

## ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی با استفاده از فرآیند جوشکاری انفجاری

مریم رودباری<sup>۱</sup>، نیما رفاهتی<sup>۲\*</sup>، علی مهدی پور عمرانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دماوند

۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

\*Email: [nimarefahati@yahoo.com](mailto:nimarefahati@yahoo.com)

(تاریخ وصول: ۹۹/۰۱/۲۴، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۵/۱۵)

### چکیده

استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی امروزه رو به افزایش بوده و با توسعه فناوری‌های نوین، نیاز به مواد مهندسی جدید و خواص مکانیکی منحصر به فرد بیش از پیش احساس می‌شود. در این راستا با توجه به چگالی پایین فلز آلومینیوم، تحقیقات در زمینه کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی از سهم بیشتری برخوردار است. چرا که با افزایش محدود استحکام این فلز می‌توان نسبت استحکام به وزن این ماده مهندسی را افزایش داده و کارایی آن را بیش از پیش نمود. با انتخاب مواد تقویت کننده مختلف و انواع آن‌ها به لحاظ ساختاری روش‌های ساخت کامپوزیت زمینه فلزی می‌تواند متفاوت باشد. کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی به روش‌های مختلفی تولید می‌شوند. یکی از روش‌های نوین مورد استفاده در تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی روش جوشکاری انفجاری می‌باشد این مقاله مروری اجمالی در مورد ساخت کامپوزیت زمینه فلزی به روش جوشکاری انفجاری ارائه داده است.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری انفجاری، کامپوزیت زمینه فلزی، تقویت کننده، آلومینیوم.

## Manufacturing Metal Based Composites by Explosive Welding Process

M. Roudbari, N. Refahati\*, A. Mehdipour Omrani

Islamic Azad University Damavand Branch

(Received: 12/04/2020, Accepted: 08/05/2020)

### Abstract

Metal-based composites are currently increased and by growing modern technology, there is more require to the new engineering materials and unique mechanical features. Considering the low density of Aluminum there is more portion for researches about Al-based composites because by increasing its limited strength, the ratio of strength to weight increases the engineering and its productivity. By choosing different reinforced materials and different kinds of them based on their structure the metal-based composites construction methods can be different. Aluminum-based composites are produced in different ways. Explosive welding method is one of the modern methods that are used in Al-based composites production. This article includes a brief review to construct metal-based composites by explosive welding method.

**Keywords:** Explosive Welding, Metal Base Composite, Reinforced, Aluminum.

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی از سال ۱۹۲۰ مورد مطالعه وسیع قرار گرفتند و به خاطر چگالی کم، چقرمگی و مقاومت به خوردگی مناسب در شرایط محیط، افزایش استحکام، کار در دماهای بالاتر، بهبود مقاومت به سایش، مدول الاستیک قابل قبول، ضریب انبساط حرارتی کنترل شده و بهبود خواص خستگی خیلی مطلوب می‌باشند. در دهه‌های اخیر تعدادی مقاله مروری درباره ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی منتشر شده است که در این مقاله به بررسی تعدادی از این مقالات پرداخته شده است.

در این مقاله روش‌های تولید کامپوزیت زمینه فلزی را به دو دسته روش‌های جوشکاری انفجاری و روش‌های معمول سنتی تقسیم بندی شده است که در ادامه به شرح آن‌ها پرداخته شده است.

## ۲- مروری بر سابقه تحقیقات انجام شده در حوزه

### کامپوزیت زمینه آلومینیومی

لیوید و همکاران [۴]، بر روی کامپوزیت زمینه فلزی آلومینیوم که با ذرات منیزیم تقویت شده است، تحقیق انجام داده‌اند. نتایج نشان داد که با تغییر در توزیع تقویت کننده، خصوصیات مکانیکی را می‌توان بهبود بخشند.

تن و همکاران [۵]، تحقیقاتی را به روش حل تحلیلی و تجربی بر روی تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی که با ذرات SiC تقویت شده و با روش متالوژی پودر تولید شده‌اند، انجام داده‌اند. نتایج نشان داد که با این روش می‌توان خواص مکانیکی و فیزیکی را بهبود بخشید.

هاشیم و همکاران [۶]، بررسی‌هایی را بر روی فن ریخته‌گری تلاطمی برای تولید کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی که با ذرات سیلیکون کاربرد تقویت شده‌اند، انجام داده‌اند. نتایج نشان داد که روش ریخته‌گری نسبتاً کم هزینه است برای تولید کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی که با ذرات سیلیکون کاربرد تقویت شده‌اند.

ژانگ و همکاران [۷]، در مطالعات خود به جستجوی تحقیقاتی بر روی کامپوزیت زمینه فلزی تولید شده به روش اتصال دیفیوژنی بر روی آلومینیوم که به وسیله ذرات SiC تقویت شده است، پرداخته‌اند. برای بررسی خواص مکانیکی از آزمون برش و متالوگرافی استفاده شده است در شکل (۱) تصویر ریزساختار کامپوزیت تولید شده مشاهده می‌شود. نتایج تجربی نشان داده است که استحکام اتصالات با افزایش درصد حجم SiC کاهش یافته است.

کاکرمر و همکاران [۸]، به بررسی روش‌های تولید و خواص مواد کامپوزیت ماتریس فلزی تقویت شده با ذرات پراکندگی، پلاکت‌ها، فیبرهای غیر پیوسته (کوتاه) و پیوسته (طولانی) پرداخته است.

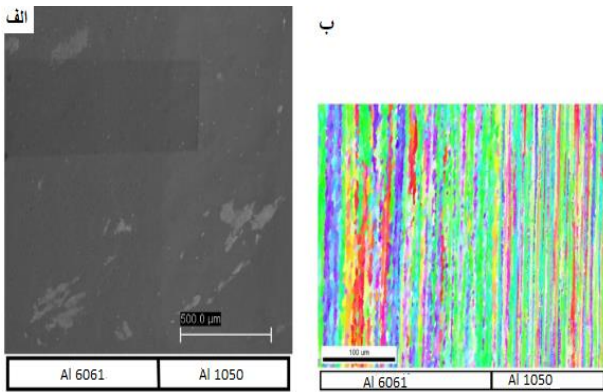
تورالبا و همکاران [۷]، بر روی کامپوزیت پایه آلومینیومی به روش متالوژی پودر که آلومینا (اکسید آلومینیوم) با ذرات SiC تقویت شده‌اند، تحقیق و بررسی انجام داده‌اند.

امروزه استفاده از مواد مهندسی پیشرفته در بسیاری از صنایع برای بهبود کارکرد و کاهش هزینه‌های مستقیم و غیر مستقیم تولید به شدت مورد توجه است. کامپوزیت‌ها، مواد مهندسی پیشرفته هستند که در آن‌ها از ترکیب دو یا چند نوع ماده ساده برای رسیدن به خواص مکانیکی و فیزیکی بهتر بهره گرفته شده است [۱]. به بیان دیگر کامپوزیت ماده‌ای است که از دو یا چند ماده سازنده ساخته شده باشد و خواص بهتری را نسبت به هر کدام از اجزای خود ارائه دهد. کامپوزیت‌ها از لحاظ اجزاء به کامپوزیت‌های با زمینه سرامیکی، پلیمری و فلزی تقسیم بندی می‌شوند. کامپوزیت زمینه فلزی از یک فاز پیوسته به نام فاز زمینه و یک فاز پخش شده که فاز دوم یا فاز تقویت کننده نامیده می‌شود، تشکیل شده است [۲].

در سالیان گذشته، طراحی مواد با تأکید بر وزن سبک، سازگاری با محیط زیست، هزینه کم، کیفیت و قابلیت کارایی تغییر کرده است. به این ترتیب کامپوزیت‌های زمینه فلزی مورد توجه قرار گرفته و به‌طور روز افزونی در حال توسعه می‌باشند. این نوع کامپوزیت‌ها در صنایع مهمی از جمله صنایع نظامی، صنایع هوایی، حمل و نقل، خطوط انتقال قدرت و غیره مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱]. از مهم‌ترین و ارزانتین کامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌توان به کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی اشاره کرد که به دلیل مزایایی از قبیل چگالی پایین، استحکام ویژه بالا و مقاومت به خوردگی و خستگی مناسب، امروزه در صنایع گوناگون دارای کاربردهای فراوانی می‌باشند.

مهم‌ترین مزیت مواد کامپوزیتی آن است که با توجه به نیازها، می‌توان خواص آن‌ها را کنترل نمود. به‌طور کلی مواد کامپوزیتی دارای مزایای مقاومت مکانیکی بالا نسبت به وزن، مقاومت بالا در برابر خوردگی، خصوصیات خستگی عالی نسبت به فلزات، خواص عایق حرارتی خوب، استحکام بالا، نسبت حجم به وزن کم، هزینه کمتر و صرفه‌جویی اقتصادی ... هستند [۳].

کامپوزیت‌های زمینه فلزی دارای کاربردهای متنوعی در صنایع می‌باشند. روش‌های گوناگونی برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی وجود دارند. روش مورد استفاده بسته به خواص مورد نظر و شرایط تولید و مواد اولیه تعیین می‌گردد. با توجه به توسعه روش‌های گوناگون در ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی ضرورت و لزوم انجام تحقیقات و مطالعات کاربردی بر روی شیوه‌های گوناگون و جنبه‌های متنوع فرآیند ساخت و بررسی خواص کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی با انواع تقویت کننده‌ها به خوبی احساس می‌شود. فناوری‌های متعددی نظیر اختلاط در حالت مایع، آلیاژسازی مکانیکی و غیره برای تولید این کامپوزیت‌ها وجود دارد یکی از روش‌های نوین در تولید کامپوزیت‌های چند لایه، روش پوشش دهی با جوشکاری انفجاری می‌باشد.



شکل ۳- الف) یک میکروگراف از SEM که نشان دهنده محل اسکن EBSD (ب) مورفولوژی دانه به دست آمده از تجزیه و تحلیل EBSD

راویکومار و همکاران [۱۱]، به بررسی خواص مکانیکی ترکیبات آلیاژ آلومینا ۶۰۸۲ تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن پرداخته‌اند. برای ساخت کامپوزیت زمینه آلومینیومی از فرآیند ریخته‌گری مخلوط استفاده نموده است. نمونه‌های کامپوزیت‌های تولید شده با تغییر کاربید تنگستن در ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰٪ وزن در نظر گرفته شده است. این کامپوزیت‌ها تحت آزمایش سختی و کشش قرار گرفته‌اند. در شکل (۴) تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه کامپوزیت تولید شده با ۸ در صد از کاربید تنگستن نشان داده شده است.

در شکل (۵) نتایج SEM از ریزساختار در آزمون کشش نشان داده شده است.

نیتو و همکاران [۱۲]، تحقیق و بررسی به روش آلیاژسازی مکانیکی برودتی بر روی کامپوزیت پایه آلومینیومی تقویت شده با ذرات نانو سرامیکی انجام داده‌اند. در این پژوهش اثر ذرات  $B_4C$  در رفتار سایش کامپوزیت  $AL-B_4C$  مورد بررسی قرار گرفته است. از EDS برای تجزیه و تحلیل ساختاری یا خصوصیات شیمیایی کامپوزیت مورد نظر استفاده شده است، همچنین از آزمون سختی سنجی و میکروسکوپ SEM در این پژوهش استفاده شده است. نتایج نشان داد که با کاهش سایز ذرات  $B_4C$  سختی افزایش پیدا می‌کند.

ژانگ و همکاران [۱۳]، کامپوزیت پایه آلومینیومی را به یک روش جدید ریخته‌گری به نام FSC تولید نموده‌اند که در این نوع کامپوزیت از تقویت کننده ذرات سیلیکون با حجم بالا استفاده شده است. مراحل روش FSC در شکل (۶) نشان داده شده است.

در این پژوهش ریزساختار از طریق میکروسکوپ SEM، EDS مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت از آزمون سختی سنجی استفاده شده است.

در شکل (۷) ریزساختار کامپوزیت Al/Sip نشان داده شده است.

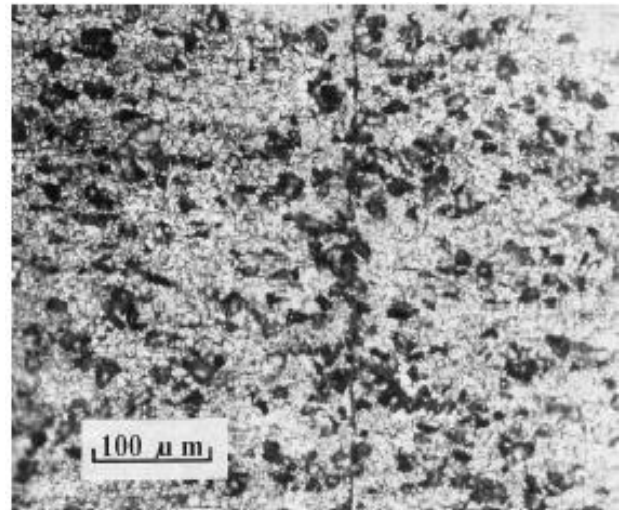
در شکل (۷ - الف) ریزساختار کامپوزیت Al/Sip است که از ذرات سیلیکون اولیه و فازهای یوتکتیک تشکیل شده است. کسر حجمی از Sip در کامپوزیت Al/Sip بدون رقیق سازی و با رقیق سازی  $\pm 2.3$  در ۶۰ درصد اندازه‌گیری شده است. در شکل (۷ - ب) تجزیه تحلیل

محفوظ و همکاران [۹]، به بررسی کامپوزیت تقویت شده با نانوذرات کربنی / ویسکوز پرداخته است. نتایج نشان داد که با افزودن ۲٪ وزن نانوذرات کربنی در نتیجه استحکام کششی و مدول ینانگ کامپوزیت به ترتیب ۱۶/۹ و ۱۶/۳۷ درصد افزایش می‌یابد.

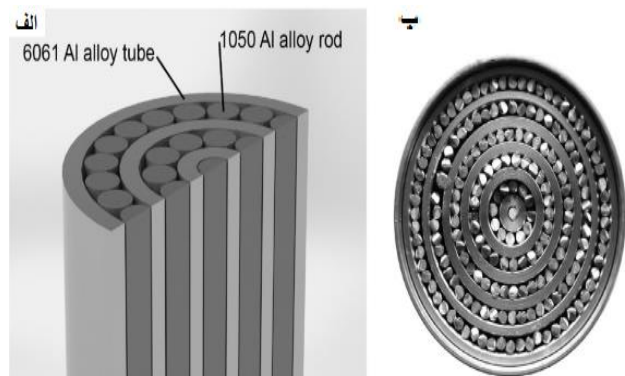
هونگجو و همکاران [۱۰]، از یک روش اکستروژن جدید برای ترکیب آلومینیوم‌های مختلف استفاده نموده‌اند که در این تحقیق برای ساخت کامپوزیت زمینه فلزی به روش اکستروژن طبق شکل (۲)، از میله‌های آلیاژی آلومینیوم ۱۰۵۰ به‌عنوان ماتریس و از لوله‌های آلیاژی آلومینیوم ۶۰۶۱ به‌عنوان تقویت کننده استفاده نموده‌اند.

در این تحقیق تکامل میکرو سازه پس از فرآیند اکستروژن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته که برای این منظور از میکروسکوپ SEM، FEG، EBSD استفاده شده است.

آزمایش‌های فشرده سازی و نتایج میکروسکوپ نوری نشان داد که اکستروژن باید تحت شرایط خلأ انجام شود که نتایج SEM این تحقیق در شکل (۳) نشان داده شده است.

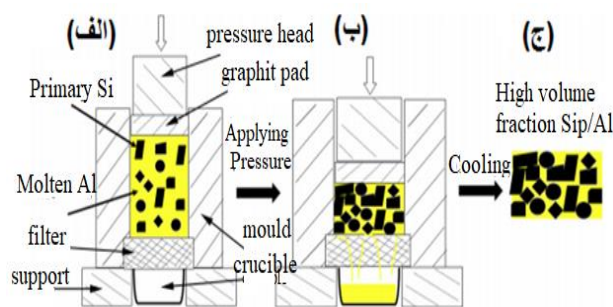


شکل ۱- تصویر میکروسکوپ نوری از اتصال دیفوزیونی آلومینیوم ۶۰۶۱ به ذرات SiC [۷].

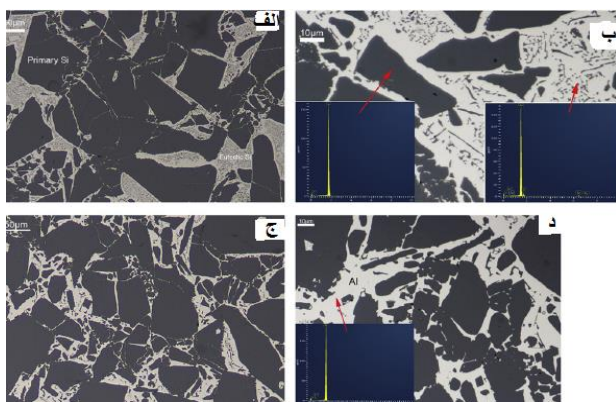


شکل ۲- الف) طرح اولیه از مواد تشکیل دهنده که در یک الگوی حلقه مرکب قرار گرفته و ب) کامپوزیت طراحی شده قبل از فرآیند اکستروژن اولیه.

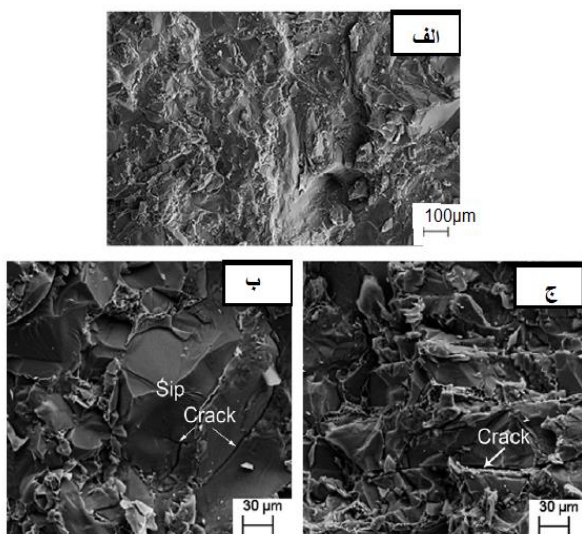




شکل ۶- تصاویری از روش FSC (الف) در حالت قبل از اعمال فشار (ب) در حالت اعمال فشار (ج) کامپوزیت پایه آلومینیومی تقویت شده با ذرات [۱۲].



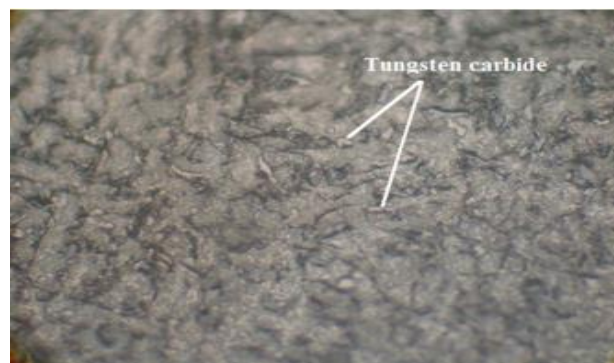
شکل ۷- تصاویر ریزساختار و EDS از کامپوزیت Al/Sip: (الف) بدون رقیق کردن با بزرگنمایی کم (ب) بدون رقیق کردن با بزرگنمایی زیاد (ج) رقیق کردن با بزرگنمایی کم (د) رقیق کردن با بزرگنمایی زیاد [۱۴].



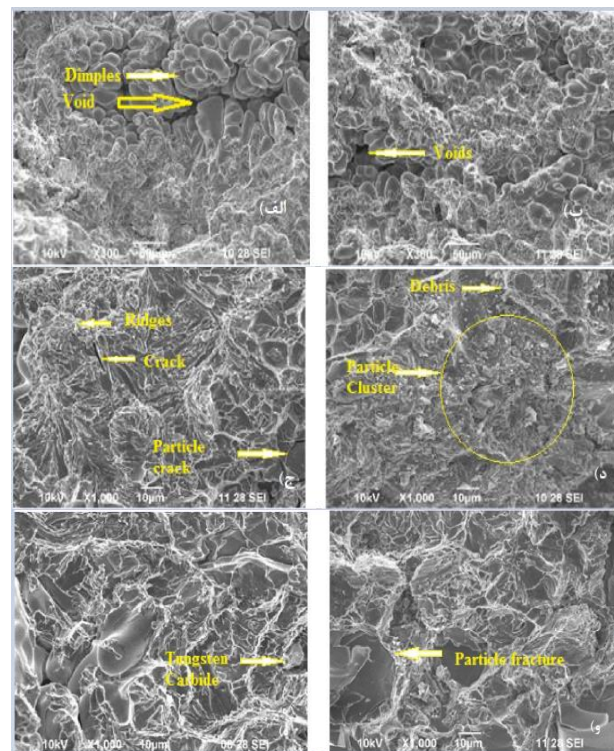
شکل ۸- تصاویری از سطوح شکست کامپوزیت Al/Sip: (الف) بزرگنمایی کم (ب) و (ج) بزرگنمایی زیاد [۱۴].

چنگ و همکاران [۱۵]، به تحقیق و بررسی بر روی کامپوزیت آلومینیوم / نیکل با استفاده از روش نورد تجمعی (ARB) پرداخته‌اند که هشت لایه آلومینیوم و هفت لایه نیکل به شکل یک ساختار ساندویچ بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. سپس از فرآیند نورد تجمعی

اسپکتروسکوپی (EDS) نشان می‌دهد که ذرات سیاه بلوک‌های Si و مناطق دیگر فاز یوتکتیک هستند که شامل عناصر Al، Si هستند. اندازه ذرات سیلیکون اولیه در محدوده وسیع از ۱ میکرومتر تا ۱۲۰ میکرومتر متفاوت است که میانگین آن‌ها حدود ۲۹ میکرومتر است. در شکل (۷) در قسمت الف و ج، ذرات سیلیکونی اولیه بزرگ‌تر که در طول فرآیند FSC به دلیل فشار شکسته شده‌اند، را مشاهده می‌شود. در شکل (۸) تصاویر از سطح شکست کامپوزیت Al/Sip نشان داده شده است.



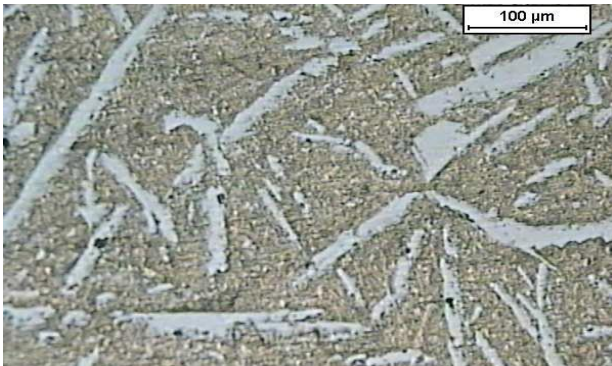
شکل ۴- تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه کامپوزیت تولید شده با ۸ درصد کاربید تنگستن.



شکل ۵- تصویر SEM از ریزساختار در آزمون کشش: (الف) آلیاژ آلومینیوم (AA6082)، (ب) آلیاژ آلومینیوم با دو درصد کاربید تنگستن، (ج) آلیاژ آلومینیوم با چهار درصد کاربید تنگستن، (د) آلیاژ آلومینیوم با شش درصد کاربید تنگستن، (ه) آلیاژ آلومینیوم با هشت درصد کاربید تنگستن و (و) آلیاژ آلومینیوم با ده درصد کاربید تنگستن.

برای ساخت کامپوزیت پایه آلومینیومی با رطوبت کم، اندکی تخلخل است، هر چند نقایص خاصی نظیر عدم چسبندگی کامل و تخلخل وجود دارد.

در پژوهش انجام شده توسط آنتیمیدیس و همکاران [۱۸]، که فلز پایه می‌باشد گرم شده و در دمای حدود  $830^{\circ}\text{C}$  ذوب می‌شود و با پروانه‌ای از جنس تنگستن در  $1000$  دور بر دقیقه به شدت هم زده می‌شود. پس از سی دقیقه به هم زدن هم‌دمای یک گرداب رضایت بخش ایجاد شده و پس از آن ترکیبی از  $49\%$  وزنی  $\text{K}_2\text{TiF}_6$  و  $51\%$  وزنی  $\text{KBF}_4$  به تدریج در آن به منظور ایجاد واکنش با یکدیگر و تولید  $\text{TiB}$  به عنوان فاز تقویت کننده اضافه می‌شود. به طور هم‌زمان، مقدار کمی از فولاد در فلز زمینه به منظور دست یافتن به آهن و کروم اضافه می‌شود. بعد از انجام این اختلاط به هم زدن مذاب برای  $30$  دقیقه دیگر ادامه داده شده و پس از آن در یک قالب پیش گرم شده ریخته و در هوا خنک می‌شود. مورفولوژی (ساختار شناسی) مواد کامپوزیتی تولید شده با استفاده از میکروسکوپ نوری و SEM مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱۱) مورفولوژی نمونه‌ای از آلومینیوم تقویت شده با ذرات  $\text{TiB}$  و آهن و کروم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- مورفولوژی نمونه‌ای از آلومینیوم تقویت شده با ذرات  $\text{TiB}$  (لکه‌های سیاه) و فاز آلومینیوم - آهن - کروم (سوزنی سفید) تولید شده توسط روش ریخته‌گری تلاطمی [۱۸].

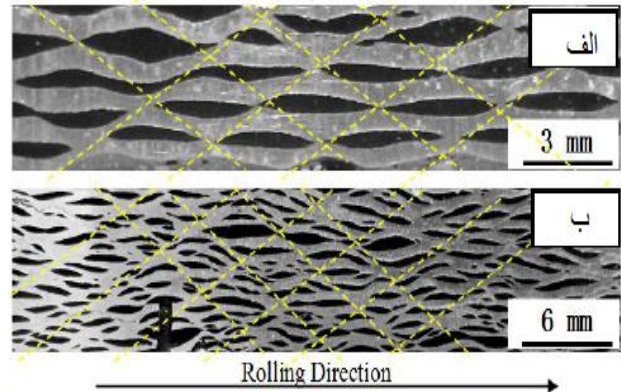
میکروسختی ویکرز در کامپوزیت تولید شده با زمینه آلومینیوم و تقویت شده با ذرات  $\text{TiB}$ ، آهن و کروم در اکثر مناطق  $50\text{HV}$ ، در مناطق آهن  $105\text{HV}$  و تقریباً  $200\text{HV}$  در ذرات  $\text{TiB}$  اندازه‌گیری شد. در تحقیقی دیگر توسط اوزدین و همکاران [۱۹]، کامپوزیت با زمینه آلایژ  $\text{Al2011}$  و ذرات تقویت کننده  $\text{Al}_2\text{O}_3$  را به روش گردابی تولید کرده است. بلافاصله پس از ریختن کامپوزیت به داخل قالب و قبل از انجماد کامل، تخلخل در داخل کامپوزیت به وجود می‌آید و این تخلخل توسط فشار اعمالی مطابق شکل (۱۲) کاهش می‌یابد.

به منظور تولید بهتر کامپوزیت‌های زمینه فلزی به روش گردابی، پارامترهایی نظیر توانایی اختلاط، سرعت تقویت کننده، زمان اختلاط، دمای اختلاط و درجه حرارت ریخته‌گری باید دقیقاً مشخص شود. در این تحقیق وی کامپوزیت‌ها را با  $8$ ،  $16$  و  $24\%$  حجمی از ذرات تقویت

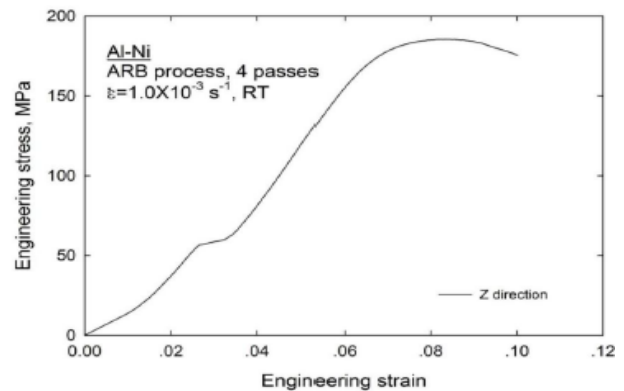
برای یک پاس و چهار پاس استفاده نموده و در انتها با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

شکل (۹)، ساختار کلی نمونه‌های کامپوزیتی  $\text{Al/Ni}$  را پس از فرآیند ARB نشان می‌دهد (نیکل در رنگ تیره و آلومینیوم در رنگ روشن نشان داده شده است). جهت نورد توسط فلش سیاه در پایین تصویر نشان داده شده است.

در شکل (۱۰) منحنی تنش کرنش مهندسی فشرده سازی کامپوزیت  $\text{Al/Ni}$  پس از فرآیند ARB با ۴ پاس نشان داده شده است.



شکل ۹- ساختار مقطع عرضی کامپوزیت‌های آلومینیومی/ نیکل تولید شده به روش ARB (الف) ۱ پاس و (ب) ۴ پاس فلش سیاه نشانگر جهت نورد [۱۶].



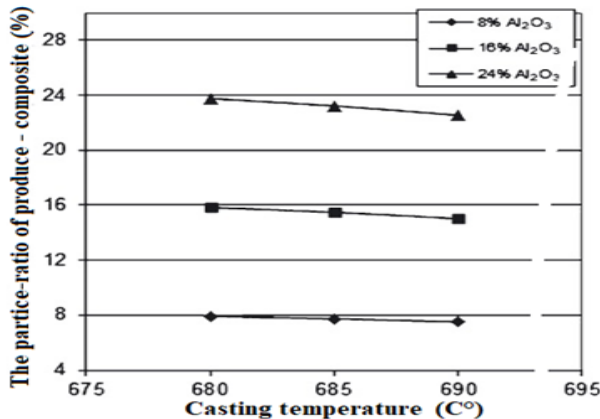
شکل ۱۰- نمودار تنش - کرنش به دست آمده از کامپوزیت  $\text{Al/Ni}$  به دست آمده از روش ARB با ۴ پاس [۱۶].

نمونه کامپوزیت  $\text{Al/Ni}$  دارای تنش نهایی فشاری حدود  $180$  مگا پاسکال می‌باشد. پس از آزمون فشرده سازی، شکستگی به طور گسترده در رابط بین  $\text{Al}$  و فاز  $\text{Ni}$  مشاهده شده است که نشان دهنده اتصال ضعیف بین رابط دو فلز می‌باشد.

راجش و همکاران [۱۷]، بر روی کامپوزیت زمینه آلومینیومی که با ذرات سرامیک تقویت شده‌اند، به روش فرآوری مایع تحقیقاتی رو به انجام رساندند با توجه به بررسی‌های انجام شده تمام فن‌های پردازش مایع می‌تواند با موفقیت برای تولید در تولید کامپوزیت پایه آلومینیومی مورد استفاده قرار گیرد و ریخته‌گری ارزان‌ترین روش

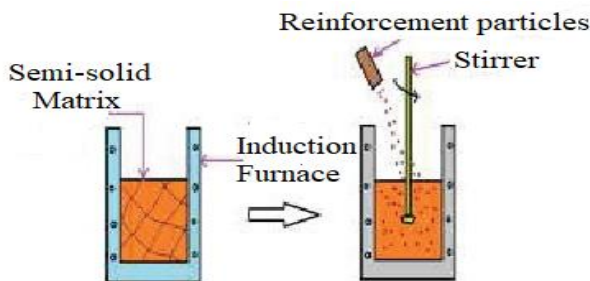


نسبت ذرات در بالای گلدان است که در طول فرآیند ریخته‌گری در کامپوزیت‌ها به وجود می‌آید.



شکل ۱۴- نسبت ذرات تقویت کننده کامپوزیت در دماهای تولید مختلف [۲۰]

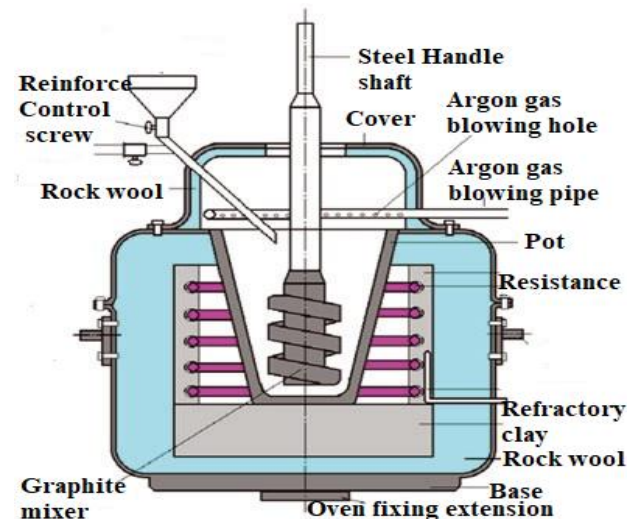
روش ریخته‌گری نیمه جامد تقریباً شبیه به روش‌های ریخته‌گری تلامپی است اما به جای ذوب کردن کامل ماده زمینه، ماتریس در شرایط حالت نیمه جامد نگهداری می‌شود. به خاطر این شرایط فرآیند ریخته‌گری نیمه جامد می‌تواند ریخته‌گری دوغابی نامیده شود. ریخته‌گری نیمه جامد یک فرآیند حالت مایع است که در آن ذرات تقویت کننده به یک مذاب جامد اضافه شده است. در شکل (۱۵) شماتیک آماده‌سازی فرآیند ریخته‌گری ترکیبی حالت مایع و جامد نشان داده شده است. در مقایسه با فرآیند ریخته‌گری تلامپی، این روش خاصیت ترشوندگی (توانایی یک مایع برای پخش شدن روی سطح جامد) بالاتر و توزیع همگنی از تقویت کننده را در ساختار کامپوزیت‌های زمینه فلزی دارد [۲۱].



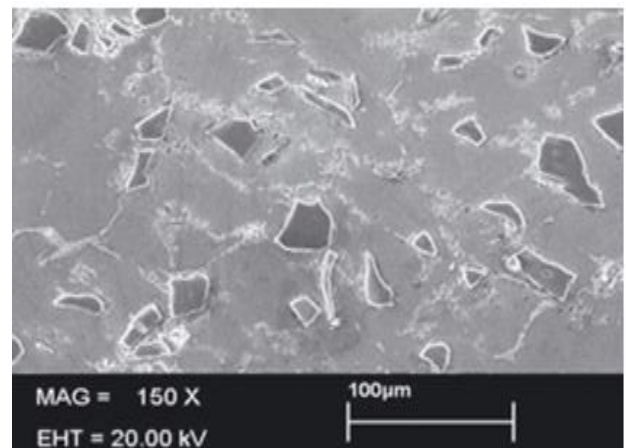
شکل ۱۵- شماتیک آماده‌سازی فرآیند ریخته‌گری ترکیبی حالت مایع و جامد [۲۰].

راجان و همکاران [۲۲]، آلیاژ آلومینیوم تقویت شده با ذرات نرمه خاکستر را با استفاده از هر دو فرآیند ریخته‌گری نیمه جامد و تلامپی تولید کردند. پس از تجزیه و تحلیل دقیق خواص مکانیکی و ریزساختاری به این نتیجه رسیدند که محصول به‌دست آمده از روش ریخته‌گری نیمه جامد برتر از ریخته‌گری تلامپی است.

کننده تولید نمود و سپس اثرات درجه حرارت ریخته‌گری بر روی مقدار نسبت ذرات تقویت کننده مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، اثر نسبت افزایش ذرات تقویت کننده بر روی سختی کامپوزیت مورد آزمایش قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها، وقتی دمای ریخته‌گری تغییر می‌کند، نسبت ذرات تقویت کننده در کامپوزیت نیز تغییر می‌کند و وقتی نسبت ذرات تقویت کننده در کامپوزیت افزایش می‌یابد میزان سختی کامپوزیت نیز افزایش می‌یابد. در این تحقیق کامپوزیت‌ها با ۸، ۱۶ و ۲۴٪ حجمی از ذرات تقویت کننده تولید شدند که کامپوزیت با ۱۶٪ ذرات تقویت کننده (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۲- شماتیک از تولید کامپوزیت به روش ریخته‌گری گردابی [۲۰].



شکل ۱۳- تصویر SEM از کامپوزیت دارای زمینه Al-2011 و ۱۶٪ ذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [۲۰].

با توجه به شکل (۱۴) هنگامی که درجه حرارت ریخته‌گری افزایش می‌یابد، نسبت ذرات تقویت کننده کاهش می‌یابد. هر یک از نسبت ذرات مخلوط شده در محصول کامپوزیت کمتر از نسبت هدف (۸، ۱۶ و ۲۴ درصد) است. تصور می‌شود که این کاهش به دلیل کمتر شدن

در تحقیقی دیگر یوجیانگ یائو و همکاران [۲۳]، به تولید کامپوزیت‌های با زمینه آلیاژ منیزیوم-کلسیم و با تقویت کننده الیاف کربنی بخار داده شده با فرآیند ریخته‌گری نیمه جامد پرداختند. سپس ریزساختار و خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند.

ترکیب شیمیایی روبه‌رو (جرم %): تولید شد: ۶۲/۴ آلومینیوم و ۵۹/۲ کلسیم، با تعادل Mg، در ادامه آلیاژ Mg-5Al برای مقایسه نیز ساخته شده است. از الیاف نانو کربنی VGCF که به‌طور معمول ۲۰۰-۱۰۰ نانومتر قطر و ۱۰ تا ۲۰ میکرون طول دارند، استفاده شده است.

در تحقیق انجام شده توسط ملیک و همکاران [۲۴]، به نحوه تولید کامپوزیت فوم (متخلخل) زمینه آلیاژ منیزیومی AZ91 به روش نفوذ با فشار منفی پرداختند. آن‌ها به کاهش وزن و هزینه کامپوزیت‌های زمینه فلزی با استفاده از حباب‌های توخالی به‌عنوان تقویت کننده رسیدند. دو نوع از محفظه کروی (حباب) آلومینوسیلیکات توخالی و Ni-P پوشش داده شده به‌منظور تعیین تأثیر پوشش Ni-P، در این مطالعه در ساختار کامپوزیت استفاده شده است. آنالیز ریزساختار کامپوزیت ساخته شده توسط میکروسکوپ نوری انجام شد. علاوه بر این، چگالی نظری و اندازه‌گیری شده کامپوزیت ساخته شده نیز بررسی و تجزیه و تحلیل شد. هر دو محفظه (حباب) پر شده و پر نشده توسط آلیاژ زمینه در کامپوزیت مشاهده شده است. ترکیبات MgO و Mg<sub>2</sub>Si به‌عنوان محصولات واکنش بین اجزاء در این مواد پدیدار شد. در مقابل، حباب‌های توخالی دست نخورده در ریزساختار کامپوزیت با حباب‌های پوشش Ni-P داده شده حضور داشتند.

لی و همکاران [۲۵]، کامپوزیت Al/Aluminium Nitride را به روش ریخته‌گری کوبشی تولید کردند و آن‌ها بر روی تأثیر فشار اعمالی بر روی تقویت کننده آلومینیوم نیتريد مطالعه کردند. مطالعه نشان داد که در صورت افزایش یافتن درصد تقویت کننده در کامپوزیت زمینه فلزی فشار اعمالی افزایش می‌یابد.

در تحقیقی دیگر توسط بلاسوبرامانیا و همکاران [۲۶]، به خصوصیات مکانیکی و نحوه ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه منیزیوم (AZ91D/SiC) تولید شده به روش ریخته‌گری کوبشی پرداختند. در این مقاله آن‌ها کامپوزیت زمینه منیزیوم را با استفاده از آلیاژ منیزیوم و چندین کسر حجمی از ذرات سیلیکون کارباید به روش ریخته‌گری کوبشی و تحت یک گاز خنثی تولید کرده‌اند، گاز خنثی منجر به ترشوندگی کامل ذرات سیلیکون کارباید در منیزیوم مذاب شده است. زبری سطح و نرخ باربرداری کامپوزیت‌ها اندازه‌گیری شده و تغییراتشان با استفاده از آرایه متعام مطالعه شده است، همچنین رفتار مکانیکی آن‌ها تعیین و با رفتار آلیاژ منیزیوم تقویت نشده مقایسه شد.

پلیسپارو فریرا و همکاران [۲۷]، کامپوزیت زمینه آلومینیومی را با تقویت کننده ذره‌ای SiC و به روش ترکیبی متالورژی پودر و شکل‌دهی به هم زنی تولید کردند. آن‌ها از براده‌های باز یافت شده

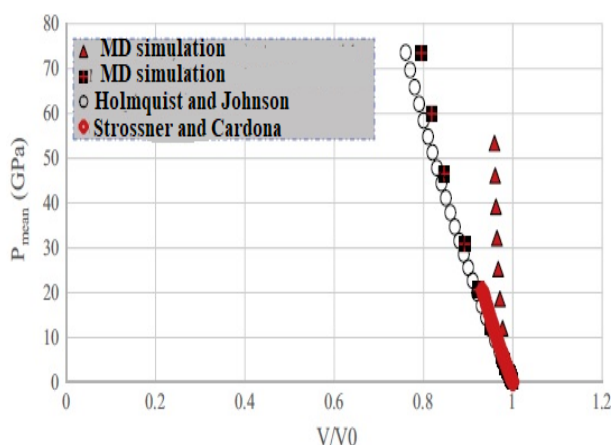
ماشین‌کاری، به‌طور خاص Al7075 به‌عنوان مواد اولیه استفاده کردند. روش ارائه شده بر پایه شکل‌دهی مخلوط فشرده از براده‌های فلزی و ذرات تقویت کننده در دمای بالا، در شرایط نیمه جامد است. خواص مکانیکی با استفاده از آزمون‌های میکرو دندانه مورد بررسی قرار گرفت. در میان روش‌های متعدد تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی، تکنولوژی نیمه جامد با نتایج بحث برانگیزی تاکنون بررسی شده است. افزودن ذرات به فلز در حالت نیمه جامد جداسازی آن‌ها در طول انجماد را کاهش می‌دهد و در نتیجه پراکندگی تقویت کننده در کامپوزیت بهتر است [۲۸]. اگر چه، فن‌هایی شامل تکان دادن فلز می‌تواند مشکلات ذاتی مربوط به همگن بودن را برطرف کند. کیفیت محصول را می‌توان توسط فرآیند Thixoforming (شکل‌دهی به هم زنی) در طول انجماد بهبود داد. می‌توان گفت که به خاطر مزایای استفاده از Thixoprocessing (شکل‌دهی به هم زنی) در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی است که باید هنوز به‌طور کامل مورد استفاده قرار گیرد [۲۹].

هدف از این کار کمک به توسعه مهندسی با هزینه کم، تحقیق در مورد فرآیند تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی توسط Thixoforming (شکل‌دهی به هم زنی) مخلوط فشرده از مواد باز یافت شده خام (تراشه ماشین‌کاری) و ذرات سرامیکی است [۲۹].

### ۳- مروری بر سابقه تحقیقات انجام شده در حوزه کامپوزیت زمینه آلومینیومی به روش اتصال انفجاری

کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی به روش‌های مختلفی نظیر اختلاط در حالت مایع، آلیاژسازی مکانیکی و غیره تولید می‌شوند. یکی از روش‌های نوین مورد استفاده در تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی روش جوشکاری انفجاری می‌باشد. جوشکاری انفجاری یک فرآیند حالت جامد است که در آن از انرژی انفجار برای اتصال دو یا چند ماده با هم تحت فشار بالا استفاده می‌شود. جوشکاری انفجاری روشی قابل قبول برای اتصال فلزات غیر هم جنس می‌باشد. جوشکاری انفجاری یک فرآیند حالت جامد است که یکی از مزایای جوشکاری انفجاری این است که برای تولید فلزات چند لایه به شکل ورق، میله یا لوله به‌منظور بهبود خواص مکانیکی، خوردگی، مقاومت در برابر سایش مورد استفاده قرار می‌گیرند در این روش فاز تقویت کننده که می‌تواند الیاف کوتاه، الیاف بلند و یا شبکه فلزی باشد که بین دو یا چند صفحه فاز زمینه قرار گرفته شود و به کمک فرآیند جوشکاری انفجاری اتصال فاز زمینه و فاز تقویت کننده صورت پذیرد. خواص مکانیکی کامپوزیت وابسته به جهت قرارگیری الیاف می‌باشد. مطالعات فراوانی بر روی جوشکاری انفجاری تیتانیوم با مواد غیر هم جنس صورت گرفته است [۳۰]. بیشترین مطالعات انجام گرفته بر روی جوشکاری انفجاری تیتانیوم با فولاد زنگ نزن، آلومینیوم، مس و نیکل بوده است. یکی از شرط‌های لازم جهت انجام موفقیت آمیز این فرآیند،

و برای کامپوزیت Al/SiC نیز در این مقاله آمده است که مقایسه این منحنی‌ها نشان می‌دهد که در یک فشار موج شوک داده شده بزرگ‌ترین کاهش حجم برای فشار اولیه صفر مگاپاسکال است. تحکیم و یکپارچه سازی ذرات به‌طور عمده از طریق بارگذاری هیدرواستاتیک انجام می‌شود و با توجه به اثر کارسختی پس از آن تراکم بیشتر برای نمونه‌های با فشار اولیه غیر صفر سخت‌تر از نمونه‌هایی است که فشار اولیه صفر دارند.



شکل ۱۶- مقایسه منحنی P-V/V0 برای سیلیکون کاربرد محاسبه شده از شبیه سازی‌ها MD با نتایج تجربی [۳۱].

در پژوهشی دیگر یونگ یو و همکاران [۳۴]، به تولید لوله‌های هم محور به روش جوشکاری انفجاری زیر آب پرداختند. در این مقاله به‌منظور حل مسئله فرسایش سطح آلومینیوم در لوله‌های دو فلزی فولاد - آلومینیوم تولید شده به روش جوشکاری انفجاری، یک سامانه جدید جوشکاری انفجاری برای جوش کردن لوله‌های هم محور فولاد - آلومینیومی طراحی شده است. فاصله توقف بر اساس فرمول‌های تجربی به‌دست آمد. یک کابل انفجاری خاص با پوشش آلومینیومی به‌عنوان ماده منفجره استفاده شد. چهار آزمایش به ترتیب با استفاده از کابل‌های انفجاری ۱، ۲، ۳ و ۴ انجام شد. در هر آزمایش، سه حسگر PVDF قابل اعتماد (پلی وینیلیدین فلوراید) با حسگر پیزوالکتریک برای نمونه‌گیری فشار ضربه بین لوله اصلی و لوله پرنده در امتداد جهت انفجار استفاده شد. منحنی‌ها p-t (فشار - زمان) در نقاط مختلف در لوله دو فلزی تولید شده توسط کابل انفجاری ۱ به‌دست آمد. برای مشاهده سطح درونی و قضاوت در مورد رابط اتصال، نمونه‌ها در امتداد جهت محوری برش خوردند. لوله دو فلزی تولید شده توسط سامانه جوشکاری جدید با استفاده از کابل انفجاری ۳ دارای یک رابط موجی نامنظم بین رابط موجی میکرو و کوچک است که یکی از بهترین فرم‌های پیوند است.

یونگ یو و همکاران [۳۴]، در مطالعاتی نشان داده‌اند که دو ترکیب مشابه و غیر مشابه فلزات را می‌توان با خواص اتصال خوبی به روش جوشکاری انفجاری به هم متصل کرد. در رابط اتصال، هنگامی که

داشتن انعطاف پذیری و چقرمگی قابل قبول است تا قطعات در حین جوشکاری نشکنند یا تغییر فرم قابل توجهی ندهند. حداقل انعطاف پذیری مورد نیاز ۱۰٪ و حداقل انرژی شکست ۳۰ ژول ذکر شده است. با توجه به کاربرد فراوان تیتانیوم و آلیاژهای آن در صنایع هوافضا، استفاده از فرآیند جوشکاری انفجاری تیتانیوم، به ویژه جوشکاری انفجاری تیتانیوم با فولاد زنگ نزن بسیار مفید است [۳۰].

توکول و همکاران [۳۱]، در کار تحقیقاتی خود به خواص مکانیکی نانو کامپوزیت تولید شده توسط پخت (زینتر کردن) با عبور موج شوک از نانو پودر آلومینیوم و سیلیکون کاربرد، با استفاده از شبیه سازی دینامیک مولکولی (MD) پرداختند. در این راستا، پاسخ موج شوک از نانو ذرات آلومینیوم و سیلیکون کاربرد مرتب شده در یک شبکه BCC، با استفاده از معادلات هاگونیوت مورد مطالعه قرار گرفت. علاوه بر این، اثر فشردگی هیدرواستاتیک اولیه پودر و سرعت سرد شدن مواد تحت شوک بر روی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت بررسی شده است. با استفاده از منحنی هاگونیوت مربوط به پودر، نتیجه‌گیری می‌شود که فشار هیدرواستاتیک اولیه، منجر به تغییرات کمتر درجه حرارت و سرعت موج شوک بالاتر می‌شود. علاوه بر این، شبیه سازی آزمون بارگذاری تک محوره برای تعیین خواص مکانیکی محصولات نهایی استفاده شده است. معمولاً، اندازه تقویت کننده سرامیکی در کامپوزیت‌های زمینه فلزی در محدوده میکرومتر است. ذرات سرامیکی در اندازه میکرو، کامپوزیت‌هایی با حد تسلیم و UTS بالاتر اما شکل پذیری پایین‌تر با توجه به فلز خالص استفاده شده، ایجاد می‌کند. به‌کارگیری تقویت کننده سرامیکی در ابعاد نانو در کامپوزیت‌های زمینه فلزی، می‌تواند انعطاف پذیری خوب با حفظ استحکام را ایجاد کند.

به‌عنوان یک نتیجه از تشکیل الیاف تقویت کننده نانو کامپوزیت این است که افزایش فشار شوک منجر به بهبود در خواص مکانیکی می‌شود [۳۱]. فشار اولیه اعمال شده بر نانو ذرات، اگر چه نتایجی در تضعیف نانو کامپوزیت پخته شده دارد. علاوه بر این، نشان داده شده است که یک نرخ خنک شدن مناسب می‌تواند در فعال شدن سازوکار نفوذ پس از گذشت موج شوک که در افزایش استحکام باند نانوذرات مفید است نتیجه خوبی دهد.

منحنی هاگونیوت برای SiC با استفاده از معادلات هاگونیوت محاسبه می‌شود. منحنی هاگونیوت P-V/V0 (فشار معادل بر حسب نسبت حجم به حجم اولیه ماده تحت موج شوک) برای SiC در شکل (۱۶) نشان داده شده است.

در این تصویر منحنی به‌دست آمده از طریق شبیه سازی و مقادیر محاسبه شده توسط هولموکیست و همکاران [۳۲]، استراسنر و همکاران [۳۳]، از طریق استفاده از رویکردهای نظری و تجربی مقایسه شدند. منحنی شبیه سازی شده و محاسبه شده برای زمینه آلومینیوم



جدول ۱- مشخصات کابل انفجاری [۳۴].

Explosive Cord	Outside Diameter (mm)	Liner Density [g.m <sup>-1</sup> ]	Detonation Velocity [m.s <sup>-1</sup> ]
۱	۳	۴	۶۹۶۰
۲	۴	۳/۹	۶۹۰۰
۳	۵	۱۴/۷	۶۸۷۰
۴	۶	۱۹/۸	۶۸۳۰

جدول ۲- اندازه لوله‌ها [۳۴].

Materials	Length (mm)	Inside Diameter (mm)	Outside Diameter (mm)	Wall Thickness (mm)
Steel of Q235	۵۰۰	۳۲	۳۸	۳
Aluminum of 1060	۵۵۰	۲۸	۳۰	۱

جدول ۳- خواص مکانیکی لوله‌ها [۳۴].

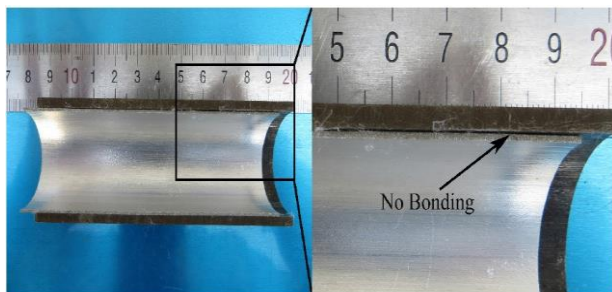
Materials	P [kg.m <sup>-3</sup> ]	E [GPa]	Melting point [K]	$\delta$ [GPa]	$\sigma_s$ [Mpa]
Steel of Q235	۷۸۵۰	۲۰۶	۱۷۶۰	۲۵	۲۲۵
Al 1060	۲۷۱۰	۶۸/۹	۹۳۳	۲۵	۷۵

"نمونه ۱" به معنی نمونه برش خورده لوله دو جنسی تولید شده به وسیله "کابل انفجاری ۱" است، "نمونه ۲" نیز به معنای نمونه تولید شده با "کابل انفجاری ۲" و همین طور بقیه نمونه‌ها.

در نمونه ۱ (شکل (۱۸))، لوله پرنده از لوله پایه تفکیک می‌شود. برش نمونه در امتداد جهت محوری، تنش محیطی را آزاد می‌کند که نشان می‌دهد اتصال بین آلومینیوم و فولاد اتصال مکانیکی است دلیل اصلی این است که محتوای مواد منفجره برای سرعت بخشیدن به اندازه کافی به لوله پرنده بسیار کوچک است.

در نمونه ۲ (شکل (۱۹))، لوله پرنده به لوله اصلی در بیشتر مناطق به غیر از انتهای نمونه اتصال پیدا کرده است.

مشاهدات SEM در شکل (۲۰) نشان می‌دهد اتصال موج دار در برخی از مناطق سطح اتصالی ایجاد شده است، اما مقداری ترک‌های میکروسکوپی طولی در لوله اصلی در نزدیکی سطح اتصالی تشکیل شده است.



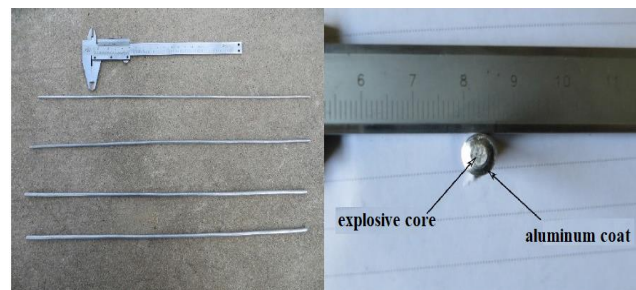
شکل ۱۸- تصویر برش خورده "نمونه ۱" در راستای محوری [۳۴].

نسبت ماده منفجره و فاصله توقف افزایش یابد، رابط (سطح) اتصالی ملایم به یک رابط اتصالی موج‌دار تبدیل می‌شود. برای یک سطح اتصالی موج دار هنگامی که مقدار ماده منفجره افزایش یابد، طول و دامنه موج نیز افزایش می‌یابد [۳۴ و ۳۵].

آنالیزها نشان داد که رسیدن به اتصال جوشی موج دار بین آلومینیوم و فولاد به دلیل تفاوت‌های بزرگ آن‌ها در چگالی و نقطه ذوب، دشوار است. همچنین می‌توان بیان کرد که پنجره جوش مناسب برای این دو فلز وجود دارد، اما رسیدن به یک اتصال خوب بین آن‌ها بسیار محدود است [۳۴ و ۳۵].

بهره وری انرژی با استفاده از انفجار به روش سنتی بسیار کم است، بنابراین نوین تولید شده توسط انفجار می‌تواند در فاصله بسیار زیاد تا ۵۰۰۰ متری نیز برسد. برخی از محققان با استفاده از فن جوشکاری انفجاری صفحات زیر آب را جوش داده‌اند [۳۴ و ۳۶].

کابل‌های انفجاری پوشش داده شده با آلومینیوم از لوله‌های آلومینیومی با هندسه استوانه‌ای پر شده با هیکسوژن (نوعی ماده منفجره) و برخی از غیر فعال کننده‌ها مانند پارافین و نمک‌های معدنی تشکیل شده‌اند. این ترکیب می‌تواند یکنواختی چگالی مواد منفجره را تضمین کند و برای تولید صنعتی، ذخیره سازی دراز مدت و حمل و نقل‌های طولانی مناسب باشد. این یک ماده انفجاری عمودی ویژه با پوشش آلومینیومی است که در شکل (۱۷) نشان داده شده است [۳۴].



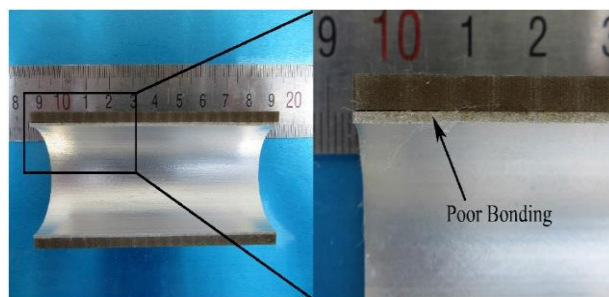
شکل ۱۷- کابل انفجاری پوشش داده شده با آلومینیوم [۳۴].

در آزمایش‌های انجام شده کابل‌های انفجاری پوشش داده شده با آلومینیوم از RDX و K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> تشکیل شدند (به ترتیب ۸۵٪ و ۱۵٪ وزنی). پوشش آلومینیوم تضمین می‌کند که انفجار دارای مقاومت خوبی در برابر آب است، که برای سامانه اتصال انفجاری ما بسیار مهم است. اگر چه کابل‌های انفجاری مورد استفاده در آزمایش‌های تراکم خطی متفاوتی داشت، ولی سرعت انفجار آن‌ها نزدیک به ۶۹۰۰ m/s بود که مشخصات آن‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است [۳۴].

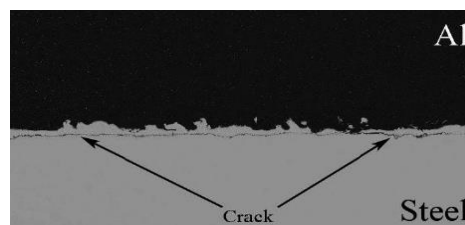
فولاد کربنی Q235 به عنوان لوله اصلی و آلومینیوم ۱۰۶۰ به عنوان لوله پرنده مورد استفاده قرار گرفت، ابعاد و خصوصیات اصلی آن‌ها به ترتیب در جدول‌های (۲ و ۳) نشان داده شده است. در این آزمایش‌ها ضخامت لوله پرنده و فاصله توقف ۱ میلی‌متر بود.

آهن و آلومینیوم [۴۲]، آلومینیوم و منیزیوم [۴۳] و ... بسیار مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

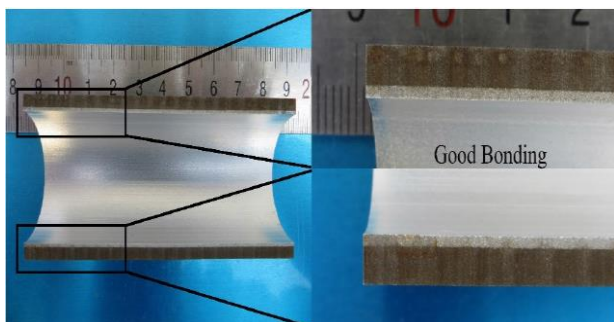
کامپوزیت‌های چهل لایه از قرارگیری صفحات متناوب تیتانیوم خالص تجاری شده (VT1-0) و آلیاژ آلومینیوم (Al-1Mn) به ترتیب با ابعاد  $100 \times 200 \times 0.25$  میلی‌متر و  $100 \times 200 \times 0.2$  میلی‌متر مطابق شماتیک نشان داده شده در شکل (۲۴) به دست آمده است. ترکیب عنصری مواد اولیه با استفاده از طیف سنج نوری ARL۳۴۶۰ اندازه‌گیری شده و در جدول (۴) نشان داده شده است. در آزمایش مربوط به کابل انفجاری ۴، یک لوله دو فلزی با شکاف طولی بزرگ همان‌طور که در شکل (۲۳) نشان داده شده به وجود آمد.



شکل ۱۹- تصویر برش خورده "نمونه ۲" در راستای محوری [۳۴].



شکل ۲۰- میکروگرافی نمونه ۲ با دستگاه SEM [۳۴].



شکل ۲۱- تصویر برش خورده "نمونه ۳" در راستای محوری [۳۴].



شکل ۲۲- میکروگرافی "نمونه ۳" با دستگاه SEM [۳۴].



شکل ۲۳- تصویر "نمونه ۴" با یک شکاف طولی بزرگ [۳۴].

جدول ۴- ترکیب مواد اولیه، wt.% [۳۸].

	Ti	Fe	Cr	Mn	Si	Cu	Zn
Ti	Balance	۰/۰۸۶	۰/۰۱۷	-	-	-	-
Al	۰/۲	۰/۷	-	۰/۸	۰/۶	۰/۱۵	۰/۱

در نمونه ۳ (شکل (۲۱))، بعد از انجام انفجار فاصله‌ای بین لوله‌های اصلی و پرنده با چشم غیر مسلح وجود ندارد و به ظاهر اتصال کاملی انجام گرفت ولی با این حال، این یک قضاوت قابل اعتمادی نیست که اتصال خوب است. برای مطالعه چگونگی اتصال خوب، تصاویر SEM (شکل (۲۲)) نشان می‌دهد که اتصال موج‌دار نامنظم شکل گرفته است. این اتصال به دلیل سطح تماس بزرگ و موجی، به‌طور کلی خوب است. هر چند یک اتصال مستقیم نیز می‌تواند حداقل به اندازه یک اتصال موج دار قوی باشد [۳۴ و ۳۷].

دلیل این امر این است که آب خارج از لوله پایه نمی‌تواند مقاومت کافی در برابر انفجار حاصل از کابل انفجاری ۴ را ایجاد کند که این ضعف سامانه جوش است. اگر چه یک قید قوی مانند یک سندان پشتیبان می‌تواند در خارج از لوله اصلی (پایه) اعمال شود، قید آب برای تولید صنعتی در مقیاس بزرگ بسیار ساده و اقتصادی است.

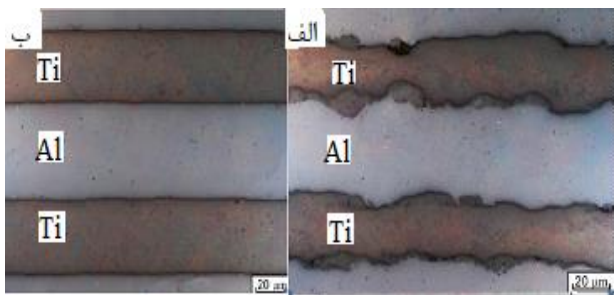
در پژوهشی دیگر انجام شده توسط لازورنکو و همکاران [۳۸]، یک کامپوزیت Ti-Al چهل لایه در یک فرآیند جوشکاری انفجاری به در یک مرحله تولید شد. ساختار جوشکاری کامپوزیت‌ها با استفاده از اسکن کردن و میکروسکوپ الکترونی عبوری به‌طور کامل مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش توجه ویژه به ساختار ناحیه مخلوط شدن ناشی از اتصال (ساختار ناحیه اتصال) در طی جوشکاری انفجاری بود. فرآیند پیچیده مخلوط کردن و انجماد سازی سریع در این مناطق منجر به تشکیل سازه‌های پایدار و ناپایدار مختلف می‌شود. بعد از انجام انفجار، عملیات حرارتی در دمای ۶۴۰ درجه سلسیوس تحت اتمسفر و فشار ۳ مگاپاسکال انجام شد.

مواد چند لایه حاوی ماده بین فلزی حاصل از واکنش بین تیتانیوم و آلومینیوم [۳۹]، نیوبیدیوم و آلومینیوم [۴۰]، نیکل و آلومینیوم [۴۱]،

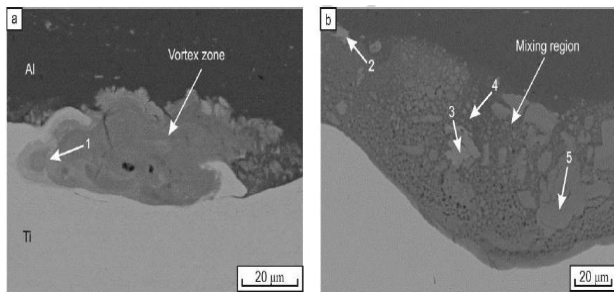
صفحات فلزی نزدیک به لایه انفجاری، مورفولوژی موج اتصال واضح‌تر بود (شکل ۲۶ - الف)).

اتصال بین صفحات در قسمت پایین کامپوزیت تقریباً مسطح بود (شکل ۲۶ - ب)). هوکاموتو و همکاران [۴۴]، مشاهده کردند که دامنه موج خطی به از دست دادن انرژی جنبشی به علت برخورد صفحات بستگی دارد. در مورد جوشکاری چند لایه با تک ضرب، انرژی جنبشی با هر برخوردی که منجر به مسطح شدن اتصالات می‌شود، به سرعت کاهش می‌یابد. مهم‌ترین تغییرات ساختاری در طی جوشکاری انفجاری در نزدیکی اتصالات Ti-Al رخ می‌دهد.

دو نوع متفاوت از ناحیه اختلاط در این آزمایش مشاهده شد. مناطق اختلاط از نوع اول شامل جریان‌های متعدد جوشکاری در اطراف نقطه مرکزی است (شکل ۲۷ - الف)).



شکل ۲۶ - ساختار مواد لایه‌ای جوشکاری انفجاری شده در سطح مقطع: الف) اتصالات بالاتر (جایی نزدیک به صفحه ماده منفجره) و ب) اتصالات پایین‌تر.



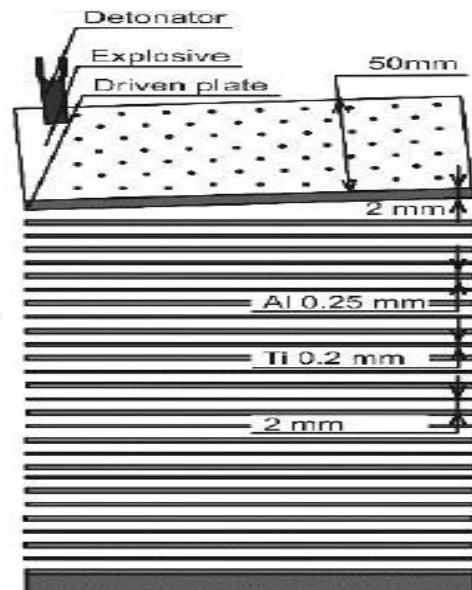
شکل ۲۷ - ساختار و ترکیب شیمیایی مناطق مخلوط در اتصالات Al-Ti بالایی تشکیل شده پس از جوشکاری انفجاری: الف) گرداب (نشان داده شده با فلش) و ب) پراکندگی ترکیب‌های شیمیایی متغیر.

به عبارت دیگر، آن‌ها مشابه گرداب‌های معمولی، مشاهده شده در مواد جوش انفجاری داده شده است. مناطق مخلوطی از نوع دوم (شکل ۲۷ - ب)) تنها از یک جریان همرفتی تشکیل شده است که شکل آن نسبت به مرکز متقارن نیست. این نواحی در مقایسه با مناطق نوع اول بسیار طولانی‌تر بود. چنین مورفولوژی از نواحی اختلاط معمولاً نشان می‌دهد که برای تولید نواحی از نوع اول سرعت برخورد به اندازه کافی بالا نیست.

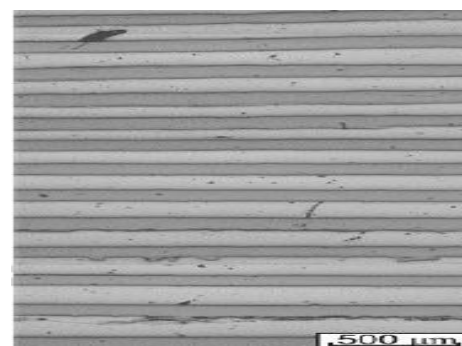
پودر Ammonite 6GV با چگالی  $0.9 \text{ g/cm}^3$  و سرعت انفجار  $4.2$  کیلومتر بر ثانیه به‌عنوان ماده انفجاری استفاده شد.

عملیات حرارتی کامپوزیت‌های جوش داده شده به روش انفجاری بر اساس دو رژیم انجام شده است. در رژیم اول، کامپوزیت جوش داده شده در یک کوره در دمای  $640$  درجه سلسیوس در اتمسفر هوا و تحت یک فشار استاندارد آنیل شد. در رژیم دوم به‌منظور بررسی تأثیر فشار بر روی فرآیند اتصال انجام شده است. دما  $640$  درجه سلسیوس بود و اتمسفر هوا استفاده شد. فشار  $3$  مگاپاسکال توسط یک پرس هیدرولیک ScamexRex ارائه شد.

سطح مقطع نمونه جوش داده شده به روش انفجاری در شکل (۲۵) نشان داده شده است.



شکل ۲۴ - شماتیک جوشکاری انفجاری [۳۸].



شکل ۲۵ - کامپوزیت چندلایه Ti-Al به‌دست آمده به روش انفجاری [۳۸].

به وضوح دیده می‌شود که کیفیت پیوند بین لایه‌ها خوب است. با این حال، تعداد کمی Macrovoid مشاهده شد، که احتمالاً به علت عدم همگن بودن مواد منفجره می‌باشد. مورفولوژی اتصال بین لایه‌های مختلف بستگی به موقعیت شان نسبت به لایه انفجاری دارد.

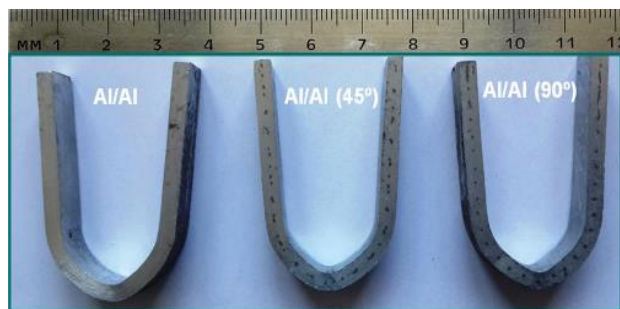


- مایع بین اجزای Ti و Al در دمای بالاتر از ۱۲۰۰ درجه سلسیوس تشکیل شود [۴۵]. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که تقریباً تفاوت ده برابری در ضخامت لایه‌های بین فلزی به دست آمده توسط واکنش پختن (۷ میکرون، شکل (۲۸ - a)) و آنیل کردن قطعه کار جوش انفجاری داده شده (۷۵ میکرون، شکل (۳۳ - b)). با این حال، ضخامت متوسط لایه‌های بین فلزی تولید شده توسط پختن واکنشی و جوشکاری انفجاری سپس آنیل کردن، کمی بالاتر بود از آن زمان که در شکل (۲۸) نشان داده شده است.

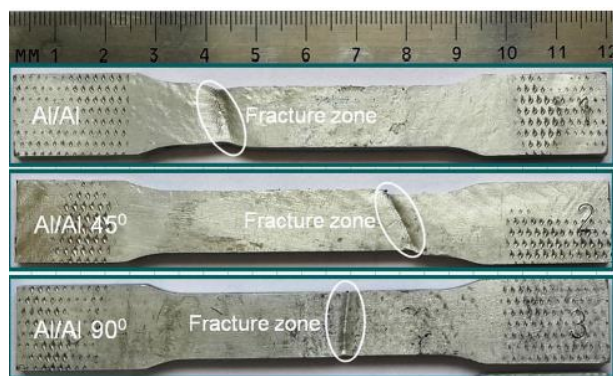
گولنک و همکاران [۴۶]، مطالعاتی بر روی تولید کامپوزیت پایه آلومینیومی که با سیم فولادی به روش جوشکاری انفجاری تقویت شده‌اند انجام داده‌اند که در این تحقیق از آلومینیوم خالص ۱۰۷۰ و سیم فولادی در دو جهت مختلف با زاویه‌های ۴۵ و ۹۰ درجه استفاده شده است. در این تحقیق سختی، استحکام کششی، چقرمگی، خمشی و ریزساختار مواد کامپوزیت انفجاری جوش داده شده مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نتایج نشان داد که کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم تقویت شده با سیم‌های فولادی زاویه ۴۵ درجه نسبت به زمینه‌های آلومینیوم بدون سیم فولادی دارای استحکام بالاتری می‌باشند [۴۶].

نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای در شکل (۲۹) نشان داده که هیچ جدایشی در فصل مشترک مواد کامپوزیت جوش داده شده پس از آزمون دیده نشده است. تصاویر نمونه‌ها پس از تست کشش در شکل (۳۰) نشان داده شده است.

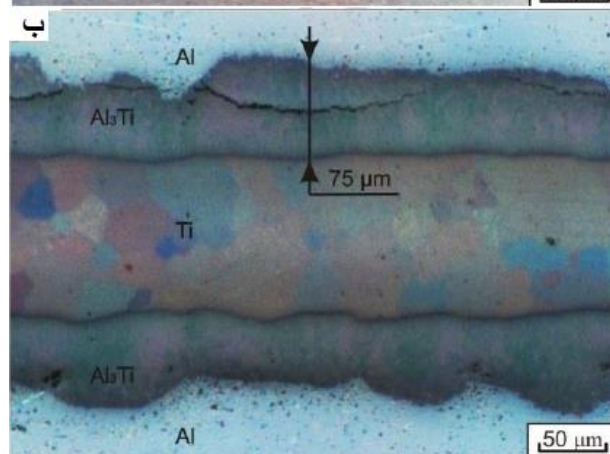
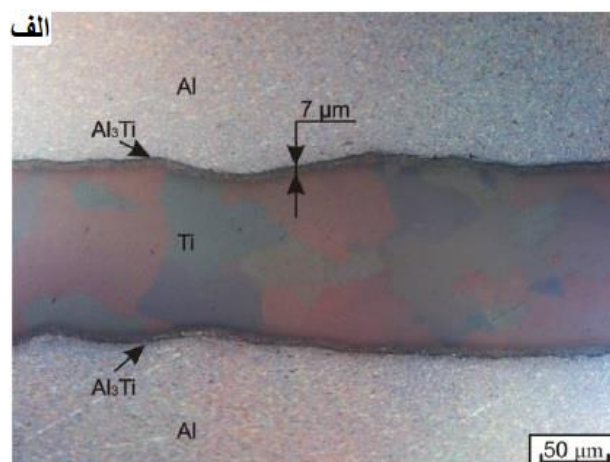


شکل ۲۹- تصویر نمونه‌ها بعد از آزمون خمش [۴۶].



شکل ۳۰- تصاویر نمونه‌ها پس از آزمون کشش [۴۶].

عملیات حرارتی نمونه‌های جوش داده شده و واکنش پختن در دمای ۶۴۰ درجه سلسیوس طی ۵ ساعت منجر به شکل‌گیری لایه بین فلزی پیوسته میان دو فاز Al و Ti شده است (شکل (۲۸)).

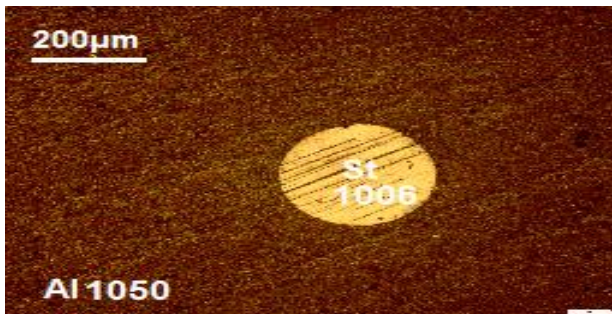


شکل ۲۸- الف) ساختار مواد حاصل از واکنش پختن صفحات Ti و Al در دمای ۶۴۰°C و زمان گرمایش ۵ ساعت و ب) کامپوزیت آنیل شده بعد از جوش انفجاری در دمای ۶۴۰°C و زمان گرمایش ۵ ساعت.

این ترکیب می‌تواند به‌طور مستقیم از طریق واکنش جامد - جامد یا جامد - مایع بین اجزای Ti و Al در دمای بالاتر از ۱۲۰۰ درجه سلسیوس تشکیل شود [۴۵]. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که تقریباً تفاوت ده برابری در ضخامت لایه‌های بین فلزی به دست آمده توسط واکنش پختن (۷ میکرون، شکل (۲۸ - الف)) و آنیل کردن قطعه کار جوش انفجاری داده شده (۷۵ میکرون، شکل (۲۸ - ب)). با این حال، ضخامت متوسط لایه‌های بین فلزی تولید شده توسط پختن واکنشی و جوشکاری انفجاری سپس آنیل کردن، کمی بالاتر بود از آن زمان که در شکل (۲۸) نشان داده شده است.

عملیات حرارتی نمونه‌های جوش داده شده و واکنش پختن در دمای ۶۴۰ درجه سلسیوس طی ۵ ساعت منجر به شکل‌گیری لایه بین فلزی پیوسته میان دو فاز Al و Ti شده است (شکل (۲۸)). این ترکیب می‌تواند به‌طور مستقیم از طریق واکنش جامد - جامد یا جامد





شکل ۳۱- تصاویر متالوگرافی نوری از مقطع فولادی در زمینه آلومینیومی [۴۷].

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج نشان داده شده است کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی به روش‌های مختلفی نظیر اختلاط در حالت مایع، آلیاژسازی مکانیکی و غیره تولید می‌شوند. یکی از روش‌های نوین مورد استفاده در تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی روش جوشکاری انفجاری می‌باشد. با مروری بر فعالیت تحقیقاتی انجام شده نتایج زیر گزارش شده است که عبارتند از:

۱. با استفاده از فرآیند جوشکاری انفجاری امکان تولید آلیاژهای مختلف آلومینیوم با تقویت کننده فولادی وجود دارد.
۲. خواص مکانیکی کامپوزیت پایه آلومینیومی به زاویه قرارگیری الیاف تقویت کننده وابسته است.
۳. استحکام کششی کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با سیم‌های فولادی نسبت به زمینه‌های آلومینیوم بدون تقویت کننده دارای استحکام کششی بالاتری می‌باشد.

نتایج نشان داد که روش جوشکاری انفجاری با انتخاب پارامترهای مناسب می‌تواند روشی مناسب برای تولید کامپوزیت پایه آلومینیومی، تقویت کننده با سیم فولادی باشد. در نهایت مشخص شد که خواص مکانیکی کامپوزیت پایه آلومینیومی وابسته به جهت سیم فولادی تقویت شده می‌باشد [۴۶].

رودباری و همکاران [۴۷]، مطالعاتی بر روی تولید کامپوزیت پایه آلومینیومی که با سیم فولادی به روش جوشکاری انفجاری تقویت شده‌اند انجام داده‌اند. در این تحقیق از آلومینیوم خالص ۱۰۵۰ و الیاف فولادی ۱۰۰۶ استفاده شده است. در این مقاله با استفاده از رسم پنجره جوشکاری پارامترهای مناسب فرآیند تعیین شده و چیدمان فرآیند جوشکاری انفجاری طراحی گردید. قطعات تولید شده با استفاده از این فرآیند مورد بررسی توسط میکروسکوپ نوری قرار گرفتند. نتایج متالوگرافی نشان داد که با انتخاب پارامترهای بهینه به کمک رسم پنجره جوشکاری، اتصال کامل فاز زمینه و تقویت کننده با استفاده از فرآیند جوشکاری انجام پذیرفته است و هیچگونه حفره و منطقه ذوبی و یا ترک در فصل مشترک بین آلومینیوم و الیاف فولادی به وجود نیامده است. همچنین نتایج نشان داد با استفاده از این فرآیند می‌توان آلیاژهای مختلف آلومینیوم با تقویت کننده فولادی تهیه نمود [۴۷].

در این تحقیق اتصال موفق زمینه آلومینیومی ۱۰۵۰ به سیم فولادی ۱۰۰۶ با استفاده از فرآیند جوشکاری انفجاری انجام پذیرفته و تصاویر میکروسکوپ نوری در شکل (۳۱) موید اتصال کامل بین آلومینیوم و فولاد است.

نتایج حل تحلیلی و آزمون‌های تجربی با یکدیگر در تطابق کامل هستند [۴۷].

#### مراجع

- [۱] علیزاده، علی؛ عبداللهی، علیرضا "مقدمه‌ای بر کامپوزیت‌های زمینه فلزی، کامپوزیت‌های نانو ساختار، روش‌های تولید، ویژگی‌ها و کاربردها"؛ تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۶.
- [۲] هنربخش رنوف، عباس؛ خورشیدی، ریحانه "روش‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی"؛ سمنان، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۱.
- [۳] اکبری موسوی، سید علی اصغر؛ نوروزپور، محمد؛ مکی، امین "بررسی فصل مشترک جوشکاری انفجاری اتصال سه لایه ورق‌های آلومینیوم ۵۰۸۳/آلومینیوم ۱۲۵۰/فولاد دریایی"؛ دانشگاه تهران، تهران: مواد پر انرژی، ۱۳۸۷، ۲۶-۱۱.
- [4] Lloyd, D. J. "Particle Reinforced Aluminium and Magnesium Matrix Composites"; Int. Mater. Rev. 2013.
- [5] Tan, M. J.; Zhang, X. "Powder Metal Matrix Composites: Selection and Processing"; Mater. Sci. Eng. 1998, 80-85.
- [6] Hashim, J.; Looney, L.; Hashmi, Hashmi. M. S. J. "Metal Matrix Composites: Production by the Stir Casting Method"; J. Mater. Proc. Tech. 1999, 92-93, 1-7.
- [7] Zhang, X. P.; Ye, L.; Mai, Y. W.; Quan, G.-F.; Wei, W. "Investigation on Diffusion Bonding Characteristics of SiC Particulate Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites (Al/SiCp-MMC). Composites"; Composites, 1999, 1415-1421.
- [8] Kaczmar, J. W.; Pietrzak, K.; Włosin-Åski, W. "The Production and Application of Metal Matrix Composite Materials"; J. Mater. Proc. Tech. 2000, 30, 58-67.
- [9] Mahfuz, H.; Adnan, A.; Vijaya, K.; Jang, Rangar. "Carbon Nanoparticles/Whiskers Reinforced Composites and their Tensile Response"; Composites, 2004, 35, 519-527.

- [10] Rhee, H.; Wilburn R. W.; Oppedal, A. L.; Sherif, A. R.; King, R. L.; Kim, H. J.; Lee, C. "Mechanical Properties of Novel Aluminum Metal Matrix Metallic Composites: Application to Overhead Conductors"; *Mater. Des.* 2015, 88, 16-21.
- [11] Ravikumar, K.; Kiran, K.; Sreebalaji, V. S. "Characterization of Mechanical Properties of Aluminium/Tungsten Carbide Composites"; *Meas.* 2017, 102, 142-149.
- [12] Nieto, A.; Yang, H.; Jiang, L.; Schoenung, J.M. "Reinforcement Size Effects on the Abrasive Wear of Boron Carbide Reinforced Aluminum Composites"; *Wear*, 2017, 390-39, 228-235
- [13] Kahraman, N.; Gulenc, B.; Findik, F. "Joining of Titanium/Stainless Steel by Explosive Welding and Effect on Interface"; *J. Mater. Proc. Tech.* 2005, 169, 127-133.
- [14] Zhang, W.; Ding, D.; Ping, G. "High Volume Fraction Si Particle-Reinforced Aluminium Matrix Composites Fabricated by a Filtration Squeeze Casting Route"; *Mater. Des.* 2016, 90, 834-838.
- [15] Kosec, B.; Kosec, L.; Cevink, G.; Fajfar, P.; Gojic, M.; Anzel, I. "Analysis of Interface at Explosive Welded Plates from Low-Carbon Steel and Titanium"; *Metalurgija*, 2004, 43, 83-86.
- [16] Cheng, J.; Yuan, H.; Chuan, T.; Wang, Yong H, Xuchao P. "Investigation on Shock-Induced Reaction Characteristics of an Al/Ni Composite Processed via Accumulative Roll-Bonding"; *Mater. Des.* 2017, 116, 591-598.
- [17] Rajesh Jesudoss Hynes, N.; Tharmaraj, R.; Shenbaga Velu, P. "Production of Aluminium Metal Matrix Composites by Liquid Processing Methods"; *AIP Conf. Proc.* 2016, 020558-1.
- [18] Anthymidis, K.; David, K.; Agrianidis, P.; Trakali, A. "Production of Al Metal Matrix Composites by the Stir-Casting Method"; *Key Eng. Mater.* 2014, 592-593, 614-617.
- [۱۹] باوی، امید؛ صالحی، منوچهر؛ باوی، نوید "مکانیک مواد مرکب"; تهران، انتشارات عابد، ۱۳۸۹، چاپ اول.
- [20] Ozdin, K. "Production of Metal Matrix Composites by the Vortex Method and Investigation of the Effect of Changing Casting Temperature on Particles Ratio of Product-Composite"; *Exp. Tech.* 2014, 38, 16-20.
- [21] Jose, J.; Eby, P. E.; Feby, J. A.; George, A. J.; Joseph, J.; Chandra, R. G.; Benjie, N. M. "Manufacture and Characterization of a Novel Agro-Waste Based Low Cost Metal Matrix Composite (MMC) by Compcasting"; *Mater. Res. Express.* 2018, 5.
- [22] Rajan, T. P. D.; Pillai, R. M.; Pai, B. C.; Satyanarayana, K. G.; Rohatgi, P. K. "Fabrication and Characterisation of Al-7Si-0.35Mg/Fly Ash Metal Matrix Composites Processed by Different Stir Casting Route"; *Compos. Sci. Tech.* 2007, 67, 3369-3377.
- [23] Youqiang, Y.; Zhefeng, X.; Kenjiro, S.; Yongbum, Ch.; Kazuhiro, M.; Shaoming, K.; Ruidong, F.; Gen, S. "Fabrication of Vapor-Grown Carbon Fiber-Reinforced Magnesium-Calcium Alloy Composites by Compo-Casting Process"; *Mater. Trans.* 2017, 58, 673-678.
- [24] Braszczyńska-Malik, K. N.; Kamieniak, J. "AZ91 Magnesium Matrix Foam Composites with Fly Ash Cenospheres Fabricated by Negative Pressure Infiltration Technique"; *Mater. Charact.* 2017, 128, 209-216.
- [25] Lii, D. F.; Huang, J. L.; Chang, S. T. "The Mechanical Properties of AlN/Al Composites Manufactured by Squeeze Casting"; *J. Eur. Ceram. Soc.* 2002, 22, 253-261.
- [26] Balasubramanian, I.; Maheswaran, R.; Manikandan, V.; Patil, N.; Ayyanar Raja, M.; Singari, R. M. "Mechanical Characterization and Machining of Squeeze Cast AZ91D/SiC Magnesium Based Metal Matrix Composites"; *Procedia Manufacturing*, 2018, 20, 97-105.
- [27] Ferreira, L. M. P.; Robert, M. H.; Bayraktar, E.; Zaimova, D. "New Design of Aluminium Based Composites through Combined Method of Powder Metallurgy and Thixoforming"; *Adv. Mater. Res.* 2014, 939, 68-75.
- [28] Mortensen, A.; Jin, I. "Solidification Processing of Metal Matrix Composites"; *Int. Mater. Rev.* 1992, 37, 101-128.
- [29] Ozdemir, I.; Muecklich, S.; Podlesak, H.; Wielage, B. "Thixoforming of AA 2017 Aluminum Alloy Composites"; *J. Mater. Proc. Tech.* 2011, 211, 1260-1267.
- [30] Holmquist, T.; Johnson, G. "Response of Silicon Carbide to High Velocity Impact"; *Int. J. Appl. Phys.* 2002, 91, 5858-5866.
- [31] Tavakol, M.; Mahnama, M.; Naghdabadi, R. "Shock Wave Sintering of Al/SiC Metal Matrix Nano-Composites: A Molecular Dynamics Study"; *Comput. Mater. Sci.* 2016, 125, 255-262.
- [32] Holmquist, T.; Johnson, G. "Response of Silicon Carbide to High Velocity Impact"; *Int. J. Appl. Phys.* 2002, 91, 5858-5866.
- [33] Strossner, K.; Cardona, M. "High Pressure X-Ray Investigations on 3C-SiC"; *Solid State Commun.* 1987, 63, 113-114.
- [34] Yu, Y.; Ma, H.; Zhao Zhao, K.; Shen, Z.; Cheng, Y. "Study on Underwater Explosive Welding of Al-Steel Coaxial Pipes"; *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* 2017, 14, 251-265.
- [35] Durgutlu, A.; Gülcenc, B.; Findik, F. "Examination of Copper/Stainless Steel Joints Formed by Explosive Welding"; *Mater. Des.* 2005, 26, 497-507.
- [36] Sun, W.; Li, X.; Yan, H.; Hokamoto, K. "Effect of Initial Hardness on Interfacial Features in Underwater Explosive Welding of Tool Steel SKS3"; *J. Mater. Eng. Perform.* 2013, 23, 421-428.

- [37] Gerland, M.; Presles, H. N.; Guin, J. P.; Bertheau, D. "Explosive Cladding of a Thin Ni-Film to an Aluminum Alloy"; *Mater. Sci. Eng.* 2000, 280, 311-319.
- [38] Lazurenko, D. V.; Bataev, I. A.; Mali, V. I.; Bataev, A. A.; Maliutina, Iu. N.; Lozhkin, V. S.; Esikov, M. A.; Jorge, A. M. J. "Explosively Welded Multilayer Ti-Al Composites: Structure and Transformation During Heat Treatment"; *Mater. Des.* 2016, 102, 122-130.
- [39] Vecchio, K. S. "Synthetic Multifunctional Metallic-Intermetallic laminate Composites"; *JOM.* 2005, 57, 25-31.
- [40] Chung, D. S.; Enoki, M.; Kishi, T. "Microstructural Analysis and Mechanical Properties of in Situ Nb/Nb-Aluminide Layered Materials"; *Sci. Tech. Adv. Mater.* 2002, 3, 129-135.
- [41] Kuk, S. W.; Yu Yu, J.; Ryu, H. J. "Effects of Interfacial Al Oxide layers: Control of Reaction Behavior in Micrometer-Scale Al/Ni Multilayers"; *Mater. Des.* 2015, 7, 84, 372-377.
- [42] Wang, Y.; Vecchio, K. S. "Microstructure Evolution in Fe-Based-Aluminide Metallic Intermetallic Laminate (MIL) Composites"; *J. Mater. Sci. Eng. A.* 2016, 37, 325-337.
- [43] Zhang, N.; Wang, W.; Cao, X.; Wu, J. "The Effect of Annealing on the Interface Microstructure and Mechanical Characteristics of AZ31B/AA6061 Composite Plates Fabricated by Explosive Welding"; *Mater. Des.* 2015, 65, 1100-1109.
- [44] Manikandan, P.; Hokamoto, K.; Deribas, A. A.; Raghukandan, K.; Tomoshige, R. "Explosive Welding of Titanium/Stainless Steel by Controlling Energetic Conditions"; *Mater. Trans.* 2006, 47, 2049-2055.
- [45] Sujata, M.; Bhargava, S.; Sangal, S. "On the Formation of TiAl<sub>3</sub> During Reaction Between Solid Ti and Liquid Al"; *J. Mater. Sci. Lett.* 1997, 16, 1175-1178.
- [46] Gülenç, B.; Kaya, Y.; Durgutlu, A.; Gülenç, İ. T. "Production of Wire Reinforced Composite Materials Through Explosive Welding"; *Archives of civil and mechanical engineering.* 2016, 16, 1-8.

[47] رودباری، مریم؛ رفاهتی، نیما؛ مهدی پور عمرانی، علی "ساخت کامپوزیت پایه آلومینیومی تقویت شده با الیاف فولادی ۱۰۰۶ به روش جوشکاری انفجاری"؛ بیست و هفتمین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، ۱۳۹۸، ۱۸۰-۱۸۴.