

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

احمد شیخی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دادود رحمت‌آبادی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی هنдрیک مکانیک، دانشگاه علم و صنعت

مسلم طبیعی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی هندریک مواد، دانشگاه صنعتی سهند

رامین هاشمی* (دانشیار)

دانشکده‌ی هندریک مکانیک، دانشگاه علم و صنعت

مهمنگی مکانیک شفاف (بهار ۱۳۹۸)

دوری ۳-۴، شماره ۱، ص. ۹۳-۱۰۳

در این پژوهش کامپوزیت لایه‌یی آلومنیوم/مس/منیزیم با روش پیوند نوردی با اعمال کاهش ضخامت ۶٪ تولید و چقرمگی شکست برای نمونه‌های اولیه‌ی آلومنیوم، مس و کامپوزیت آلومنیوم/مس/منیزیم به صورت تجزیی بررسی شد. نتایج نشان داد که چقرمگی شکست به هر دو عامل استحکام و شکل پذیری وابسته است و چقرمگی شکست کامپوزیت لایه‌یی تولید شده به ۱/۲۳ رسید که نسبت به نمونه‌های اولیه آلومنیوم، مس و منیزیم به ترتیب ۲/۱۸، ۳/۲ و ۲/۷۳ برابر افزایش یافت. استحکام کششی برای نمونه تولید شده به ۳/۲۲۰ رسید که نسبت به آلومنیوم مس و منیزیم به ترتیب ۱۴٪ و ۲۹٪ افزایش می‌یابد. همچنین میکروسختی برای هر لایه به صورت جداگانه محاسبه شد و برای لایه‌های آلومنیوم، مس و منیزیم به ترتیب ۱/۳۶٪، ۱/۸۴٪ و ۱/۴۱٪ افزایش یافت. عکس‌های میکروسکوپ الکترون رویشی نشان داد که سطح مقطع شکست لایه‌های آلومنیوم و مس نرم، در صورتی که سطح مقطع شکست لایه‌ی منیزیم کاملاً ترد است.

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

وازگان گلایدی: کامپوزیت لایه‌یی آلومنیوم/مس/منیزیم، پیوند سرد نوردی، چقرمگی شکست، خواص مکانیکی و ریزاساختار.

۱. مقدمه

روش پیوند نوردی، اشاره کرد. فرایند پیوند سرد نوردی توسط محققین با اصطلاح‌های مختلفی مثل «جوش فشاری سرد به وسیله‌ی نورد»^[۱۰-۱۶]، «پیوند به وسیله‌ی نورد سرد»^[۱۱]، «پوشش به وسیله‌ی نورد»^[۱۲]، «پیوند نورد سرد»^[۱۳] معرفی شده است. پیوند سرد نوردی، نوعی جوشکاری حالت جامد است، که پیوند آن بر اثر تغییرشکل پلاستیک در سطح مشترک فلزات پیوند ایجاد می‌شود.^[۱۷-۱۵] در این روش زمانی پیوند ایجاد می‌شود که انساط سطحی در سطح لایه‌ها ایجاد شود. به عبارت دیگر فشار باید چنان زیاد باشد که باعث خارج شدن فلز اصلی از شکاف‌های ایجاد شده روی سطح شود؛ این موضوع باعث ایجاد تماس بین دولایه و ایجاد پیوند می‌شود.^[۱۷-۱۵، ۱۳] این فرایند را می‌توان بر طیف گسترده‌ی از فلزات اعمال کرد، که این مواد می‌توانند از یک جنس یا جنس‌های مختلفی باشند. علاوه بر این فلزاتی را که به وسیله‌ی جوش سنتی نمی‌توان به هم جوش زد، می‌توان با این روش بهم اتصال داد.^[۱۸] این روش را در اوایل ابداع، روشنی امیدبخش برای تولید انبوه ورق و فویل قلمداد می‌کردند.^[۲۳-۲۱]

در سال‌های اخیر، کامپوزیت‌های فلزی چندلایه به سبب خواص مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی مورد توجه قرار گرفته است.^[۱۹] مطالعات انجام گرفته در خصوص کامپوزیت‌های چندلایه حاکی از بهبود خواص چقرمگی شکست، رفتار خستگی، انعطاف‌پذیری، خواص سایشی و ... است.^[۲۰] در میان فلزات مطلوب برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی چندلایه، آلومنیوم به سبب خصوصیات ویژه مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است.^[۲۱] از این تکنولوژی‌های موجود برای تولید آلیازهای 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.^[۲۲] از جمله‌ی این ویژگی‌ها می‌توان به ساده بودن و همچنین قابلیت خودکار کردن

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۲۴ آذر ۱۳۹۶، اصلاحیه ۳۰، پذیرش ۱۰ آذر ۱۳۹۶، پذیرش ۱۶ آذر ۱۳۹۶.

DOI:10.24200/J40.2018.10831.1448

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

استحکام کششی مگاپاسکال	میکروسختی (اویکرزا)	ترکیب شیمیایی (%)	ماده
۹۰,۵	۲۵	Al ۹۹/۱۷, Mg ۰/۰۵, Fe ۰/۴, Cr ۰/۲, Si ۰/۲۵, Mn ۰/۰۵, Zn ۰/۰۵, Ti ۰/۰۳	آلومینیوم ۱۰۵۰
۱۷۹,۵۶	۷۴,۵	Cu ۹۹/۹, Fe ۰/۰۰۶ and other element ware balanced	مس خالص
۱۷۰,۳۵	۶۷,۳	Mg ۹۵/۸, Al ۳, Zn ۱, Mn ۰/۲	منیزیم AZ ۳۱B

نسبت به دیگر سیستم‌های شود که فلز زمینه و تقویت‌کننده‌های آن دارای ساختاری کریستالی یکسانی هستند.^[۲۹] علاوه بر بررسی چهره‌گشتنی شکست، خواص مکانیکی و ریزساختار آلومینیوم/مس/منیزیم تولیدی به روش پیوند سرد نوردی، با استفاده از آزمون‌های مختلف نظری آزمون کشش تکمحوره، آزمون میکروسختی و یکرز 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

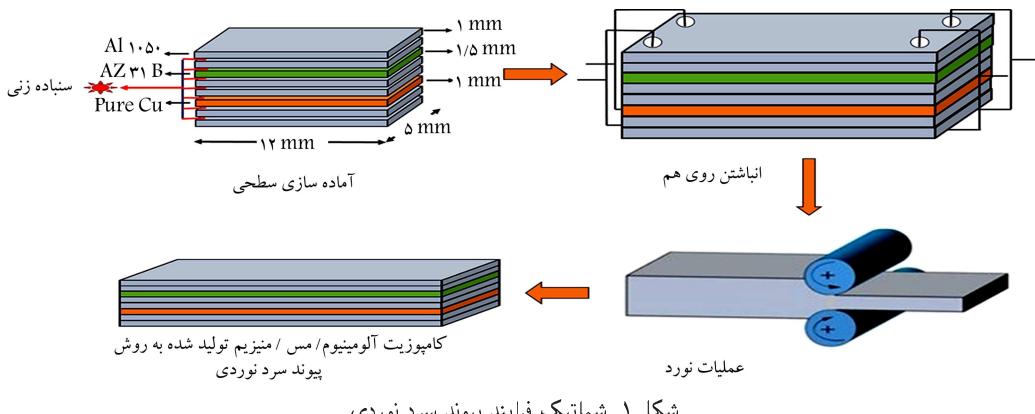
خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی ورق‌های اولیه استفاده شده در این پژوهش (آلومینیوم ۱۰۵۰ و مس خالص با ضخامت ۱ میلی‌متر و منیزیم با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر) در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۱. فرایند پیوند سرد نوردی

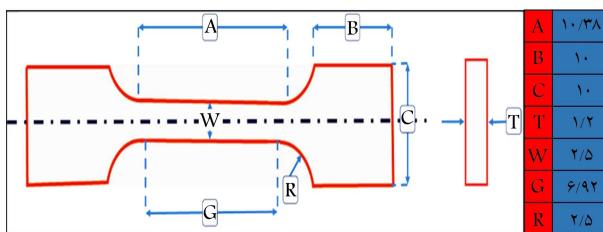
در فرایند پیوند سرد نوردی، دو یا چند ورق، صفحه‌ی با نوار فلزی یا آلیاز با جنس‌های یکسان و غیریکسان روی هم قرار می‌گیرد و سپس با گذراز یک ماشین نورد، کرنش موردنظر اعمال می‌شود تا تغییر شکل مناسبی برای یک اتصال حالت جامد^۱ بین لایه‌های در تماس به دست آید. مطابق شکل ۱، قبل از اعمال نورد، عملیات آماده‌سازی اولیه‌ی سطحی برای لایه‌هایی که در تماس با یکدیگرند انجام می‌شود. عملیات آماده‌سازی به منظور برداشتن هرگونه اکسید و آلودگی سطحی است که می‌تواند شامل شستن با آب و صابون، غوطه‌کردن در استون و برداشتن لایه‌یی 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 (۰/۵٪ 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 (معمولًاً اتصال مکانیکی) در کامپوزیت لایه‌یی از طریق اتصال مکانیکی و اتمی میان دو فلز و لایه‌به دست می‌آید. تاکنون، تحقیقات و نظریه‌های زیادی در

در سال‌های اخیر از فرایند پیوند سرد به طور گسترده برای تولید ورق‌ها و فولی لاشه‌یی بزرگ استفاده می‌شود.^[۱۸] مطالعات بسیاری روی پارامترهای حاکم باند به منظور درک ماهیت پیجیده‌ی سازوکار اتصال انجام شده، و شرایط روند به خوبی تعريف شده است. بر اساس گزارش‌های پیوند سرد نوردی فلزات متأثر از پارامترهای مختلفی مثل کاهش ضخامت در طول نورد،^[۲۶-۲۴۰,۱۹۱] درجه حرارت اتصال،^[۲۵,۱۶] مدت زمان آنیلینگ قبل و بعد از فرایند،^[۲۸-۲۶] سرعت نورد^[۲۰,۰۲۹,۰۲۶,۰۲۵] ضخامت اولیه،^[۲۶,۱۵] جهت نورد،^[۲۶] و حضور ذرات بین ورق^[۲۲,۲۱] است. همچنین از نورد سرد پیوندی در تولید مواد مختلفی نظری آلومینیوم،^[۱۶] فولاد،^[۲۳] مس،^[۲۴] کامپوزیت آلومینیوم/مس،^[۲] آلومینیوم/تیتانیوم،^[۲۵] 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 چهره‌گشتنی شکست تنش صفحه‌یی، 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 متالوژیکی، 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 شکل‌بزیری 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 هواپضا و خودرو با هدف سبک‌سازی در قطعات تولیدی توسعه یافته است. یکی از پارامترهای سیار مهم برای قطعات قابل استفاده در این صنایع چهره‌گشتنی شکست و مقاومت به رشد ترک بالا است. در این تحقیق به منظور بررسی چهره‌گشتنی شکست ورق منیزیمی و کامپوزیت آلومینیوم/مس/منیزیم تولید شده به روش پیوند نوردی، از روش منحنی R استفاده شده است. قبل از استفاده از این روش، چهره‌گشتنی شکست تنش صفحه‌یی ورق‌های لایه‌یی آلومینیوم و کامپوزیت لایه‌یی آلومینیوم/مس تولید شده به روش پیوند سرد نوردی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصله بیان می‌دارد که میزان چهره‌گشتنی در نمونه‌های تولید شده افزایش یافته است.^[۲۳,۷۳] هدف این تحقیق ساخت کامپوزیت لایه‌یی آلومینیوم/مس/منیزیم برای اولین بار و بررسی چهره‌گشتنی 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 نورده.



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

آلومینیوم/مس/منیزیم با روش پیوند سرد نورده به وسیله‌ی آزمون‌های کشش تک محوره و میکروسختی و یک‌زد مورد بررسی تجربی قرار گرفت. پس از آزمون کشش تک محوره، سطح مقطع شکست نمونه‌های اولیه و کامپوزیت فراوری شده به وسیله‌ی میکروسکوب الکترونی روشنی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین ریزساختار کامپوزیت لایه‌ی تولید شده به منظور بررسی ناپایداری پلاستیکی در لایه‌های تقویت‌کننده مس و منیزیم با میکروسکوب نوری مشاهده و مورد بحث قرار گرفت.

برای نمونه‌های اولیه مس خالص، آلومینیوم ۱۰۵۰، منیزیم آلیاری و نمونه کامپوزیتی تولید شده، سه نمونه برای آزمون کشش در جهت نورد (صفحه‌ی طول در عرض) به وسیله‌ی ماشین واپرکات و مطابق با ابعاد شماتیک شکل ۲ و بر اساس استاندارد (جی ای اس^۲) آماده شد. آزمون کشش تک محوره در دمای اتفاق و با نزد کرنش 1×10^{-5} و با استفاده از دستگاه سنتام انجام شد. با استفاده از نتایج آزمون کشش، مقادیر استحکام کششی، افزایش طول نهایی محاسبه و نمودار نشش کرنش برای همه‌ی نمونه‌ها ترسیم شد.

آزمون میکروسختی و یک‌زد برای همه‌ی نمونه‌ها تحت بار یکسان ۲۰۰ کرم و زمان اعمال بار ۱۰ ثانیه در راستای عمود بر جهت نورد (در صفحه ضخامت و طول) اندازه‌گیری شد. میکروسختی و یک‌زد برای هر نمونه به صورت تصادفی در بیش از ۱۰ نقطه‌ی مختلف با استفاده از دستگاه چنیوس 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 جای‌گذاشتن نمونه‌ها از مانع سرد استفاده شد. پس از مانع نمونه‌ها، سطح نمونه‌ها به کمک دستگاه پولیش و با استفاده از سنباده‌های ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ برای میکروسختی و سنباده‌های ۵۰۰۰ تا ۸۰۰ برای بررسی ریزساختار (عکس‌برداری با استفاده از میکروسکوب نوری) پرداخت شد. در نهایت به منظور رفع اکسید لایه‌ی منیزیم، با استفاده از هکل و آلومینیا بدون استفاده از آب، پولیش نهایی قبیل از عکس‌برداری به وسیله‌ی میکروسکوب نوری انجام شد. برای بررسی ریزساختار از میکروسکوب نوری مدل توسن^۸ استفاده شد.

رابطه با سازوکارهای پیوند نورده ارائه شده است. با توجه به روش مورد استفاده و آنالیزهای مختلف - نظری میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روشنی و غیره - برای ایجاد پیوند اتم به اتم بین لایه‌های فلزی، تاکنون چهار نظریه برای توضیح سازوکارهای مرتبط در پیوند نورده پیشنهاد شده است. نظریه‌ی فیلم^۳، نظریه‌ی سد انرژی^۳، نظریه‌ی پیوند نفوذی^۴ و نظریه‌ی تبلور مجدد.^۵ در این میان محققین به خاطر پایین بودن دما در فرایند پیوند سرد نورده، نظریه‌ی فیلم را به عنوان سازوکار اصلی در برقراری پیوند عنوان کرده‌اند. با^۶ بر اساس نظریه‌ی فیلم دو سازوکار پیشنهاد کرد: شکستن لایه‌های سطحی ساخت‌کاری 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 با لایه‌ی اکسیدی تشكیل شده و بیرون آمدن فلز از بین ترک‌ها، نقش اساسی در ایجاد پیوند فلزی دارد.^[۴]

در این تحقیق، به منظور بررسی خواص مکانیکی، ریزساختار، سطح مقطع شکست و چقروگی شکست تنش صفحه‌یی برای کامپوزیت لایه‌یی آلومینیوم/مس/منیزیم تولید شده به روش پیوند سرد نورده، ابتدا نمونه‌های اولیه (شش ورق آلومینیم 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. براین اساس، فرایند پیوند سرد نورده شامل سه مرحله‌ی آماده‌سازی اولیه، روی هم قرار دادن ورق‌های اولیه و اعمال فشاربه 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 نهایی از حمام استون استفاده می‌شود. سپس لایه‌های در تماس با یکدیگر توسط برس سیمی خورشیدی از جنس فولادکه به انتهای مته‌های ستونی بسته شده‌اند خشن‌کاری و زبر می‌شوند.^[۴] 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 سرخوردن 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 کم تر از ۱۵۰ ثانیه باشد.^[۴]

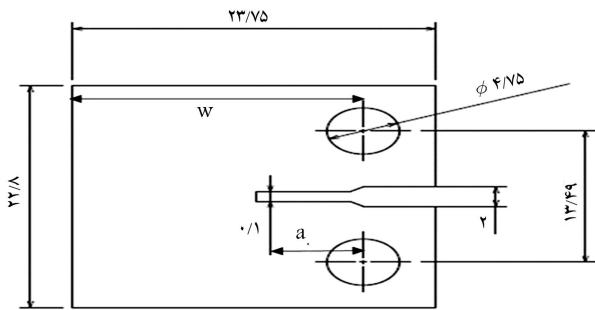
۳.۲ بررسی ریزساختار، خواص مکانیکی و سطح مقطع شکست

در این پژوهش خواص مکانیکی نمونه‌های اولیه و کامپوزیت لایه‌یی تولید شده‌ی



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

استفاده شده باید صلب و به گونه‌یی 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 ۳. نقشه و ابعاد نمونه‌های کششی فشرده.



شکل ۴. نمونه‌های کششی فشرده قبل از آزمون شکست.

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 وگاتسکان^۹ مورد بررسی قرار گرفت.

۲. آزمون چقرمگی شکست تنش صفحه‌یی

در این تحقیق به منظور محاسبه و نیز مقایسه 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، منیزیم آلیزی AZ ۳۱ B و مس خالص تجاری) از روش منحنی R استفاده شد. به منظور تکرار پذیری آزمایش و بررسی دقیق تر نمونه‌های کششی فشرده^{۱۰} 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 واپرکات 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^{۱۱} $22,8 \times 23,75 \times 1,5$ میلی‌متر است که دارای یک شیار نازک با عرض ۱ و طول حدود ۸ میلی‌متر است که این شیار نیز به وسیله‌ی ماشین واپرکات ایجاد شده است. همچنین این شیار به یک ناج V شکل با زاویه‌ی ۶۰ درجه حتم شده است. درجه حتم شده اندازه‌ی ۱ میلی‌متر و عرض ۰,۲۵ میلی‌متر گسترش می‌یابد. این شیار با استفاده از ماشین واپرکات با قطر سیم $\frac{a}{w} = ۰,۲$ میلی‌متر ایجاد شد. این روش ایجاد و گسترش ترک اولین بار توسط موراد^{۱۲} و پس از آن توسط دیگر محققین^{۱۳} 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 $\frac{a}{w} = ۰,۲$ 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 نورده.

ماده	میکروسختی قبل از فرایند	میکروسختی بعد از فرایند
پیوند نورده (ویکرزا)	پیوند نورده (اویکرزا)	
۵۹	۲۵	۱۰۵ °
۱۳۶	۷۴	مس خالص
۹۴,۶	۶۷,۳	AZ ۳۱ B
		منیزیم

از علل اصلی افزایش میکروسختی برای لایه‌های مختلف، می‌توان به کارسرد، اعمال کرنش زیاد و افزایش چگالی نابهجه اشاره کرد که در کارهای مشابه قبلی نیز ذکر شده‌اند و از عوامل موثر در افزایش سختی بوده‌اند.^[۴۶] همچنین با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲ علاوه بر افزایش میکروسختی برای همه‌ی اینها مشاهده می‌شود که در صد افزایش میکروسختی برای لایه‌ی آلمینیومی بیشتر است به طوری که این افزایش به ترتیب برای آلمینیوم ۱۳۶٪ / برای مس ۸۴٪ / و برای منیزیم ۴۱٪ است. دلیل این اختلاف در افزایش میکروسختی برای نمونه‌های آلمینیوم، مس و منیزیم را می‌توان اختلاف در اندازی حاصل در اینجا از میکروسکوپ ورق‌های اولیه دانست.

۲.۳. چقرومگی شکست تنش صفحه‌یی

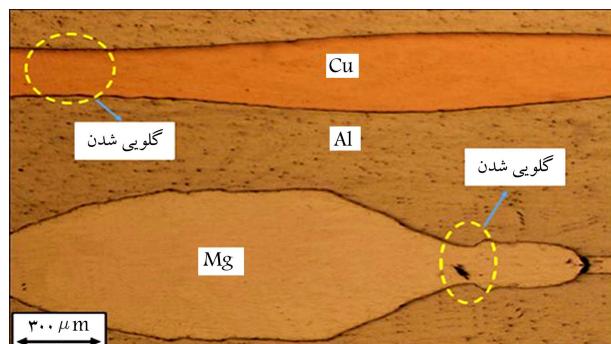
در این پژوهش به منظور محاسبه چقرومگی شکست تنش صفحه‌یی مطابق با استاندارد E56۱ از منحنی R استفاده شد. در این روش و پس از انجام آزمایش چقرومگی شکست تنش صفحه‌یی، باید طول ترک به صورت پیوسته و در نیروهای مختلف اندازه‌گیری شود. این مرحله، مهم‌ترین بخش در محاسبه‌ی دقیق مقدار چقرومگی شکست تنش صفحه‌یی در روش استفاده از منحنی R است. به همین منظور طبق استاندارد E64۷ دو روش بصری برای اندازه‌گیری طول ترک در حین انجام پیشنهاد شده است که می‌بینی بر استفاده از اختلاف پتانسیل الکتریکی است. در این پژوهش، اندازه‌گیری رشد ترک به صورت بصری و با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل سلسیوزن 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 انتشار تنش اعماق شده^[۱۲] بر حسب تغییرات طول ترک در سه سطح مختلف از نیروهای ثابت نیز به وسیله‌ی خطچین ترسیم می‌شود. در این روش، مقدار چقرومگی شکست تنش صفحه‌یی از محل تماش دو نمودار مقاومت به رشد ترک و فاکتور شدت تنش اعماق 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 تماش بین منحنی‌های ضریب مقاومت به رشد ترک و شدت تنش اعمال شده، چقرومگی شکست یا ضریب شدت تنش بحرانی برای نمونه‌ی مورد نظر است.

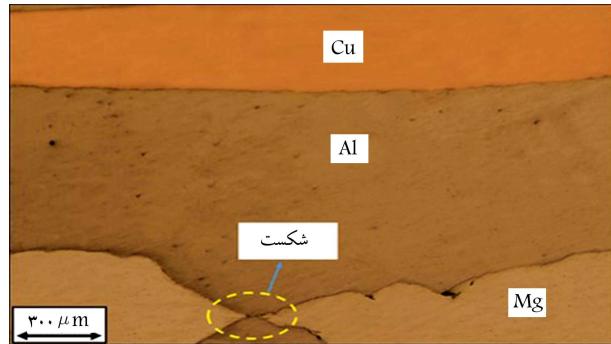
$$k_{ri} = \frac{p_i}{b\sqrt{w}} \times f_i\left(\frac{a}{w}\right) \quad (1)$$

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

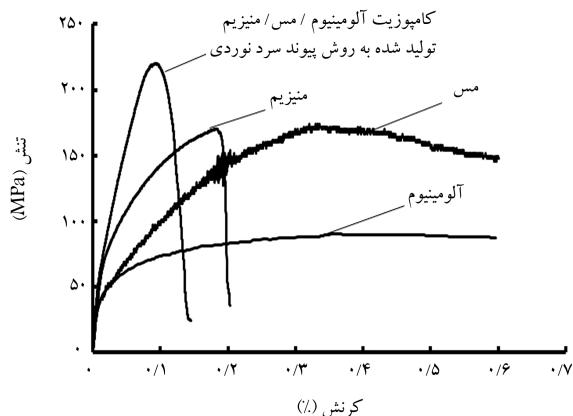
رابطه‌ی ۲ برای $\frac{a}{w} \geq 0.35$ صادق است.



شکل ۶. ریزاساختار کامپوزیت آلمینیوم/مس/منیزیم فراوری شده با استفاده از پیوند سرد نورده.



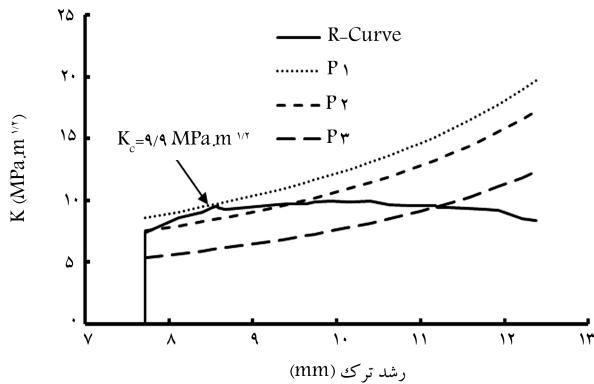
شکل ۷. ریزاساختار کامپوزیت آلمینیوم/مس/منیزیم فراوری شده با استفاده از پیوند سرد نورده.



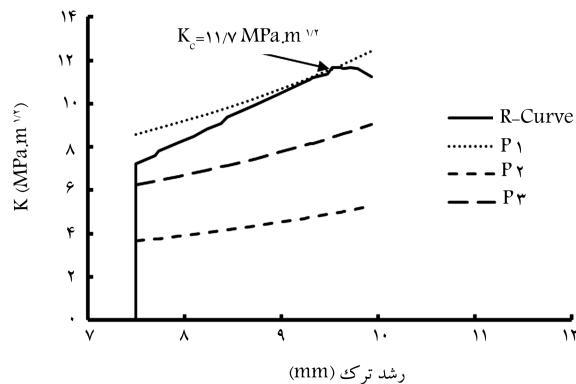
شکل ۸. نمودار تنش - کرنش ورق‌های اولیه و کامپوزیت لایه‌یی فراوری شده آلمینیوم/مس/منیزیم با استفاده از پیوند سرد نورده.

به منظور بررسی خواص مکانیکی، علاوه بر آزمون کشش تک محوره، آزمون میکروسختی نیز برای هر کدام از لایه‌های آلمینیوم، مس و منیزیم موجود در کامپوزیت لایه‌یی آلمینیوم - مس - منیزیم تولید شده با روش پیوند سرد نورده به صورت مجزا انجام شده و با مقادیر اولیه میکروسختی برای هر نمونه مقایسه شد. نتایج میکروسختی ویکرزا برای هر نمونه قبیل و بعد از فرایند پیوند سرد نورده در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج حاصل از آزمون میکروسختی ویکرزا نشان می‌دهد که مقدار میکروسختی برای هر سه لایه با شیب زیاد افزایش یافته است و به ترتیب قبیل و بعد از فرایند پیوند نورده، برای لایه‌ی ایه‌ای آلمینیوم از ۲۵ به ۵۹، لایه‌ی مس از ۷۴ به ۹۴,۶٪ منیزیم از ۳۵ به ۶۷,۳٪ می‌رسد.

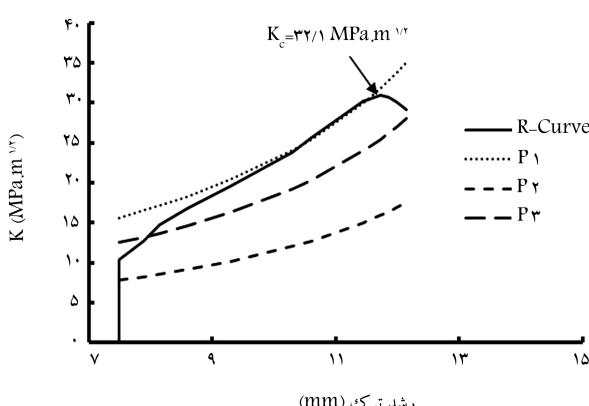
معادلات ۱ و ۲ محاسبه شد. منحنی R برای نمونه های اولیه ای آلومینیوم ۱۰۵۰، مس خالص تجاری و کامپوزیت لایه بی آلمینیوم / مس / منزیم تولید شده با استفاده از روش پیوند سرد نوری در شکل های ۱۱ تا ۱۳ ارائه شده است. خطوط ممتدا منحنی R و نمودارهای خط چین، ضریب شدت تنش اعمال شده در نیروهای مختلف و ثابت است و مقدار چرمگی شکست برای هر نمونه از تماس بین منحنی R و شدت تنش اعمال شده در نیروی ثابت به دست می آید. مطابق با این سه شکل، به بیان دیگر، نقاط تماس بین منحنی های R و خطوط نقطه چین، ضرایب شدت تنش بحرانی در طول ترک مورد نظر است. این بدان معناست که در لحظه بی



شکل ۱۱. منحنی R برای آلومینیوم ۱۰۵۰.



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

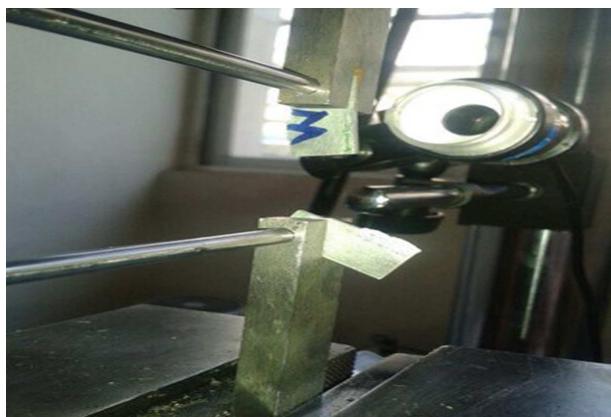


شکل ۱۳. نمودار نیرو - جایه جایی برای آلومینیوم / مس / منزیم تولید شده به روش پیوند سرد نوری.

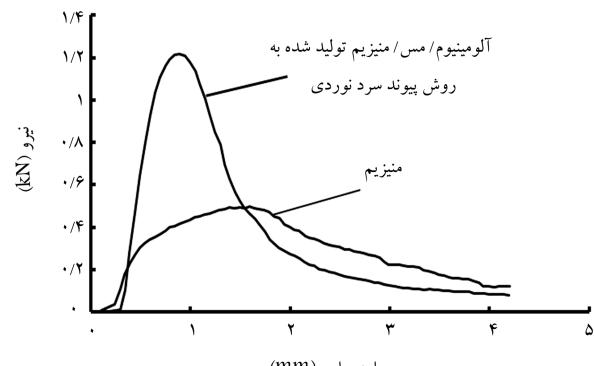
در شکل ۹ نمونه های تغییر شکل یافته های منزیم اولیه پس از آزمون چرمگی شکست تنش صفحه بی، قید و بند و میکروسکوپ نوری ارائه شده است. همچنین در این شکل مشخص است که رشد ترک برای ورق منزیم آلیاژی در یک مسیر مستقیم و در راستای همان ترک اولیه است.

در شکل ۱۰ نمودار نیرو - جایه جایی برای نمونه های منزیم آلیاژی و کامپوزیت لایه بی آلمینیوم / مس / آلمینیوم، تولید شده به روش پیوند سرد نوری ارائه شده است. جایه جایی نمودار، جایه جایی دهانه 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 می یابد و این افزایش برای نمونه های کامپوزیتی به صورت خطی است. این مقدار نیرو در شکل ۱۰ بیان گر مقاومت به گسترش ترک است که در ماده های کامپوزیتی و چند لایه ای تولید شده به مراتب بیشتر از نمونه های منزیم اولیه است. قابل ذکر است که آلیاژ منزیم اولیه دارای استحکام و ضخامت بیشتر نسبت به نمونه های اولیه آلمینیوم ۱۰۵۰ و مس خالص است. مقدار نیروی بیشینه با استفاده از شکل ۱۰ به دست می آید. 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 نمونه های کامپوزیتی که استحکام بالاتری دارد، به مراتب بیشتر است. این مقدار نیرو در حالت بیشینه برای کامپوزیت آلمینیوم / مس / منزیم و نمونه های اولیه آلمینیوم، مس و منزیم در جدول ۲ ارائه شده است.

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



شکل ۹. نمونه های کششی فشرده بعد از آزمون شکست.



شکل ۱۰. نمودار نیرو - جایه جایی در آزمون شکست برای نمونه های اولیه منزیم و کامپوزیت لایه بی تولید شده به روش پیوند سرد نوری.

جدول ۳. نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی و شکست.

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

شکست نمونه‌ی کامپوزیتی آلومینیوم ۵۰۵۲/مس تولید شده به روش پیوند نوری و کار حاضر می‌توان به تأثیر وجود منیزیم اشاره کرد. مقدار چقرومگی شکست کامپوزیت آلومینیوم ۵۰۵۲/مس تولید شده به روش پیوند نوری با کاهش ضخامت ۵۰٪، ماده بیشتر می‌شود که میان رشد ناپایدار ترک است. بر اساس جدول ۳ که در آن نتایج حاصل از محاسبه‌ی چقرومگی شکست تنش صفحه‌ی نیز مشخص است مقادیر چقرومگی شکست برای نمونه‌های اولیه‌ی آلومینیوم، مس و منیزیم به ترتیب ۹,۹، ۱۴,۶ و ۱۱,۷ است. با توجه به شکل پذیری پایین منیزیم، انتظار می‌رفت

که مقدار چقرومگی شکست برای نمونه‌ی منیزیم پایین تراز آلومینیوم باشد که نتایج نشان دهنده‌ی عکس این پیش‌بینی بوده، و چقرومگی 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 چقرومگی شکست مس ۱/۲۵ برابر نمونه‌ی منیزیم و ۱/۴۸ برابر آلومینیوم است، در حالی که مس در مقایسه‌ی با منیزیم دارای استحکام تقریباً برابر شکل پذیری بالاتر نسبت به آلومینیوم دارای شکل پذیری برابر است. شکل پذیری بالاتر مس در مقایسه با منیزیم ۱/۸۷ برابراً باعث چقرومگی شکست بالاتر ۱/۲۵ برابر شده است. همچنین استحکام بالاتر مس

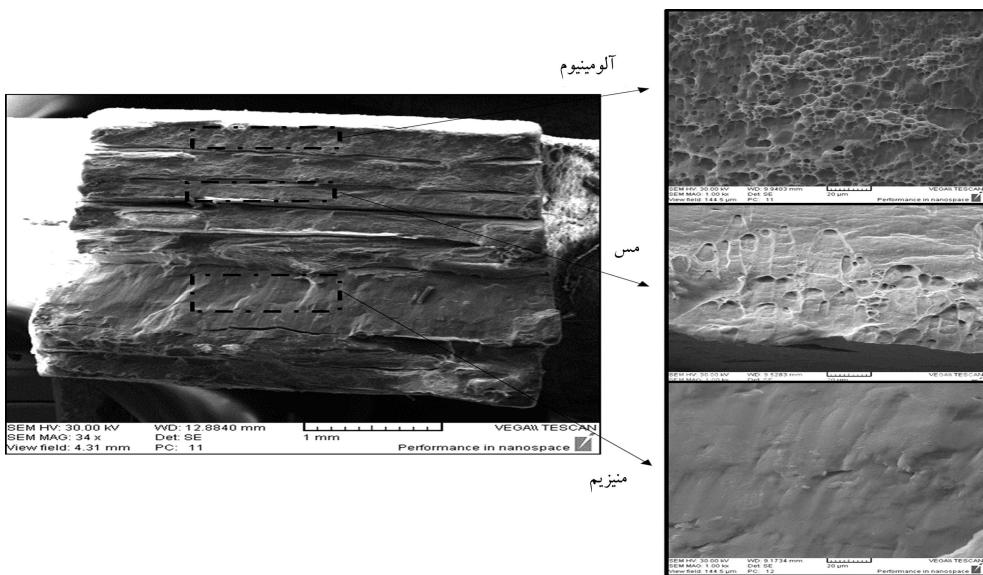
در سطح ضربی شدت تنش در قطعه، برابر میزان مقاومت شکست ماده می‌شود، رشد ترک به صورت ناپایدار آغاز می‌شود. همچنین مطابق شکل‌های ۱۱ تا ۱۳، در یک جزء افزایش بعد از نقطه‌ی تناس، ضربی شدت تنش اعمال شده از مقاومت ماده بیشتر می‌شود که میان رشد ناپایدار ترک است. بر اساس جدول ۳ که در آن

نتایج حاصل از محاسبه‌ی چقرومگی شکست تنش صفحه‌ی نیز مشخص است مقادیر چقرومگی شکست برای نمونه‌های اولیه‌ی آلومینیوم، مس و منیزیم به ترتیب ۹,۹، ۱۴,۶ و ۱۱,۷ است. با توجه به شکل پذیری پایین منیزیم، انتظار می‌رفت که مقدار چقرومگی شکست برای نمونه‌ی منیزیم پایین تراز آلومینیوم باشد که نتایج نشان دهنده‌ی عکس این پیش‌بینی بوده، و چقرومگی 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 چقرومگی شکست مس ۱/۲۵ برابر نمونه‌ی منیزیم و ۱/۴۸ برابر آلومینیوم است، در حالی که مس در مقایسه‌ی با منیزیم دارای استحکام تقریباً برابر شکل پذیری بالاتر نسبت به آلومینیوم دارای شکل پذیری برابر است. شکل پذیری بالاتر مس در مقایسه با منیزیم ۱/۸۷ برابراً باعث چقرومگی شکست بالاتر ۱/۲۵ برابر شده است. همچنین استحکام بالاتر مس در مقایسه با آلومینیوم ۱/۹۶ برابراً باعث چقرومگی شکست بهتر ۱/۴۸ شده است. بنابراین پارامتر چقرومگی شکست متاثر از دو پارامتر چقرومگی و استحکام است و داشتن فقط یک پارامتر باعث افزایش چقرومگی نمی‌شود؛ نتایج تجربی این تحقیق به صراحت مؤید این مسئله است. مقدار چقرومگی شکست تنش صفحه‌ی نیز برای نمونه‌ی کامپوزیت چندلایه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم، تولید شده به روش پیوند سرد نوردی ۱/۲ است که بیان‌گر بهبود چشمگیر مقدار چقرومگی شکست تنش صفحه‌ی برای نمونه‌ی کامپوزیت چندلایه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم، تولید شده به روش پیوند سرد نوردی ۱/۲۱ مگاپاسکال متر ۱/۲ است که بیان‌گر بهبود چشمگیر مقدار چقرومگی شکست تنش صفحه‌ی برای نمونه‌ی کامپوزیت چندلایه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم، تولید شده به روش پیوند سرد نوردی ۱/۲۲/۱ مگاپاسکال متر ۱/۲ است که بیان‌گر بهبود چشمگیر مقدار چقرومگی شکست تنش صفحه‌ی برای نمونه‌ی کامپوزیت چندلایه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم به ترتیب ۲/۲۳ و ۲/۲۴ برابر بهبود یافته است. دلیل اصلی افزایش قابل توجه در نمونه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم تولید شده به روش پیوند سرد نورد، استحکام بالا و چقرومگی مطلوب در پایان فرایند است. چنان‌که پیش تر نیز اشاره شد، پارامتر چقرومگی شکست برای نمونه‌هایی با هندسه‌ی مشابه تحت تأثیر دو عامل مهم استحکام و چقرومگی (شکل پذیری) است. اعمال کاربرد و کرنش بالا در فرایند پیوند سرد نوردی باعث افزایش میزان چگالی نابهجهای و متعاقباً افزایش در استحکام و سختی می‌شود. البته مقدار ازدیاد طول کاهش می‌باید که این کاهش قابل پیش‌بینی است. میزان شکل پذیری 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 عملت آن استفاده از فلزات آلومینیوم و مس با چقرومگی بسیار بالا و ایجاد پیوند مناسب است. همچنین وجود منیزیم با قدرت جذب انرژی بالا از دلایل دیگر برای افزایش چقرومگی شکست کامپوزیت تولید شده با روش جوش نوردی است. از مقایسه‌ی نتایج مقاله‌ی بررسی چقرومگی

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 نک‌محوره در شکل ۱۴ ازه شده است. بر 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 لایه‌یی تقویت‌کننده منیزیم آلیازی به صورت شکست ترد مشاهده می‌شود. سازوکار غالباً شکست در فلزاتی که دارای ساختار کریستالی مکعبی با وجود مرکزدار هستند، تشکیل حفره و سپس شکست نرم است. شکست نرم در بیشتر فلزات با ساختار کریستالی مکعبی با وجود مرکزدار به صورت دیپلهای هم محور یا نیمکره ظاهر می‌شود. این نوع شکست با تشکیل میکرو حفرات، پوستگی، انتشار ترک یا شکست برشی در زاویه‌یی نسبتی در راستای جهت کشش رخ می‌دهد. ریز حفرات در نواحی مانند آشغال‌ها، مرزدانه‌ها، نواحی تجمع نایه‌جایی‌ها و نواحی دارای نایپوستگی کرنش جوانه‌زنی می‌کنند. اکثر آلیازهای ساختمانی هنگامی که تحت اعمال بار قرار می‌گیرند به سبب پیوستگی حفرات دچار شکست می‌شوند. همچنین این سازوکار شکست در نمونه‌های آلومینیوم و مس نیز مشاهده می‌شود. همچنین شکست نرم می‌تواند در مواد با چگالی نابهجهای پایین رخ می‌دهد که معمولاً سطح مقطع شکست در آن‌ها با حفرات عمیق ریشه‌دار و به صورت نیمه‌کروی مشاهده می‌شود. البته در فلزات با چقرومگی بالا اندازه ترک‌ها و حفرات بسیار بزرگ‌تر است و این حفرات با بزرگ شدن موجب شکست می‌شوند، البته در سایر مواد 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 ضربی 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 تناس، ضربی شدت تنش اعمال شده از مقاومت ماده بیشتر می‌شود که میان رشد ناپایدار ترک است. بر اساس جدول ۳ که در آن نتایج حاصل از محاسبه‌ی چقرومگی شکست تنش صفحه‌ی نیز مشخص است مقادیر چقرومگی شکست برای نمونه‌های اولیه‌ی آلومینیوم، مس و منیزیم به ترتیب ۹,۹، ۱۴,۶ و ۱۱,۷ است. با توجه به شکل پذیری پایین منیزیم، انتظار می‌رفت که مقدار چقرومگی شکست برای نمونه‌ی منیزیم پایین تراز آلومینیوم باشد که نتایج نشان دهنده‌ی عکس این پیش‌بینی بوده، و چقرومگی 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 چقرومگی شکست مس ۱/۲۵ برابر نمونه‌ی منیزیم و ۱/۴۸ برابر آلومینیوم است، در حالی که مس در مقایسه‌ی با منیزیم دارای استحکام تقریباً برابر شکل پذیری بالاتر نسبت به آلومینیوم دارای شکل پذیری برابر است. شکل پذیری بالاتر مس در مقایسه با منیزیم ۱/۸۷ برابراً باعث چقرومگی شکست بالاتر ۱/۲۵ برابر شده است. همچنین استحکام بالاتر مس در مقایسه با آلومینیوم ۱/۹۶ برابراً باعث چقرومگی شکست بهتر ۱/۴۸ شده است. بنابراین پارامتر چقرومگی شکست متاثر از دو پارامتر چقرومگی و استحکام است و داشتن فقط یک پارامتر باعث افزایش چقرومگی نمی‌شود؛ نتایج تجربی این تحقیق به صراحت مؤید این مسئله است. مقدار چقرومگی شکست تنش صفحه‌ی نیز برای نمونه‌ی کامپوزیت چندلایه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم، تولید شده به روش پیوند سرد نوردی ۱/۲ است که بیان‌گر بهبود چشمگیر مقدار چقرومگی شکست تنش صفحه‌ی برای نمونه‌ی کامپوزیت چندلایه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم، تولید شده به روش پیوند سرد نوردی ۱/۲۱ مگاپاسکال متر ۱/۲ است که بیان‌گر بهبود چشمگیر مقدار چقرومگی شکست تنش صفحه‌ی برای نمونه‌ی کامپوزیت چندلایه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم به ترتیب ۲/۲۳ و ۲/۲۴ برابر بهبود یافته است. دلیل اصلی افزایش قابل توجه در نمونه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم تولید شده به روش پیوند سرد نورد، استحکام بالا و چقرومگی مطلوب در پایان فرایند است. چنان‌که پیش تر نیز اشاره شد، پارامتر چقرومگی شکست برای نمونه‌هایی با هندسه‌ی مشابه تحت تأثیر دو عامل مهم استحکام و چقرومگی (شکل پذیری) است. اعمال کاربرد و کرنش بالا در فرایند پیوند سرد نوردی باعث افزایش میزان چگالی نابهجهای و متعاقباً افزایش در استحکام و سختی می‌شود. البته مقدار ازدیاد طول کاهش می‌باید که این کاهش قابل پیش‌بینی است. میزان شکل پذیری 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 عملت آن استفاده از فلزات آلومینیوم و مس با چقرومگی بسیار بالا و ایجاد پیوند مناسب است. همچنین وجود منیزیم با قدرت جذب انرژی بالا از دلایل دیگر برای افزایش چقرومگی شکست کامپوزیت تولید شده با روش جوش نوردی است. از مقایسه‌ی نتایج مقاله‌ی بررسی چقرومگی



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

برای کامپوزیت آلومنیوم/مس/منیزیم تولید شده نسبت به نمونه‌های اولیه آلومنیوم، مس و منیزیم به ترتیب ۱۴٪، ۲۳٪ و ۲۹٪ افزایش یافت. همچنین مقادیر میکروسختی برای لایه‌های آلومنیوم، مس و منیزیم بعد از فرایند نسبت به قبل از پیوند سرد نوردی به ترتیب ۳۶٪، ۸۴٪ و ۴۱٪ افزایش یافت.

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

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

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

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

۴. نتیجه‌گیری

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

۱. کامپوزیت لایه‌یی آلومنیوم/مس/منیزیم با استفاده از فرایند پیوند سرد نوردی با اعمال کاهش ضخامت ۶۰٪ با موفقیت تولید شد. همچنین تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مناسب بین لایه‌های آلومنیوم/مس و آلومنیوم/منیزیم برقرار است.

۲. خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده به مرتب بهتر از مواد اولیه استفاده شده بوده، به طوری که مقادیر استحکام کششی نهایی و میکروسختی ویکرز به صورت قابل توجه افزایش یافت. مقدار استحکام کششی ۲۰٪ مگاپاسکال حاصل شد که البته مقدار از دیاد طول کاهش یافت. مقدار استحکام کششی

پانوشت‌ها

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. kappiled

منابع (References)

1. Alizadeh, M. and Samiei, M. "Fabrication of nanosstructured 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-Al 2 O 3 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. Yahirō, 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. "Experimentls 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. Shaarba, 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).