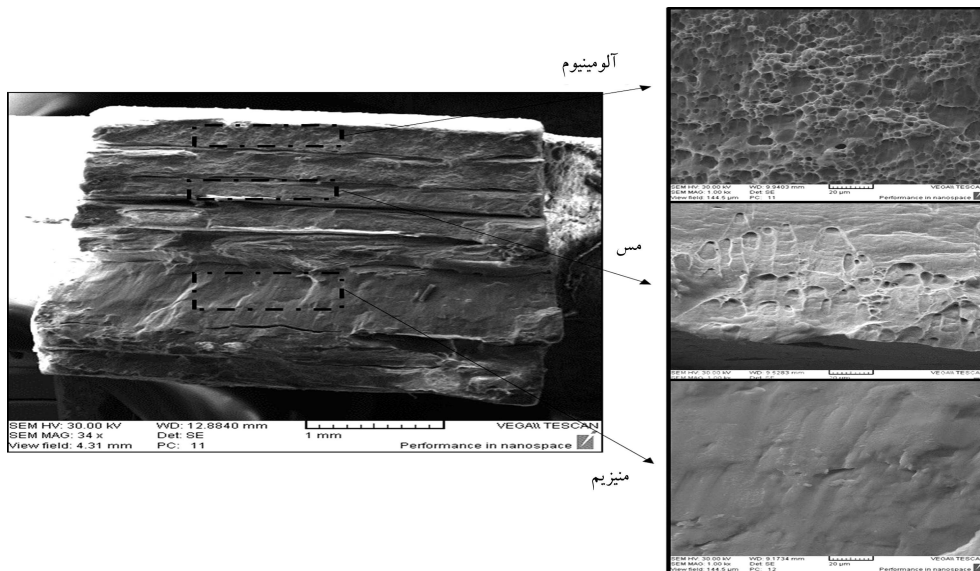
شکست نمونه‌ی کامپوزیتی آلومینیوم ۵۲/۵۰ مس تولید شده به روش پیوند نوردی و کار حاضر می‌توان به تأثیر وجود منیزیم اشاره کرد. مقدار چقرمگی شکست کامپوزیت آلومینیوم ۵۲/۵۰ مس تولید شده به روش پیوند نوردی با کاهش ضخامت ۵۰٪، ۳۸/۷ گزارش شده است.^[۳۷] با وجود استحکام بالاتر آلومینیوم ۵۲/۵۰ مس نسبت به کامپوزیت آلومینیوم ۱۰۵۰/مس/منیزیم، چقرمگی شکست دو نمونه اختلاف زیادی ندارد که از دلایل اصلی آن وجود منیزیم و اعمال کرنش بیشتر در نمونه‌ی کامپوزیتی آلومینیوم/مس/منیزیم است.

در این تحقیق با استفاده از روش ساده و کم‌هزینه‌ی فرایند پیوند سرد نوردی کامپوزیت آلومینیوم/مس/منیزیم با خواص مکانیکی و شکست مطلوب تولید شد و از کامپوزیت‌های تولید شده با این روش می‌توان به عنوان جایگزین مناسب برای روش‌ها و مواد پر هزینه در صنایع مختلف مانند هوا فضا، صنایع نظامی و غیره استفاده شود.

۳.۳. شکست نگاری

تصاویر سطح مقطع شکست برای لایه‌های آلومینیوم، مس و منیزیم در کامپوزیت چندلایه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم تولید شده به روش پیوند نوردی پس از آزمون کشش تک‌محوره در شکل ۱۴ ارائه شده است. بر این اساس برای نمونه‌ی کامپوزیتی، خاصیت لایه‌یی به وضوح مشاهده می‌شود. همچنین سطح مقطع شکست لایه‌های آلومینیوم و مس از نوع شکست نرم همراه با حفره‌ها و ریزحفره‌هاست در صورتی که سطح مقطع شکست لایه‌ی تقویت‌کننده منیزیم آلیاژی به صورت شکست ترد مشاهده می‌شود. سازوکار غالب شکست در فلزاتی که دارای ساختار کریستالی مکعبی با وجوه مرکزدار هستند، تشکیل حفره و سپس شکست نرم است. شکست نرم در بیشتر فلزات با ساختار کریستالی مکعبی با وجوه مرکزدار، به صورت دیمپل‌های هم‌محور یا نیم‌کره ظاهر می‌شود. این نوع شکست با تشکیل میکرو حفرات، پیوستگی، انتشار ترک یا شکست برشی در زاویه‌یی نسبتاً در راستای جهت کشش رخ می‌دهد. ریز حفرات در نواحی مانند آخال‌ها، مرز دانه‌ها، نواحی تجمع ناهنجاری‌ها و نواحی دارای ناپیوستگی کرنش جوانه‌زنی می‌کنند. اکثر آلیاژهای ساختمانی هنگامی که تحت اعمال بار قرار می‌گیرند به سبب پیوستگی حفرات دچار شکست می‌شوند. این سازوکار شکست در نمونه‌های آلومینیوم و مس نیز مشاهده می‌شود. همچنین شکست نرم می‌تواند در مواد با چگالی ناهنجاری پایین رخ می‌دهد که معمولاً سطح مقطع شکست در آن‌ها با حفرات عمیق ریشه‌دار و به صورت نیمه‌کروی مشاهده می‌شود. البته در فلزات با چقرمگی بالا اندازه ترک‌ها و حفرات بسیار بزرگ‌تر است و این حفرات با بزرگ شدن موجب شکست می‌شوند، البته در سایر موارد از پیوستگی میکرو حفرات، ترک‌ها ایجاد و گسترش می‌یابد. اما سازوکار شکست ترد کاملاً با سازوکار شکست نرم متفاوت بوده و شکست ترد بدون تشکیل میکرو حفرات

که سطح ضریب شدت تنش در قطعه، برابر میزان مقاومت شکست ماده می‌شود، رشد ترک به صورت ناپایدار آغاز می‌شود. همچنین مطابق شکل‌های ۱۱ تا ۱۳، در یک جزء افزایش بعد از نقطه‌ی تماس، ضریب شدت تنش اعمال شده از مقاومت ماده بیشتر می‌شود که مبین رشد ناپایدار ترک است. بر اساس جدول ۳ که در آن نتایج حاصل از محاسبه‌ی چقرمگی شکست تنش صفحه‌یی نیز مشخص است مقادیر چقرمگی شکست برای نمونه‌های اولیه‌ی آلومینیوم، مس و منیزیم به ترتیب ۹/۹، ۱۴/۶ و ۱۱/۷ است. با توجه به شکل‌پذیری پایین منیزیم، انتظار می‌رفت که مقدار چقرمگی شکست برای نمونه‌ی منیزیمی پایین‌تر از آلومینیوم باشد که نتایج نشان‌دهنده‌ی عکس این پیش‌بینی بوده، و چقرمگی شکست منیزیم ۱/۱۸ برابر آلومینیوم است. دلیل این نتیجه به استحکام بالاتر منیزیم نسبت به آلومینیوم خالص بر می‌گردد. همچنین مطابق جدول ۲، مقدار چقرمگی شکست مس ۱/۲۵ برابر نمونه‌ی منیزیم و ۱/۴۸ برابر آلومینیوم است، در حالی که مس در مقایسه با منیزیم دارای استحکام تقریباً برابر و شکل‌پذیری بالاتر و نسبت به آلومینیوم دارای شکل‌پذیری برابر و استحکام بیشتر است. شکل‌پذیری بالاتر مس در مقایسه با منیزیم (برابر با ۱/۸۷) باعث چقرمگی شکست بالاتر (برابر با ۱/۲۵) شده است. همچنین استحکام بالاتر مس در مقایسه با آلومینیوم (برابر با ۱/۹۶) باعث چقرمگی شکست بهتر (برابر با ۱/۴۸) شده است. بنابراین پارامتر چقرمگی شکست متأثر از دو پارامتر چقرمگی و استحکام است و داشتن فقط یک پارامتر باعث افزایش چقرمگی نمی‌شود؛ نتایج تجربی این تحقیق به صراحت مؤید این مسئله است. مقدار چقرمگی شکست تنش صفحه‌یی برای نمونه‌ی کامپوزیت چندلایه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم، تولید شده به روش پیوند سرد نوردی ۳۲/۱ مگاپاسکال متر ۱/۲ است که بیان‌گر بهبود چشمگیر مقدار چقرمگی شکست تنش صفحه‌یی برای نمونه‌ی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی در مقایسه با نمونه‌های اولیه است. مقدار چقرمگی شکست آلومینیوم/مس/منیزیم نسبت به نمونه‌های اولیه آلومینیوم، مس و منیزیم به ترتیب ۳/۲۴، ۲/۱۸، ۲/۷۳ برابر بهبود یافته است. دلیل اصلی افزایش قابل توجه در نمونه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی، استحکام بالا و چقرمگی مطلوب در پایان فرایند است. چنان‌که پیش‌تر نیز اشاره شد، پارامتر چقرمگی شکست برای نمونه‌هایی با هندسه‌ی مشابه تحت تأثیر دو عامل مهم استحکام و چقرمگی (شکل‌پذیری) است. اعمال کارسرد و کرنش بالا در فرایند پیوند سرد نودی باعث افزایش میزان چگالی ناهنجاری و متعاقباً افزایش در استحکام و سختی می‌شود. البته مقدار ازدیاد طول کاهش می‌یابد که این کاهش قابل پیش‌بینی است. میزان شکل‌پذیری نهایی با توجه به دست‌یابی به استحکام و سختی بالا، نسبتاً مطلوب و مناسب بوده و اعمال نورد باعث کاهش شدید ازدیاد طول و تردی بیش از حد نمی‌شود که علت آن استفاده از فلزات آلومینیوم و مس با چقرمگی بسیار بالا و ایجاد پیوند مناسب است. همچنین وجود منیزیم با قدرت جذب انرژی بالا از دلایل دیگر برای افزایش چقرمگی شکست کامپوزیت تولید شده با روش جوش نوردی است. از مقایسه‌ی نتایج مقاله‌ی بررسی چقرمگی



شکل ۱۴. سطح مقطع شکست کامپوزیت آلومینیوم/مس/منیزیم فرآوری شده با استفاده از پیوند سرد نوردی.

برای کامپوزیت آلومینیوم/مس/منیزیم تولید شده نسبت به نمونه‌های اولیه آلومینیوم، مس و منیزیم به ترتیب ۱۴۴٪، ۲۳٪ و ۲۹٪ افزایش یافت. همچنین مقادیر میکروسختی برای لایه‌های آلومینیوم، مس و منیزیم بعد از فرایند نسبت به قبل از پیوند سرد نوردی به ترتیب ۱۳۶٪، ۸۴٪ و ۴۱٪ افزایش یافت.

۳. از مقایسه‌ی نتایج آزمون چقرمگی شکست برای نمونه‌های اولیه آلومینیوم، مس و منیزیم مشخص شد که پارامتر چقرمگی شکست به هر دو عامل استحکام و شکل پذیری وابسته است و همواره افزایش در یک عامل نمی‌تواند منجر به افزایش چقرمگی شکست شود.

۴. نتایج آزمون چقرمگی شکست نشان داد که مقدار چقرمگی شکست برای آلومینیوم/مس/منیزیم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی بسیار بالاتر از نمونه‌های اولیه آلومینیوم، مس و منیزیم به ترتیب ۲۴/۳، ۱۸/۲ و ۷۳/۲ برابر بهبود یافته است. از عوامل اصلی افزایش مقدار چقرمگی برای کامپوزیت تولید شده می‌توان به استحکام و سختی بالا، ازدیاد طول مناسب، وجود منیزیم و پیوند مطلوب بین لایه‌های آلومینیوم و تقویت‌کننده‌های منیزیم و مس اشاره کرد.

۵. تصاویر میکروسکوپ رویشی نشان می‌دهد که سطح مقطع شکست آلومینیوم و مس به صورت نرم همراه با میکروحفرات است و سطح مقطع شکست منیزیم به صورت کاملاً ترد تشخیص داده شد.

و تغییر شکل در سطح شکست ایجاد می‌شود و بر خلاف سطح مقطع شکست نرم، سطح مقطع شکست ترد کاملاً صاف است.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق کامپوزیت لایه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم با استفاده از فرایند پیوند سرد نوردی ساخته شد و خواص مکانیکی، ریزساختاری، سطح مقطع شکست و چقرمگی شکست تنش صفحه‌ی با استفاده از آزمون‌های کشش تک‌محوره، میکروسختی، میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی رویشی و منحنی R مورد بررسی تجربی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱. کامپوزیت لایه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم با استفاده از فرایند پیوند سرد نوردی با اعمال کاهش ضخامت ۶۰٪ با موفقیت تولید شد. همچنین تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی رویشی نشان داد که پیوند مناسب بین لایه‌های آلومینیوم/مس و آلومینیوم/منیزیم برقرار است.

۲. خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده به مراتب بهتر از مواد اولیه استفاده شده بوده، به طوری که مقادیر استحکام کششی نهایی و میکروسختی و یکرز به صورت قابل توجه افزایش یافت. مقدار استحکام کششی ۲۲۰/۳ مگاپاسکال حاصل شد که البته مقدار ازدیاد طول کاهش یافت. مقدار استحکام کششی

پانویس‌ها

1. solid state bonding
2. film theory

3. energy barrier theory
4. diffusion bonding theory
5. joint recrystallization theory
6. Bay
7. JIS

8. Tuscen
9. vega tescan
10. ct sample
11. celestron
12. kappplied

منابع (References)

1. Alizadeh, M. and Samiei, M. "Fabrication of nanostructured Al/Cu/Mn metallic multilayer composites by accumulative roll bonding process and investigation of their mechanical properties", *Materials & Design*, **56**, pp. 680-684 (2014).
2. Eizadjou, M., Talachi, A.K., Manesh, H.D. and et al. "Investigation of structure and mechanical properties of multi-layered Al/Cu composite produced by accumulative roll bonding (ARB) process", *Composites Science and Technology*, **68**(9), pp. 2003-2009 (2008).
3. Tayyebi, M. and Eghbali, B. "Study on the microstructure and mechanical properties of multilayer Cu/Ni composite processed by accumulative roll bonding", *Materials Science and Engineering: A*, **559**, pp. 759-764 (2013).
4. Mehr, V.Y. Rezaeian, A. and Toroghinejad, M.R. "Application of accumulative roll bonding and anodizing process to produce Al-Cu-Al₂O₃ composite", *Materials & Design*, **70**, pp. 53-59 (2015).
5. Li, L., Nagai, K. and Yin, F. "Progress in cold roll bonding of metals", *Science and Technology of Advanced Materials* (2016).
6. Rahmatabadi, D., Shahmirzaloo, A., Farahani, M. and Hashemi, R. "Characterization of the plastic and elastic properties of aluminum sheet produced by crb process via dic method", *Modares Mechanical Engineering*, **19**(2), pp. 505-513, (2019).
7. Milner, D. and Vaidyanath, L. "Significance of surface preparation in cold pressure welding", *Met Constr Br Weld J*, **7**, pp. 1-6 (1960).
8. Clemensen, C., Juelstorp, O. and Bay, N. "Cold welding. Part 3: influence of surface preparation on bond strength", *Metal Construction*, **18**(10), pp. 625-629 (1986).
9. Vaidyarath, L., Nicholas, M. and Milner, D. "Pressure welding by rolling brit", *Welding J*, **6**, pp. 13-28 (1959).
10. Wright, P., Snow, D. and Tay, C. "Interfacial conditions and bond strength in cold pressure welding by rolling", *Metals Technology*, **5**(1), pp. 24-31 (1978).
11. Yong, J., Dashu, P., Dong, L. and et al. "Analysis of clad sheet bonding by cold rolling", *Journal of Materials Processing Technology*, **105**(1), pp. 32-37 (2000).
12. Yahiro, A., Masui, T., Yoshida, D. and et al. "Development of nonferrous clad plate and sheet by warm rolling with different temperature of materials", *ISIJ International*, **31**(6), pp. 647-654 (1991).
13. Madaah-Hosseini, H. and Kokabi, A. "Cold roll bonding of 5754-aluminum strips", *Materials Science and Engineering: A*, **335**(1), pp. 186-190 (2002).
14. Pan, D. Gao, K. and Yu, J. "Cold roll bonding of bimetallic sheets and strips", *Materials Science and Technology*, **5**(9), pp. 934-939 (1989).
15. Danesh Manesh, H. and Karimi Taheri, A. "Study of mechanisms of cold roll welding of aluminium alloy to steel strip", *Materials Science and Technology*, **20**(8), pp. 1064-1068 (2004).
16. Eizadjou, M. Manesh, H.D. and Janghorban, K. "Investigation of roll bonding between aluminum alloy strips", *Materials & Design*, **29**(4), pp. 909-913 (2008).
17. Le, H., Sutcliffe, M., Wang, P. and et al. "Surface oxide fracture in cold aluminium rolling", *Acta Materialia*, **52**(4), pp. 911-920 (2004).
18. Jamaati, R. and Toroghinejad, M.R. "Effect of friction, annealing conditions and hardness on the bond strength of Al/Al strips produced by cold roll bonding process", *Materials & Design*, **31**(9), pp. 4508-4513 (2010).
19. Lukaschkin, N., Borissow, A. and Erlikh, A. "The system analysis of metal forming technique in welding processes", *Journal of Materials Processing Technology*, **66**(1), pp. 264-269 (1997).
20. Wu, H.-Y., Lee, S. and Wang, J.-Y. "Solid-state bonding of iron-based alloys, steel-brass, and aluminum alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, **75**(1), pp. 173-179 (1998).
21. Karakazov, N., *Diffusion Bonding of Metals*, Pergamon Press Oxford, (1985).
22. Luo, J.-G. and Acoff, V.L. "Using cold roll bonding and annealing to process Ti/Al multi-layered composites from elemental foils", *Materials Science and Engineering: A*, **379**(1), pp. 164-172 (2004).
23. Barlow, C. Nielsen, P. Hansen, N. "Multilayer roll bonded aluminium foil: processing microstructure and flow stress", *Acta Materialia*, **52**(13), pp. 3967-3972 (2004).
24. Quadir, M. Wolz, A. Hoffman, M. and et al. "Influence of processing parameters on the bond toughness of roll-bonded aluminium strip", *Scripta Materialia*, **58**(11), pp. 959-962 (2008).
25. Abbasi, M. and Toroghinejad, M.R. "Effects of processing parameters on the bond strength of Cu/Cu roll-bonded strips", *Journal of Materials Processing Technology*, **210**(3), pp. 560-563 (2010).
26. Jamaati, R. and Toroghinejad, M.R. "Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process", *Materials Science and Engineering: A*, **527**(9), pp. 2320-2326 (2010).
27. Manesh, H.D. Taheri, A.K. "The effect of annealing treatment on mechanical properties of aluminum clad steel sheet", *Materials & Design*, **24**(8), pp. 617-622 (2003).
28. Movahedi, M. Madaah-Hosseini, H. Kokabi, A. "The influence of roll bonding parameters on the bond strength of Al-3003/Zn soldering sheets", *Materials Science and Engineering: A*, **487**(1), pp. 417-423 (2008).
29. McEwan, K.J.B. and Milner, D. "Pressure welding of dissimilar metals", *British Welding Jour*, **9**, pp. 406-420 (1962).
30. Butlin, I. and Mackay, C. "Experiments on the roll-bonding of tin coatings to non-ferrous substrates", *Sheet Metal Ind*, **56**(11), pp. 1063-1064 (1979).

31. Lu, C. Tieu, K. and Wexler, D. "Significant enhancement of bond strength in the accumulative roll bonding process using nano-sized SiO₂ particles", *Journal of Materials Processing Technology*, **209**(10), pp. 4830-4834 (2009).
32. Alizadeh, M. and Paydar, M. "Study on the effect of presence of TiH₂ particles on the roll bonding behavior of aluminum alloy strips", *Materials & Design*, **30**(1), pp. 82-86 (2009).
33. Tsuji, N. Saito, Y. Utsunomiya, H. and et al. "Ultrafine grained bulk steel produced by accumulative roll-bonding (ARB) process", *Scripta Materialia*, **40**(7), pp. 795-800, 3/5/ (1999).
34. Shaarbafe, M. and Toroghinejad, M.R. "Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding process", *Materials Science and Engineering: A*, **473**(1), pp. 28-33 (2008).
35. Yang, D., Cizek, P., Hodgson, P and et al. "Ultrafine equiaxed-grain Ti/Al composite produced by accumulative roll bonding", *Scripta Materialia*, **62**(5), pp. 321-324 (2010).
36. Wu, K., Chang, H., Maawad, E. and et al. "Microstructure and mechanical properties of the Mg/Al laminated composite fabricated by accumulative roll bonding (ARB)", *Materials Science and Engineering: A*, **527**(13), pp. 3073-3078 (2010).
37. Rahmatabadi, D. Mohammadi, B. Hashemi, R. and et al. "Experimental investigation of plane stress fracture toughness for Al/Cu/Al multilayer produced by cold roll bonding process", *Modares Mechanical Engineering*, **17**(5), pp. 166-174 (2017).
38. Rahmatabadi, D. Hashemi, R. Mohammadi, B. and et al. "Experimental investigation of plane stress fracture toughness for two layers of aluminum sheets produced by cold roll bonding process", *Modares Mechanical Engineering*, **17**(2), pp. 101-108 (2017).
39. Shabani, A. Toroghinejad, M.R. and Shafyei, A. "Fabrication of Al/Ni/Cu composite by accumulative roll bonding and electroplating processes and investigation of its microstructure and mechanical properties", *Materials Science and Engineering: A*, **558**, pp. 386-393 (2012).
40. Li, L. Nagai, K. and Yin, F. "Progress in cold roll bonding of metals", *Science and Technology of Advanced Materials*, **9**(2), pp. 023001 (2008).
41. Jamaati, R. Toroghinejad, M. "Cold roll bonding bond strengths: review", *Materials Science and Technology*, **27**(7), pp. 1101-1108 (2011).
42. Mourad, A. Alghafri, M. Zeid, O.A. and et al. "Experimental investigation on ductile stable crack growth emanating from wire-cut notch in AISI 4340 steel", *Nuclear Engineering and Design*, **235**(6), pp. 637-647, (2005).
43. Mohammadi, B. Tavoli, M. and Djavanroodi, F. "Effects of constrained groove pressing (CGP) on the plane stress fracture toughness of pure copper", *Structural Engineering and Mechanics*, **52**(5), pp. 957-969 (2014).
44. Rahmatabadi, D. Hashemi, R. Mohammadi, B. and et al. "Experimental evaluation of the plane stress fracture toughness for ultra-fine grained aluminum specimens prepared by accumulative roll bonding process", *Materials Science and Engineering: A* (2017).
45. Reihanian, M. and Naseri, M. "An analytical approach for necking and fracture of hard layer during accumulative roll bonding (ARB) of metallic multilayer", *Materials & Design*, **89**, pp. 1213-1222 (2016).
46. Rahmatabadi, R. and Hashemi, R. "Experimental investigation of fracture surfaces and mechanical properties of AA1050 aluminum produced by accumulative roll bonding process", *Modares Mechanical Engineering*, **16**(10), pp. 305-312 (2016).