

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
۱	چکیده
۲	فصل اول: مقدمه
۶	فصل دوم: مطالعات مروری
۶	۱-۲- کامپوزیت های زمینه فلزی
۸	۲-۲- زمینه
۸	۳-۲- تقویت کننده
۹	۴-۲- کامپوزیت های زمینه آلومینیم
۹	۵-۲- فراوری و ساخت کامپوزیت های زمینه فلزی
۱۰	۱-۵-۲- فرایندهای متالورژی پودر
۱۰	۲-۵-۲- فرایندهای مایع (ریخته گری)
۱۱	۲-۵-۲- الف- ریخته گری همزدنی (گردابی)
۱۲	۲-۵-۲- ب- سیالیت کامپوزیت های زمینه فلزی
۱۳	۶-۲- ترشوندگی
۱۴	۱-۶-۲- عوامل کاهش ترشوندگی
۱۵	۲-۶-۲- روش های افزایش ترشوندگی
۱۶	۷-۲- انجماد کامپوزیت ها
۱۷	۸-۲- روش درجا
۱۹	۱-۸-۲- روش های واکنش جامد-مایع
۲۰	۲-۸-۲- روش های واکنش جامد-جامد
۲۰	۳-۸-۲- روش واکنش مایع-مایع
۲۰	۹-۲- کامپوزیت های زمینه آلومینیم درجا
۲۲	۱۰-۲- روش های جامد-جامد ساخت کامپوزیت درجا از طریق واکنش آلومینوترمی

۲۲	۱۰-۲-۱ فعال کردن حرارتی واکنش های شیمیایی
۲۳	۱۰-۲-۲ فعال سازی مکانیکی واکنش های شیمیایی
۲۵	۱۰-۲-۳ فعال کردن مکانیکی - حرارتی واکنش های شیمیایی
۲۶	۱۱-۲ تأثیر ذرات تقویت کننده ی تولید شده برافزایش استحکام کامپوزیت زمینه فلزی
۲۶	۱۲-۲ بررسی عوامل موثر در انتخاب اکسید بر
۲۷	۱۲-۲-۱ خواص فیزیکی و شیمیایی اکسید بر
۲۷	۱۲-۲-۲ نمودار فازی ۲ تایی Al-B
۲۹	۱۲-۲-۳ بررسی ترمودینامیکی واکنش آلومینیم با اکسید غیرفلزی بر
۳۰	۱۳-۲ جمع بندی
۳۶	فصل سوم: مواد و روش تحقیق
۳۶	۳-۱-۱ مواد اولیه
۳۲	۳-۲-۱ تجهیزات مورد استفاده
۳۳	۳-۳-۱ ساخت کامپوزیت
۳۳	۳-۳-۱-۱ فعال سازی مکانیکی
۳۴	۳-۳-۲ پارامترهای فرایند
۳۴	۳-۳-۳ پارامترهای مورد مطالعه
۳۵	۳-۴-۱ ریخته گری
۳۵	۳-۵-۱ آنالیز حرارتی تفاضلی (DTA)
۳۵	۳-۶-۱ فازشناسی نمونه ها
۳۵	۳-۷-۱ بررسی میکروسکوپی
۳۵	۳-۸-۱ ارزیابی خواص مکانیکی
۳۵	۳-۸-۱-۱ سختی سنجی
۳۶	۳-۸-۲ آزمون کشش
۳۶	۳-۸-۳ آزمون خمش
۳۷	فصل چهارم: نتایج و بحث
۳۷	۴-۱-۱ اثر ترشوندگی ذرات در واکنش مذاب آلومینیم و اکسید بر
۳۸	۴-۲-۱ بررسی واکنش احیای اکسید بر با استفاده از آنالیز حرارتی
۴۰	۴-۳-۱ روش کاهش دمای شروع واکنش آلومینیم و اکسید بر
۴۱	۴-۴-۱ بهینه سازی زمان آسیاکاری مخلوط آلومینیم و اکسید بر

۴۳	۵-۴- بررسی مخلوط پودری حاصل با استفاده از منحنی‌های آنالیز حرارتی.....
۴۳	۴-۵-۱- آنالیز گرماسنجی وزنی.....
۴۳	۴-۵-۲- آنالیز حرارتی تفاضلی.....
۴۶	۴-۶- بررسی میکروسکوپی پودرهای فعال شده.....
۴۷	۴-۷- بررسی علل کاهش دما.....
۴۸	۴-۸- ساخت نمونه‌های کامپوزیتی آلومینیم- آلومینا با استفاده از پودر فعال شده.....
۴۹	۴-۹- بررسی کیفی کامپوزیت ریختگی آلومینیم- آلومینا.....
۴۹	۴-۱۰- مشخصه‌یابی ذرات کامپوزیت ریختگی ساخته شده.....
۵۲	۴-۱۱- ارزیابی خواص مکانیکی کامپوزیت ریختگی ساخته شده.....
۵۲	۴-۱۱-۱- استحکام تسلیم.....
۵۳	۴-۱۱-۲- استحکام کششی نهایی.....
۵۴	۴-۱۱-۳- درصد افزایش طول.....
۵۵	۴-۱۱-۴- استحکام خمشی.....
۵۵	۴-۱۱-۵- میکرو سختی.....
۵۶	۴-۱۲- جمع‌بندی.....
۵۷	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....
۵۷	۵-۱- نتایج.....
۵۸	۵-۲- پیشنهادات.....
۵۹	مراجع.....

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۲-۱- ساختار نمادین انواع کامپوزیت‌های زمینه فلزی.....	۷
شکل ۲-۲- طرح نمادین ریخته‌گری همزدنی در تولید کامپوزیت زمینه فلزی ذره‌ای.....	۱۲
شکل ۲-۳- طرح نمادین یک قطره مایع روی سطح جامد.....	۱۳
شکل ۲-۴- حالت‌های نمادین اندرکنش ذره- فصل مشترک به صورت تابعی از مورفولوژی فصل مشترک.....	۱۸
شکل ۲-۵- نمودار فازی ۲ تایی Al-B.....	۲۸
شکل ۳-۱- تصویر میکروسوپ الکترونی روبشی ذرات پودر اکسید بر پس از آسیاکاری اولیه.....	۳۶
شکل ۳-۲- تصویر میکروسوپ الکترونی روبشی ذرات پودر آلومینیم.....	۳۲
شکل ۳-۳- نمایی از کوره‌ی مقاومتی به همراه همزن الکترو مکانیکی.....	۳۳
شکل ۳-۴- نمونه کشش ساخته شده.....	۳۶
شکل ۳-۵- شمایی از آزمون خمش.....	۳۶
شکل ۴-۱- نمودار آنالیز حرارتی مخلوط آلومینیم و اکسید بر.....	۳۹
شکل ۴-۲- الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط $B_2O_3-49 \text{ wt.}\% \text{ Al}$ قبل از آنالیز حرارتی.....	۴۰
شکل ۴-۳- الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط $B_2O_3-49 \text{ wt.}\% \text{ Al}$ بعد از آنالیز حرارتی.....	۴۰
شکل ۴-۴- الگوی پراش پرتوی ایکس برای نمونه‌ی خام (آسیاکاری نشده) و نمونه‌های آسیاکاری شده.....	۴۲
شکل ۴-۵- نمودار کاهش وزن نمونه‌ی آسیاکاری نشده و آسیاکاری شده برای مدت زمان‌های مختلف.....	۴۴
شکل ۴-۶- نمودار آنالیز حرارتی تفاضلی نمونه‌ی آسیاکاری نشده و نمونه‌های آسیاکاری شده.....	۴۴
شکل ۴-۷- الگوی پراش پرتوی ایکس برای نمونه‌های خام و آسیاکاری شده برای زمان‌های مختلف.....	۴۵
شکل ۴-۸- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مخلوط پودری خام (الف) و آسیاکاری شده.....	۴۶
شکل ۴-۹- الگوی پراش پرتوی ایکس برای کامپوزیت ریختگی آلومینیم- آلومینا با ۶ درصد وزنی آلومینا.....	۴۹
شکل ۴-۱۰- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به کامپوزیت ریختگی.....	۵۰
شکل ۴-۱۱- آنالیز انرژی نقطه‌ای (EDS) مربوط به زمینه (B) و ذره (C).....	۵۰
شکل ۴-۱۲- نمودار آنالیز انرژی نقطه‌ای نمونه‌ی کامپوزیتی الف) زمینه، ب) ذره.....	۵۱
شکل ۴-۱۳- استحکام کششی نهایی نمونه‌های کامپوزیتی بر حسب درصدهای تقویت کننده‌ی اسمی.....	۵۴

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲- انواع تقویت کننده‌های معمول مورد استفاده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی	۹
جدول ۲-۲- مقایسه خواص کششی آلومینیم خالص و کامپوزیت‌های Al-20 Vol\% TiB_2	۱۹
جدول ۲-۳- اطلاعات فیزیکی و شیمیایی اکسید بر	۲۷
جدول ۲-۴- سیستم کریستالی ترکیبات برآیدی آلومینیم در دماهای مختلف	۲۸
جدول ۲-۵- آنتالپی و انرژی آزاد اکسیدهای فلزی در واکنش آلومینوترمی	۲۹
جدول ۳-۱- آنالیز شمش آلومینیم	۳۲
جدول ۳-۲- شرایط ساخت نمونه‌ها در دمای 730°C و 600 rpm	۳۴
جدول ۴-۱- دمای اولین واکنش گرمای انجام شده	۴۶
جدول ۴-۲- ترکیب شیمیایی حاصل از آنالیز انرژی نقطه‌ای	۵۱
جدول ۴-۳- استحکام تسلیم نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده	۵۳
جدول ۴-۴- درصد افزایش طول نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده	۵۴
جدول ۴-۵- استحکام خمشی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده	۵۵
جدول ۴-۶- سختی نمونه‌های ریختگی	۵۶

چکیده

کامپوزیت‌های زمینه فلزی دسته‌ای از مواد پیشرفته مهندسی هستند که به دلیل خواص منحصر به فردشان، کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. این مواد از یک زمینه فلزی و یک فاز تقویت‌کننده معمولاً سرامیکی تشکیل می‌شوند. از بین فلزات متداول، آلومینیم و آلیاژهای آن بیشترین کاربرد را به عنوان زمینه در ساخت کامپوزیت‌ها پیدا کرده‌اند و امروزه این کامپوزیت‌ها با استفاده از تقویت‌کننده‌های متنوعی تولید می‌شوند. در این پژوهش یک نوع کامپوزیت آلومینیم-آلومینای ذره‌ای در جا، با استفاده از اکسید غیر فلزی (شبه فلزی) بر و در حالت مذاب تولید شده است. با در نظر گرفتن خصوصیت آلومینیم در احیای اکسیدهای فلزی طی یک واکنش آلومینوترمی، ابتدا مخلوطی از پودر آلومینیم و اکسید بر در آسیاب گلوله‌ای پرانرژی فعال و سپس با هدف انجام واکنش آلومینوترمی به منظور احیای اکسید بر به صورت درجا در داخل مذاب، پودر فعال تولید شده به مذاب اضافه شد. آنالیز حرارتی مخلوط پودری اولیه نشان از انجام واکنش آلومینوترمی در حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد داشت. پس از شروع آسیاکاری، برای اطمینان از فعال شدن و همچنین عدم انجام واکنش آلومینوترمی حین آسیاکاری، مخلوط پودری آلومینیم و اکسید بر در زمان‌های مختلف به ترتیب تحت آنالیز حرارتی و آزمون پراش پرتوی ایکس قرار گرفت. نتایج حاصل از آنالیز حرارتی بیانگر کاهش تدریجی دمای انجام واکنش از حدود ۱۰۰۰ به حدود ۶۰۰ درجه سانتیگراد بود. همچنین نتایج آزمون پراش پرتوی ایکس حاکی از این بود که با آسیاکاری مخلوط پودری به مدت حدود ۳۰ ساعت، واکنش در محفظه‌ی آسیاب انجام شد. طی فرایند ریخته‌گری گردابی، پس از افزودن پودر فعال شده به گرداب حاصل از چرخش همزن، دوغاب کامپوزیتی در یک قالب فلزی استوانه‌ای ریخته‌گری و منجمد شد. ریزساختار نمونه‌های کامپوزیتی ریخته‌گری به صورت کیفی و کمی ارزیابی و مشاهده گردید. ذرات آلومینا در اثر واکنش درجا در زمینه پراکنده شده‌اند. خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی با نمونه غیر کامپوزیتی متناظر آن مقایسه و نتایج نشان داد بالاترین درصد در افزایش استحکام کششی نهایی حدود ۶۵ درصد و بالاترین افزایش سختی حدود ۳۵ درصد است. همچنین مطابق انتظار درصد افزایش طول کاهش یافت.

کلمات کلیدی: کامپوزیت زمینه فلزی، روش درجا، واکنش آلومینوترمی، ریخته‌گری گردابی، ریزساختار

فصل اول

مقدمه

بهبود مستمر خواص مواد که با معیارهایی مانند کاهش وزن، تولید اقتصادی و استحکام بالاتر ارزیابی می‌شود، برای پیشرفت علم و تکنولوژی امری ضروری است. در تلاش برای بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی، دانشمندان و مهندسان سعی می‌کنند مواد موجود را اصلاح کرده و یا مواد جدید را توسعه دهند. نمونه‌ای از مواد جدید کامپوزیت‌ها یا مواد مرکب هستند. کامپوزیت ماده‌ای است که از اختلاط دو یا چند ماده با خواص متفاوت بدست می‌آید و دارای خواصی است که هیچ یک از مواد تشکیل دهنده آن به تنهایی ندارند. خشت و چوب نمونه‌هایی از کاربرد تاریخی کامپوزیت‌ها در تمدن‌های کهن هستند، اما در حال حاضر کامپوزیت به ماده‌ای اطلاق می‌شود که از فازهای غیرمشابه که توسط یک فصل مشترک از هم جدا شده‌اند، ساخته شده باشد. در دهه‌های اخیر علاقه به تولید و کاربرد مواد کامپوزیتی افزایش یافته به نحوی که بشر با قرار دادن تقویت‌کننده‌های مختلف در زمینه‌های گوناگون، موادی برای کاربردهای متنوع مهندسی طراحی می‌کند. در این مواد جدید خواص زمینه¹ یا بعبارتی فاز پیوسته که معمولاً درصد بیشتر کامپوزیت را تشکیل می‌دهد، با حضور فاز تقویت‌کننده² بهبود پیدا می‌کند. مواد کامپوزیتی را می‌توان بر اساس معیارهای مختلف دسته‌بندی نمود. در یک طبقه‌بندی، کامپوزیت‌ها بر اساس نوع زمینه و یا تقویت‌کننده تقسیم بندی می‌شوند. در طبقه بندی بر اساس نوع زمینه، کامپوزیت‌ها به سه گروه زمینه پلیمری، زمینه فلزی و زمینه سرامیکی تقسیم می‌شوند. در کلی‌ترین طبقه‌بندی بر اساس نوع تقویت‌کننده، کامپوزیت‌ها به تقویت شده با الیاف و یا تقویت شده با ذرات تقسیم می‌شوند.

¹ Matrix

² Reinforcement

کامپوزیت‌های زمینه فلزی معمولاً شامل زمینه‌ای از آلیاژهای سبک مثل آلومینیم، منیزیم و یا تیتانیم هستند و در مواقعی که وزن پارامتر بحرانی نباشد آلیاژها و فلزاتی مانند آهن، نیکل، مس، کبالت، نقره و روی نیز به عنوان زمینه فلزی استفاده می‌شوند. کامپوزیت‌های زمینه فلزی دارای خواصی مانند استحکام زیاد، مقاومت به سایش و خستگی خوب، هدایت الکتریکی و حرارتی مناسب و دمای کاری بالا هستند. به دلیل داشتن این خواص از آن‌ها به عنوان جانشین آلیاژهای متداول به ویژه در قطعات اتومبیل، صنایع هوایی و نظامی استفاده می‌شود.

انتخاب نوع و جنس فاز تقویت‌کننده تابعی از نوع زمینه، خواص مورد نظر کامپوزیت و روش فراوری است. مواد تقویت‌کننده‌ی متداول شامل کاربیدها، نیتريد‌ها، اکسیدها و برخی مواد خالص مانند گرافیت هستند. پارامترهای اصلی در تعیین اثربخشی تقویت‌کننده شکل، اندازه، توزیع و پیوند آن با زمینه در فصل مشترک است. به طور کلی تقویت‌کننده‌های الیافی نسبت به تقویت‌کننده‌های ذره‌ای تأثیر بیشتری در بهبود خواص مکانیکی دارند، با این حال، چون فرایندهای تولید کامپوزیت با تقویت‌کننده‌ی الیافی مشکل است، تقویت‌کننده‌های ذره‌ای برای کاربردهایی که بارگذاری شدید و یا شرایط دمایی خاص وجود ندارد ترجیح داده می‌شوند. از طرف دیگر در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف برخی خواص به صورت جهت دار بهبود می‌یابد که می‌تواند موجب ناهمسانگردی در قطعه شود.

جهت‌گیری تحقیق و توسعه در علوم و فنون کامپوزیت‌ها به نحوی بوده است که در حال حاضر فراوری آن‌ها بصورت سیستم‌های مختلف کامپوزیتی امکان پذیر است. در حالی که استفاده روزمره از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری در حال گسترش است، هنوز تحقیقات در زمینه کامپوزیت‌های سرامیکی و فلزی در حال انجام است تا راه حل‌های تازه‌ای برای مشکلات فراوری آن‌ها پیدا شود. در مورد کامپوزیت‌های زمینه فلزی مهمترین نیروی محرکه صنایع هوایی هستند که انتظار دارند این مواد جانشین بتوانند راه حلی مهندسی برای کاهش وزن باشند. با اینکه کامپوزیت‌های زمینه فلزی مزایای زیادی مانند کاهش وزن و خواص ارتقا یافته دارند، هنوز هزینه فراوری به عنوان بزرگ ترین مانع برای توسعه بیشتر کاربرد آن‌ها به شمار می‌رود. هم اکنون در جهت توسعه کامپوزیت‌های زمینه فلزی تلاش می‌شود تا آن‌ها از موادی گران و با کاربرد محدود در صنایع هوایی به موادی ارزان و با کاربرد وسیع در صنایع اتومبیل تبدیل شوند.

کامپوزیت‌های فلزی با تقویت‌کننده غیر پیوسته بدلیل داشتن خواص ایزوتروپ، در مقایسه با کامپوزیت‌های با تقویت‌کننده پیوسته که فراوری آسانتر با روش‌های استاندارد دارند، در سال‌های اخیر مورد توجه بیشتر قرار گرفته‌اند. بیشترین تمرکز تحقیق و توسعه در مورد کامپوزیت‌های با تقویت‌کننده‌ی غیر پیوسته روی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم یا آلیاژهای آن بوده است. دمای فراوری پایین‌تر و سازگاری با تقویت‌کننده‌های مختلف باعث پیشرفت تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینوم تا مرحله تولید اقتصادی شده است.

برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به دو گروه کلی حالت جامد و حالت مایع تقسیم بندی کرد. روش‌های حالت جامد برای حصول خواص مکانیکی بالا و کاربردهای ویژه مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی برای اکثر کاربردهای تجاری با فرایندهای حالت مایع تولید می‌شوند. روش‌های حالت مایع دارای مزایایی نسبت به روش حالت جامد هستند. به عنوان مثال تهیه

شمش نسبت به پودر فلزات ارزانتر و حمل آن آسان تر است. همچنین می توان قطعات کامپوزیتی را با اشکال و ابعاد گوناگون با استفاده از روش های ریخته گری توسعه یافته برای فلزات غیر کامپوزیتی تولید کرد. در یک طبقه بندی دیگر کامپوزیت های زمینه فلزی براساس نحوه ساخت به دو گروه برون جا^۱ و درجا^۲ تقسیم می شوند. در روش برون جا ماده تقویت کننده جداگانه، قبل از ساخت کامپوزیت، آماده شده و سپس بدون انجام هیچ واکنشی به فلز زمینه افزوده می شود. در روش درجا فاز تقویت کننده از طریق واکنش شیمیایی بین مواد تشکیل دهنده آن همزمان با ساخت کامپوزیت تشکیل می شود و یا در یک فرایند انجماد کنترل شده تقویت کننده طی یک استحاله فازی از مذاب رسوب می کند.

برخی از محققان کامپوزیت های زمینه فلزی درجا را نسل دوم کامپوزیت های زمینه فلزی دانسته اند. به دلیل مزایای بالقوه ای که کامپوزیت های درجا نسبت به کامپوزیت های متداول دارند، در سال های اخیر فرایندهای جدیدی برای ساخت آن ها توسعه یافته است. یکی از روش های ساخت کامپوزیت زمینه فلزی درجا از طریق واکنش های ترمیت و تشکیل یک ترکیب پایدارتر نسبت به مواد واکنش کننده است. برای مثال احیای اکسیدهای فلزی و غیر فلزی توسط آلومینیم و تشکیل آلومینا به عنوان تقویت کننده به صورت درجا از طریق واکنش آلومینوترمی یک روش متداول برای ساخت این کامپوزیت ها است.

هدف از این پژوهش توسعه یک روش ساخت کامپوزیت آلومینیم-آلومینا به روش درجا و از طریق احیای اکسید غیر فلزی بر و بررسی و ارزیابی واکنش انجام شده و محصول آن است. با توجه به خصوصیات منحصر به فرد بر و اکسید آن و از آنجایی که تلاشی برای ساخت کامپوزیت آلومینیم-آلومینا به روش درجا و از طریق احیای اکسید غیر فلزی بر در مذاب آلومینیم انجام نشده، در این پژوهش ساخت و بررسی این کامپوزیت در دستور کار قرار گرفته است.

یکی از چالش های پیش روی در انجام این پژوهش بالا بودن دمای شروع واکنش آلومینوترمی بین واکنش کننده ها است. به طور کلی دمای شروع واکنش های آلومینوترمی، بالا است و در برخی موارد باعث می شود کاربرد آن ها از نظر فنی غیر قابل توجه باشد. فعال سازی مکانیکی تکنیکی است که برای غلبه بر این مشکل و کاهش دمای شروع واکنش آلومینوترمی به کار برده می شود. در این تحقیق نیز ابتدا مخلوط پودری آلومینیم و اکسید بر به صورت مکانیکی فعال گردید. سپس در یک فرایند حرارتی، واکنش آلومینوترمی انجام شد و با استفاده از نتایج حاصل واکنش بین آلومینیم و اکسید بر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در تمام تحقیقات اخیر برای ساخت کامپوزیت آلومینیم-آلومینا به روش درجا با احیای اکسید بر، پودر آلومینیم نقش زمینه را داشته است، در حالی که در تحقیق حاضر برای اولین بار واکنش آلومینیم و اکسید بر در مذاب آلومینیم انجام گرفت. در حقیقت در این پژوهش از تلفیق مزایای روش های حالت جامد و حالت مایع و به عنوان روش ساخت حالت جامد-مایع برای تولید کامپوزیت استفاده شد. مهمترین عواملی که این پژوهش را از سایر تحقیقات متمایز می کند عبارتند از:

- استفاده از روش ذوبی برای ساخت کامپوزیت آلومینیم-آلومینای درجا با احیای اکسید بر

¹ Ex-situ

² In-situ

- بررسی اثر فعال‌سازی مکانیکی بر روی واکنش آلومینیم و اکسید بر با استفاده از آزمون‌های حرارتی
 - کاهش دمای فرایند مایع ساخت کامپوزیت آلومینیم-آلومینای درجا در مقایسه با فرایندهای متداول
 - ایجاد ذرات تقویت‌کننده با میانگین ابعاد در حد چند میکرومتر به صورت درجا در روش ذوبی
- پایان‌نامه‌ی حاضر در ۵ فصل ارائه شده است. در فصل دوم مهمترین مباحث علمی و تئوری مرتبط با پژوهش به طور خلاصه مطرح شده‌اند. این فصل در چند بخش کلی شامل کامپوزیت‌های زمینه فلزی، کامپوزیت‌های درجا و روش‌های ساخت آن‌ها ارائه گشته است. در فصل سوم مواد، تجهیزات و روش انجام آزمایش‌ها تشریح گردیده است. فصل چهارم به ارائه نتایج و بحث و تحلیل در مورد آن‌ها پرداخته و در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای کارهای آینده بیان شده است.

فصل دوم

مطالعات مروری

۲-۱- کامپوزیت‌های زمینه فلزی

در دو دهه‌ی گذشته کارهای تحقیقاتی بسیار زیاد و قابل توجهی با موضوع کامپوزیت‌های زمینه فلزی^۱ انجام شده است [۱]. در این دوران کامپوزیت‌های زمینه فلزی از یک موضوع صرفاً علمی و تحقیقاتی به موادی با اهمیت فنی و اقتصادی تبدیل شده‌اند به نحوی که بازار جهانی آن‌ها در سال ۱۹۹۹ به حدود ۲۵۰۰ تن و ارزش بیش از ۱۰۰ میلیون دلار رسید [۲].

به طور کلی کامپوزیت زمینه فلزی به ماده‌ای گفته می‌شود که از یک فاز پیوسته فلزی یا زمینه و یک فاز تقویت‌کننده تشکیل شده باشد [۳]. با این تعریف کامپوزیت‌های زمینه فلزی موادی مثل آلیاژهای یوتکتیک جهت دار منجمد شده^۲، آلیاژهای مستحکم شده با توزیع فازهای اکسیدی^۳، آلیاژهای ریختگی یوتکتیک آلومینیم-سیلیسیم و حتی گاهی فولادهای پرلیتی و آلیاژهای دوفازی لایه‌ای^۴ را شامل می‌شود [۴]. البته معمولاً فاز تقویت‌کننده یک ماده غیرفلزی و اغلب سرامیکی است [۳]. ایده طراحی کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با فازهای سرامیکی تجمع خواص مطلوب فاز و سرامیک در یک ماده واحد است [۵-۷]. در گذشته فازهای سرامیکی در فلزات به عنوان ناخالصی‌های عمدتاً ناخواسته در نظر گرفته می‌شدند که استحکام و انعطاف پذیری را کاهش می‌دادند [۸]، در حالی که هم اکنون از فازهای سرامیکی برای بهبود خواص فلزات از طریق ساخت کامپوزیت استفاده می‌شود.

¹ Metal Matrix Composite (MMC)

² Directionally Solidified Eutectic Alloys

³ Oxide Dispersion Strengthened Alloys

⁴ Two-Phase Lamellar Alloys

کامپوزیت‌های زمینه فلزی در مقایسه با فلز زمینه دارای خواصی همچون استحکام، مدول الاستیک و سفتی^۱ بالاتر، استحکام خزشی و مقاومت به سایش بهتر و ضریب انبساط حرارتی کمتر هستند [۹]. در مقابل انعطاف‌پذیری پایین-تر و فرایندهای تولید گران‌تر و پیچیده‌تر مهمترین معایب کامپوزیت‌های زمینه فلزی در مقایسه با روش‌های معمول ساخت قطعات فلزی تقویت نشده هستند [۱۰].

به طور کلی می‌توان کامپوزیت‌های زمینه فلزی را براساس شکل تقویت کننده به سه نوع تقسیم نمود [۱۱]:

الف) کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات^۲

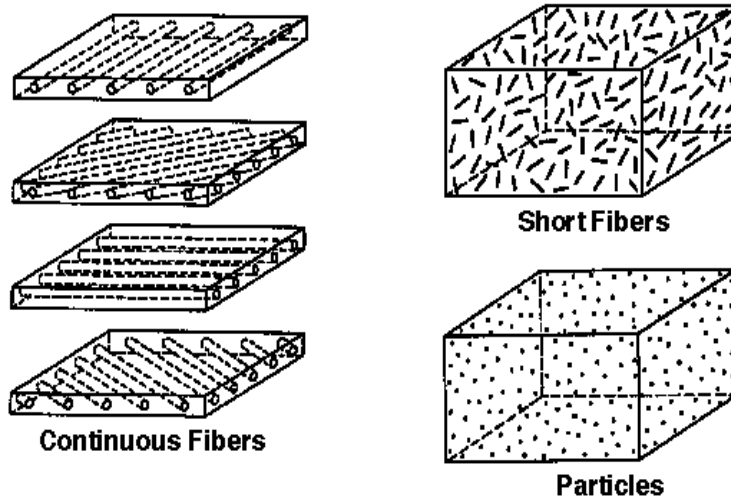
ب) کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با الیاف کوتاه^۳ یا ویکسرها^۴

ج) کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با الیاف پیوسته^۵

شکل ۱-۲ سه نوع اصلی کامپوزیت‌های زمینه فلزی را بصورت نمادین نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در کامپوزیت تقویت شده با الیاف پیوسته، ناهمسانگردی^۶ بیشتر از بقیه کامپوزیت‌ها است. تحقیقات نشان داده است کامپوزیت‌های

زمینه فلزی تقویت شده با ذرات یا تقویت کننده غیرپیوسته به دلایل زیر اهمیت ویژه‌ای دارند [۱۲ و ۱۳]:

- قیمت ارزان‌تر در مقایسه با کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف پیوسته
- فراوری از طریق فرایندهای متداول مثل ریخته‌گری و متالورژی پودر
- امکان انجام فرایندهای ثانویه مثل اکستروژن
- دمای کاری بالاتر نسبت به فلز تقویت نشده^۷
- خواص نسبتاً همسانگرد در مقایسه با کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف پیوسته



شکل ۱-۲-۱- ساختار نمادین انواع کامپوزیت‌های زمینه فلزی [۱۴].

¹ Stiffness
² Particles
³ Short Fiber
⁴ Whisker
⁵ Continuous Fiber
⁶ Anisotropy
⁷ Monolithic

۲-۲- زمینه

برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی انواع فلزات و آلیاژها می‌توانند به عنوان زمینه استفاده شوند. فلزات و آلیاژهای آلومینیم، تیتانیم، منیزیم، کبالت، آهن، مس، نقره، نیکل و نیوبوم به عنوان مواد متداول برای زمینه شناخته می‌شوند [۱۵]. انتخاب آلیاژ زمینه‌ی مناسب با توجه به کاربرد ماده کامپوزیتی صورت می‌گیرد. علاوه بر آلیاژهای متداول که برای زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرند، برخی آلیاژهای ویژه نیز در متالورژی پودر به کار برده می‌شوند. تحقیقات نشان داده است که در این مواد خواص نامطلوب ناشی از جدایش که در انجماد معمولی رخ می‌دهد وجود ندارد [۱۴]. مثال‌هایی از انواع آلیاژهای پرکاربرد به عنوان زمینه در کامپوزیت‌های زمینه فلزی عبارتند از:

- آلیاژهای ریختگی: AlSi12CuMgNi, AlSi9Mg, AISi7 (A356), Az91, AE42

- آلیاژهای کارپذیر: AlMgSiCu (6061), AlCuSiMn (2014), AlZnMgCu (7075), TiAl6V4

- آلیاژهای ویژه: Al-Cu-Mg-Ni-Fe (8090), Al-Cu-Mg-Li (AZ91Ca)

نیاز به چگالی کم و هدایت حرارتی مناسب باعث شده که آلیاژهای آلومینیم و منیزیم بیشترین مصرف را به عنوان زمینه داشته باشند [۵].

۲-۳- تقویت کننده

همان‌طور که در بخش ۲-۱ ذکر شد، مواد تقویت کننده برای کامپوزیت‌های زمینه فلزی به صورت الیاف پیوسته، الیاف کوتاه، ویسکر و ذره ساخته می‌شوند [۱۶]. پارامتری که تقویت کننده‌های مختلف را از یکدیگر متمایز می‌کند ضریب شکل^۱ یعنی نسبت طول به قطر یا ضخامت آن‌ها است. ضریب شکل الیاف پیوسته به سمت بی‌نهایت میل می‌کند، در حالی که ضریب شکل ذرات هم محور در حدود واحد است. تقویت کننده‌های سرامیکی دارای خواصی همچون استحکام و مدول الاستیک بالا و قابلیت استفاده در دمای بالا هستند [۱۵]. در کنار این خواص، تقویت کننده‌ها بسته به نوع آن‌ها دارای مشکلاتی نیز هستند. به عنوان مثال تقویت کننده‌های الیافی به دلیل تردی زیاد به راحتی می‌شکنند، حمل و نقل آن‌ها دشوار است و برای ساخت قطعات دارای انحناء، بدلیل شکستگی الیاف، محدودیت وجود دارد. برای ذرات تقویت کننده مسائلی مثل افزایش قابل توجه ویسکوزیته‌ی مذاب، کلوخه شدن^۲ و جدایش ذرات حین انجماد بروز می‌کند [۱۷]. جدول ۲-۱ نمونه‌ای از تقویت کننده‌های مهم مورد استفاده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی را به همراه ضریب شکل آن‌ها نشان می‌دهد.

کامپوزیت‌های ذره‌ای با جا دادن^۳ مستقیم ذرات تقویت کننده در زمینه و یا با تولید به صورت درجا از طریق روش‌های مختلف ساخته می‌شوند. ذرات تقویت کننده از طریق فرایندهای متالورژی پودر یا متالورژی مذاب به داخل زمینه‌ی جامد یا مایع فرستاده می‌شوند [۱۸ و ۱۹]. فرایندهای حالت مایع به دلیل امکان تولید اقتصادی قطعات بزرگ و پیچیده نسبت به فرایندهای حالت جامد ترجیح داده می‌شوند. انتخاب نوع تقویت کننده تابع عواملی همچون جنس زمینه، فرایند تولید کامپوزیت و شکل قطعه است. در این میان تقویت کننده‌های ذره‌ای به دلیل ارزان تر بودن در

¹ Aspect Ratio

² Agglomeration

³ Incorporation

مقایسه با سایر تقویت کننده‌ها و فراوانی و در دسترس بودن، پرمصرف ترین نوع تقویت کننده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی هستند [۲۰]. این نوع تقویت کننده به طور گسترده برای ساخت کامپوزیت با انواع زمینه‌ی فلزی و از طریق فرایندهای مختلف بکار می‌رود. از پر کاربرد ترین تقویت کننده‌های ذره‌ای می‌توان آلومینا و کاربید سیلیسیم را نام برد [۲۱].

جدول ۲-۱- انواع تقویت کننده‌های معمول مورد استفاده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی [۱۵]

ردیف	نوع	ضریب شکل	قطر (میکرومتر)	مثال
۱	ذره	۱-۴	۱-۲۵	SiC, Al ₂ O ₃ , B ₄ C
۲	الیاف کوتاه یا ویسکر	۱۰-۱۰۰۰	۱-۵	C, SiC, Al ₂ O ₃
۳	الیاف پیوسته	>۱۰۰۰	۳-۱۵۰	SiC, Al ₂ O ₃ , C, B, W

۲-۴- کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم^۱

در کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم فاز تقویت کننده در داخل زمینه‌ای از جنس آلومینیم یا آلیاژهای آن قرار می‌گیرد. خواص این کامپوزیت‌ها را می‌توان با تغییر در نوع و مقدار اجزای سازنده تغییر داد. از مهمترین خواص کامپوزیت های زمینه آلومینیم می‌توان به استحکام بالا، چگالی کم، خواص بهتر در دمای بالا، انبساط حرارتی مناسب و بهبود قابل توجه مقاومت به سایش اشاره کرد [۲۲]. به عنوان مثال نتایج پژوهش محققان ثابت نموده است کامپوزیت Al- 9%Si- 20%vol SiC خواص سایشی برابر یا حتی بهتر از چدن خاکستری دارد [۲۳].

در حال حاضر به خوبی اثبات شده است که کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی ترکیب مناسبی از خواص فیزیکی و مکانیکی دارند بطوریکه کمتر ماده‌ی غیر کامپوزیتی می‌تواند با آن‌ها رقابت کند. این کامپوزیت‌ها می‌توانند جایگزین مناسبی برای مواد غیر کامپوزیتی شامل آلیاژهای آهنی، آلیاژهای آلومینیم و آلیاژهای تیتانیوم شوند [۲۳]. در سال‌های اخیر این مواد کاربرد فراوانی برای مصارف ساختاری^۲ و غیرساختاری^۳ پیدا کرده‌اند. نیرو محرکه‌ی استفاده از آن‌ها افزایش کارایی، مزایای اقتصادی و مسائل زیست محیطی بوده است. مزیت کلیدی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم در حمل و نقل، کاهش مصرف سوخت و انتشار مواد آلاینده به واسطه‌ی کاهش وزن خودروها است [۲۴].

۲-۵- فراوری و ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی

فرایندهای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دو گروه اصلی فرایندهای حالت جامد^۴ و فرایندهای حالت مایع^۵ تقسیم بندی می‌شوند [۱۱، ۱۲ و ۲۵]. در مورد کامپوزیت‌های ذره‌ای این دو گروه اصلی را می‌توان شامل فرایندهای

^۱ Aluminum Matrix Composites (AMCs)

^۲ Structural

^۳ Non- Structural

^۴ Solid State Processes

^۵ Liquid State Processes

متالورژی پودر و فرایندهای ریخته‌گری دانست [۲۶ و ۲۷]. در ادامه این دو گروه با تکیه بر کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات به طور مختصر توضیح داده می‌شوند.

۲-۵-۱- فرایندهای متالورژی پودر

روش متالورژی پودر برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی مزایایی در مقایسه با متالورژی شمش^۱ دارد. مهمترین آن‌ها دمای پایین فرایند است که باعث جلوگیری و یا به حداقل رسیدن واکنش‌های ناخواسته در فصل مشترک بین زمینه و تقویت‌کننده می‌شود [۲۸]. بعلاوه با روش متالورژی پودر می‌توان موادی به دست آورد که امکان فراوری آن‌ها با روش‌های دیگر وجود ندارد (مثل آلیاژهای تیتانیوم تقویت شده با کاربید سیلیسیم). مزیت مهم دیگر روش متالورژی پودر یکنواختی توزیع ذرات تقویت‌کننده در زمینه است. در این روش توزیع ذرات تابع توزیع آن‌ها در مخلوط پودر زمینه و تقویت‌کننده است. با استفاده از یک فرایند مخلوط کردن مناسب پودر، امکان بدست آوردن محصول کامپوزیتی با توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده فراهم می‌شود. تحقیقات نشان داده که این یکنواختی نه تنها خواص ساختاری را بهبود می‌بخشد بلکه باعث تکرار پذیری خواص نیز می‌شود [۲۹]. فرایند متالورژی پودر متداول شامل مخلوط کردن پودر آلیاژ زمینه با ذرات تقویت‌کننده و سپس فشردن سازی و تف جوشی در حالت جامد است. نکته قابل توجه، لزوم توزیع یکنواخت ذرات در مخلوط است تا ریزساختار مناسبی به دست آید [۲۸].

۲-۵-۲- فرایندهای مایع (ریخته‌گری)

در فرایندهای مایع، ذرات سرامیکی با روش‌های مختلف به داخل زمینه فلزی مذاب وارد شده و سپس مخلوط کردن و ریخته‌گری کامپوزیت انجام می‌شود [۵]. از آنجا که بیشتر سرامیک‌ها توسط فلز مذاب به خوبی تر نمی‌شوند برای نگه داشتن ذرات سرامیکی در داخل مذاب باید از روش‌ها و تکنیک‌های مناسب استفاده کرد [۳۰]. روش‌های مختلفی برای وارد کردن ذرات سرامیکی به داخل آلیاژ مذاب به طور موفقیت آمیز به کار رفته‌اند که برخی از این روش‌ها عبارتند از [۳۱، ۳۲، ۳۳ و ۳۴]:

- تزریق پودر به داخل مذاب توسط یک گاز حامل خنثی^۲
- افزودن ذرات به جریان مذاب در حین پر کردن قالب
- افزودن ذرات به مذاب از طریق یک گرداب ایجاد شده با هم زدن مکانیکی
- اضافه کردن بریکت‌های کوچک تقویت‌کننده به مذاب و همزدن
- توزیع ذرات در مذاب با شتاب دهی گریز از مرکز^۳
- وارد کردن ذرات به داخل مذاب با استفاده از رفت و برگشت یک میله
- اضافه کردن ذرات به مذاب در معرض امواج مافوق صوت

^۱ Ingot metallurgy

^۲ Carrier Gas

^۳ Centrifugal Acceleration

مهمترین مزایای فراوری حالت مذاب امکان ایجاد پیوند بین زمینه و تقویت کننده (در صورت وجود خاصیت ترشوندگی مناسب)، شکل نزدیک به نهایی قطعات و صرفه‌ی اقتصادی است. با این حال، مشکلاتی مثل آگلومره شدن، ته نشین یا شناور شدن ذرات، واکنش‌های نامطلوب در فصل مشترک و جدایش ذرات تقویت کننده در زمینه در حین فراوری کامپوزیت‌های ذره‌ای ریختگی بوجود می‌آید [۱].

۲-۵-۲- الف- ریخته‌گری همزدنی (گردابی)^۱

در بین فرایندهای مختلف ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی غیرپیوسته، ریخته‌گری همزدنی به عنوان روش کاربردی پذیرفته شده است. از مهمترین ویژگی‌های آن می‌توان به سادگی، انعطاف پذیری و قابلیت استفاده برای تولید اقتصادی و انبوه اشاره کرد [۳۵].

به طور کلی ساخت کامپوزیت زمینه فلزی به روش ذوبی شامل تهیه مذاب از ماده زمینه مورد نظر و وارد کردن ماده تقویت کننده به مذاب است. مرحله بعد، انجماد مذاب حاوی ذرات معلق در شرایط انتخاب شده است تا توزیع مطلوب از فاز پراکنده شده در زمینه‌ی ریختگی به دست آید [۳۶]. در آماده سازی کامپوزیت‌های زمینه فلزی با روش ریخته‌گری همزدنی مهمترین چالش‌ها عبارتند از [۳۷]:

- توزیع یکنواخت ماده تقویت کننده در دوغاب^۲
- ترشوندگی بین دو ماده تشکیل دهنده اصلی
- واکنش‌های شیمیایی بین ماده تقویت کننده و آلیاژ زمینه
- تخلخل

برای به دست آوردن خواص بهینه، باید توزیع تقویت کننده در زمینه یکنواخت باشد و پیوند بین اجزاء بهینه شود. همچنین مقدار تخلخل باید به حداقل رسیده و از واکنش‌های شیمیایی نامطلوب بین تقویت کننده و زمینه جلوگیری شود. در کامپوزیت‌های ریختگی علاوه بر انقباض حین انجماد، جذب گاز نیز می‌تواند باعث افزایش میزان تخلخل نسبت به فلز تقویت نشده شود. با کنترل فرایند، از جمله کاهش تلاطم مذاب و کنترل اتمسفر محیط و گاززدایی مذاب امکان کاهش تخلخل وجود دارد.

روش‌های مختلفی برای همزدن مذاب وجود دارد که مهمترین آن‌ها همزدن مکانیکی [۳۸]، الکترومغناطیسی [۳۹] و ارتعاشی با امواج مافوق صوت [۴۰] است. شکل ۲-۲ تجهیزات روش گردابی با استفاده از همزدن مکانیکی را بصورت نمادین نشان می‌دهد.

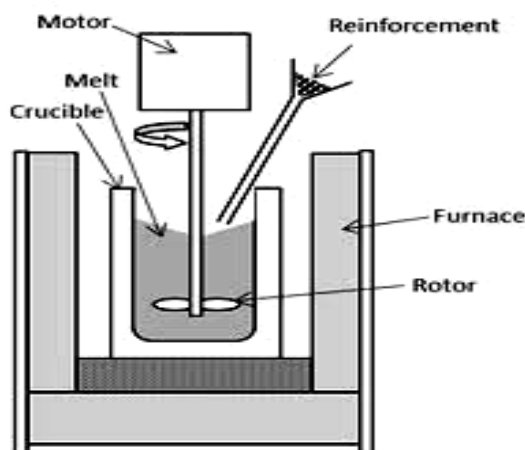
روش گردابی یکی از روش‌های شناخته شده برای ایجاد و حفظ توزیع مناسب ماده تقویت کننده در آلیاژ زمینه است. در این روش پس از ذوب فلز زمینه، مذاب با استفاده از یک همزن مکانیکی به شدت همزده می‌شود تا گردابی در سطح آن بوجود آید و سپس تقویت کننده در کنار گرداب اضافه می‌شود. همزن‌های مکانیکی طراحی‌های مختلفی دارند که از آن جمله می‌توان به همزن پره‌ای، توربینی و ماریچ اشاره کرد [۴۱]. استفاده از این سه نوع همزن برای

¹ Stir Casting

² Slurry

ساخت کامپوزیت زمینه فلزی عمومیت بیشتری دارد. مهمترین پارامترهای مربوط به همزن در ریخته گری همزدنی عبارتند از [۳۷]:

- ۱- قطر همزن که با پارامتر بدون بعد d/D تعیین می‌شود. جایکه d قطر همزن و D قطر بوته مذاب است.
- ۲- موقعیت همزن در داخل مذاب که پارامتر بدون بعد h/H آن را تعیین می‌کند. جایکه h فاصله همزن از کف ظرف نگهدارنده‌ی مذاب و H ارتفاع مذاب است.
- ۳- سرعت چرخش همزن
- ۴- طراحی و شکل همزن



شکل ۲-۲- طرح نمادین ریخته‌گری همزدنی در تولید کامپوزیت زمینه فلزی ذره‌ای [۳۸].

در روش گردابی تولید کامپوزیت‌ها، وظیفه همزن انتقال ذرات به داخل مذاب و نگه داشتن آن در یک وضعیت معلق است [۳۶]. به این صورت که اختلاف فشار بین سطح داخلی و خارجی کمک می‌کند تا ذرات خارجی افزوده شده به فلز مذاب به داخل آن کشیده شوند. با این حال گرداب مذکور حباب‌های گازی را نیز به داخل دوغاب مذاب-ذره کشیده و در نتیجه میزان تخلخل در کامپوزیت‌های ریخته‌گری را بالا می‌برد. برای کاهش میزان تخلخل لازم است از روش‌هایی مثل استفاده از بافل^۱ [۴۲] یا ریخته‌گری تحت فشار استفاده شود [۴۳]. موفقیت روش گردابی به ترشوندگی^۲ بین تقویت‌کننده و زمینه فلزی (مذاب) بستگی دارد. این پدیده روی غوطه‌ور شدن و توزیع تقویت‌کننده در مذاب اثر می‌گذارد [۴۴].

۲-۵-۲- ب- سیالیت کامپوزیت‌های زمینه فلزی

یکی از مسائل مهمی که در ریخته‌گری باید مورد توجه قرار گیرد سیالیت است. به طور کلی سیالیت یک مذاب تابع عوامل متالورژیکی مثل ترکیب شیمیایی، فوق‌گداز، گرمای نهان ذوب، کشش سطحی مذاب، ویسکوزیته، نوع انجماد و همچنین متغیرهای قالب و ریخته‌گری مثل شکل قطعه، سرعت انجماد و ماده قالب است [۴۵].

¹ Baffle

² Wettability

در مذاب کامپوزیت‌ها علاوه بر موارد فوق ویژگی‌های تقویت‌کننده مثل اندازه، شکل و کسر حجمی آن روی رفتار سیالیت مذاب کامپوزیت زمینه فلزی اثر می‌گذارند. زمانی که فلز مذاب حاوی توزیعی از ذرات باشد ویسکوزیته ظاهری نسبت به فلز غیر کامپوزیتی به میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت. افزایش کسر حجمی ذرات تقویت‌کننده در مذاب سبب افزایش ویسکوزیته می‌شود. همچنین کاهش اندازه ذرات تقویت‌کننده به دلیل افزایش سطح آن‌ها سیالیت مذاب را کاهش می‌دهد و هرچه شکل ذرات تقویت‌کننده به حالت کروی نزدیکتر باشد سیالیت بیشتر است. این بدان معناست که با انحراف شکل ذرات از حالت کروی و زاویه دار شدن آن‌ها در یک دما و کسر حجمی ثابت، سیالیت کمتر می‌شود [۴۵].

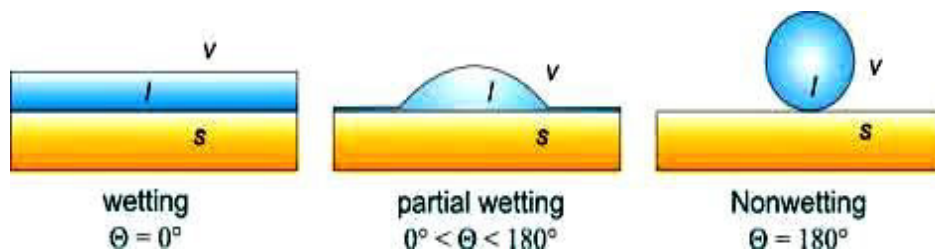
۲-۶ ترشوندگی

ترشوندگی یا آغشته پذیری به قابلیت یک مایع برای گسترده شدن روی یک سطح جامد اطلاق می‌شود و میزان تماس بین یک مایع و یک جامد را نشان می‌دهد [۴۶]. ترشوندگی بین فلزات مذاب و سرامیک‌ها اهمیت ویژه‌ای در فرایندهای مختلف از جمله تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی دارد [۴۷-۴۹]. با این حال، یک مشکل اساسی در فراوری کامپوزیت‌ها از طریق فرایندهای مایع، طبیعت ترشوندگی ضعیف سرامیک‌ها است. بنابراین ترشوندگی بین سرامیک‌ها و فلزات باید بهبود داده شود تا پیوند مناسب بین آن‌ها ایجاد گردد. برای مثال آلومینا یکی از مواد سرامیکی مفید در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی است. آلومینیم تقویت شده با آلومینا نوعی از کامپوزیت‌های زمینه فلزی با پتانسیل فراوان است، ولی معایبی که در فصل مشترک آلومینیم-آلومینا ناشی از ترشوندگی کم به وجود می‌آیند بر خواص کامپوزیت تأثیر منفی دارند و فرایندهای ویژه‌ای برای ساخت آن‌ها لازم است [۳۰].

اگر یک قطره مایع روی یک زیرلایه جامد مثل شکل ۲-۳ قرار گیرد، زاویه تماس یا تر شدن θ ، ترشوندگی جامد توسط مایع را توصیف می‌کند [۵۰]. زاویه تر شدن در حالت تعادل با معادله ۲-۱، معروف به معادله یانگ-دوپر^۲، تعیین می‌شود [۴۶ و ۵۰]:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cdot \cos \theta \quad (1-2)$$

جاییکه γ_{sv} کشش سطحی یا انرژی ویژه^۳ (انرژی بر واحد سطح) فصل مشترک جامد-گاز، γ_{sl} انرژی ویژه فصل مشترک مایع-جامد و γ_{lv} انرژی ویژه فصل مشترک مایع-گاز است. ترشوندگی بر اساس زاویه تماس را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:



شکل ۲-۳- طرح نمادین یک قطره مایع روی سطح جامد [۴۶].

¹ Contact (Wetting) Angle

² Young -Duopre

³ Specific Energy

- $\theta = 0$: ترشوندگی کامل

- $\theta = 180$: عدم تر شدن

- $0 < \theta < 180$: ترشوندگی جزئی

در حقیقت زاویه تماس کم نشان دهنده‌ی ترشوندگی خوب است. معمولاً وقتی که زاویه تماس کمتر از ۹۰ درجه است مایع می‌تواند جامد را تر کند، در حالی که در سیستم‌های با ترشوندگی ضعیف زاویه تماس بیشتر از ۹۰ درجه است [۵۱]. وقتی یک ذره‌ی مایع روی یک زیر لایه جامد قرار می‌گیرد، بخشی از فصل مشترک جامد-گاز با فصل مشترک مایع-جامد و مایع-گاز جایگزین می‌شود. گسترش مایع تنها در صورتی اتفاق می‌افتد که باعث کاهش انرژی آزاد سیستم در اثر این تغییر شود. نیروی پیوند بین فاز مایع و جامد، یعنی کار چسبندگی (W_a) به صورت رابطه ۲-۲ تعریف می‌شود [۴۶]:

$$W_a = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (2-2)$$

از ترکیب معادلات ۱-۲ و ۲-۲ معادله ۳-۲ به دست می‌آید:

$$W_a = \gamma_{LV}(1 + \cos \theta) \quad (3-2)$$

بنابراین نیروی پیوند بین فاز مایع و جامد می‌تواند به صورت تابعی از زاویه تماس و کشش سطحی مایع توصیف شود. معمولاً خواص ترشوندگی با روش قطره چسبندگی^۱ براساس اندازه‌گیری کار چسبیدن^۲ و عموماً در محدوده‌ی دمایی ۴۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه‌ی سانتیگراد اندازه‌گیری می‌شود [۵۲]. در این روش یک قطره از فلز مذاب روی زیرلایه جامد قرار می‌گیرد (شکل ۳-۲). برای اندازه‌گیری زاویه تماس، سیستم به سرعت سرد شده تا به شکل تعادلی منجمد شود. همچنین پارامترهای مهمی مثل ترکیب، کیفیت سطحی جامد، خلوص مذاب و فشار بخار باید به دقت کنترل شود. نتایج پژوهش محققان ثابت نموده است که معمولاً چنین کنترل‌هایی مشکل است و به همین دلیل خطاهایی در شرایط آزمایش به وجود می‌آید [۴۶].

۲-۶-۱- عوامل کاهنده ترشوندگی

برای ذرات سرامیکی معمولاً در دماهای کمتر از ۸۵۰ درجه‌ی سانتیگراد ترشوندگی خوبی توسط مذاب آلومینیم مشاهده نمی‌شود. تحقیقات نشان داده است که این مسأله ناشی از وجود لایه‌ای از اکسید آلومینیم است که از تماس مستقیم آلومینیم و تقویت‌کننده جلوگیری می‌کند [۵۳]. به طور کلی وجود فیلم اکسیدی روی سطح مذاب باعث کاهش ترشوندگی ذرات تقویت‌کننده یا آلیاژهای مذاب می‌شود. این لایه‌ی اکسیدی در مقابل نفوذ ذرات تقویت‌کننده به داخل زمینه مذاب مقاومت می‌کند، به ویژه وقتی که ذرات در سطح مذاب به آن اضافه می‌شوند. آلومینیم مذاب واکنش پذیری بالایی با اکسیژن محیط دارد و لذا جلوگیری از تشکیل اکسید در سیستم‌های پایه آلومینیم بسیار مشکل است [۴۶]. از طرف دیگر مشاهده شده که ذرات سرامیکی در داخل مذاب به طور معمول با یک لایه گازی

¹ Sessile Drop

² Work of Adhesion

پوشیده شده‌اند. برخی محققین احتمال داده‌اند که این لایه‌ی گازی دلیل اصلی کاهش قابلیت ترشوندگی است [۵۴]، به این صورت که از تماس مذاب زمینه با سطح ذرات جلوگیری می‌کند. بنابراین لازم است که قبل از فراوری کامپوزیت، لایه‌های گازی از سطح ذرات جدا شده و یا توسط نیروهای مکانیکی شکسته شوند. مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی زاویه تماس فازهای سرامیکی مختلف با فلزات مذاب نشان می‌دهند که به طور کلی زاویه تماس با کاهش دمای مذاب آلومینیم افزایش می‌یابد. یعنی در دماهای کمتر ترشوندگی کاهش پیدا می‌کند [۵۵]. این مسأله به دلیل اثر دما بر زاویه تماس و کشش سطحی آلومینیم و افزایش پایداری پوسته‌های سطحی اکسید آلومینیم با کاهش دمای مذاب است. همچنین با کاهش اندازه‌ی ذرات، ترشوندگی کاهش می‌یابد. این امر بدین سبب است که انرژی سطحی لازم برای تغییر شکل سطح فلز به یک شعاع کوچک به نحوی که ذره بتواند به داخل آن نفوذ کند افزایش می‌یابد. همچنین توزیع یکنواخت ذرات کوچک به دلیل سطح بیشتر مشکل‌تر است [۳۶ و ۴۶].

۲-۶-۲- روش‌های افزایش ترشوندگی

در دمای ثابت روش‌های مختلفی برای افزایش ترشوندگی ذرات تقویت‌کننده با آلیاژ مذاب زمینه وجود دارد [۵۶]. اصولی که براساس آن امکان بهبود ترشوندگی وجود دارد شامل افزایش انرژی سطحی جامد، کاهش کشش سطحی آلیاژ مذاب و یا کاهش انرژی فصل مشترک جامد-مذاب در فصل مشترک ذره-زمینه است [۵۷]. این روش‌ها شامل عملیات روی مذاب زمینه و تقویت‌کننده‌ها بوده و مهمترین آن‌ها عبارتند از:

- افزودن عناصر فعال به زمینه برای بهبود ترشوندگی در ساخت کامپوزیت‌ها با روش‌های ذوبی، پیوند خوبی بین زمینه و فاز سرامیکی ایجاد می‌کند. برخی از عناصر آلیاژی مثل منیزیم، کلسیم یا لیتیم می‌توانند از طریق کاهش کشش سطحی مذاب، کاهش انرژی فصل مشترک جامد-مذاب، کاهش زاویه ترشیدن و یا واکنش شیمیایی باعث بهبود ترشوندگی شوند. به عنوان مثال چون انرژی سطحی منیزیم ($0/599 \text{ N/m}$) کمتر از انرژی سطحی آلومینیم ($0/760 \text{ N/m}$) است، اضافه کردن منیزیم باعث افزایش ترشوندگی مذاب آلومینیم می‌شود [۵۶]. نتایج تحقیقات نشان داده است که برای آلیاژهای آلومینیم، عنصر منیزیم نسبت به سایر عناصر اثر بیشتری روی جا گرفتن ذرات تقویت‌کننده در مذاب و بهبود توزیع آن‌ها در مذاب دارد.
- پوشش دادن ذرات سرامیکی با ماده‌ای که قابلیت ترشیدن یا واکنش با مذاب زمینه را داشته باشد. معمولاً فلز مذاب فلز جامد را به خوبی تر می‌کند. از فلزاتی مثل مس، نیکل، نقره و کرم برای پوشش دادن ذرات سرامیکی به منظور افزایش ترشوندگی استفاده می‌شود. برای ذرات تقویت‌کننده‌ی سرامیکی (مثل کاربید سیلیسیم) در زمینه آلومینیم، نیکل پرکاربردترین پوشش است [۵۶] که اصولاً با روش‌های الکترولس ایجاد می‌شود.
- عملیات حرارتی ذرات سرامیکی به منظور حذف لایه‌ی گازی و ناخالصی‌ها از سطح ذرات که با ایجاد سطحی تمیز به افزایش ترشوندگی کمک می‌کند. برای مثال پیشگرم کردن کاربید سیلیسیم تا 900 درجه‌ی سانتیگراد باعث حذف ناخالصی‌ها و بهبود ترشوندگی آن با مذاب آلومینیم می‌شود [۵۶].
- ایجاد نیروی مکانیکی مثل همزدن و اعمال فشار خارجی به دلیل کاهش زاویه تماس
- افزایش دمای مذاب به دلیل تأثیر روی انرژی سطحی و کاهش پایداری پوسته‌های اکسیدی