تأثیر درصد حجمی فاز تقویت‌کننده بر استحکام، مدول الاستیسیته و فرایند پیری کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت‌شده با ذرات کاربیدسیلیسیم

غلامرضا خلج
دانشجوی دکتری
دانشگاه علم و صنعت ایران

سید محمد موسوی خویی
استادیار
دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

علی ظفری
دانشجوی کارشناسی ارشد
دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

رضا باقری
استادیار
دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

توسعهٔ علوم و فناوری در دهه‌های اخیر باعث پیدایش گروه جدیدی از کامپوزیت‌ها بر پایه آلیاژهای فلزی تقویت‌شده با الیاف یا ذرات سرامیکی شده است. تحقیقات مؤید این مطلب است که به کارگیری ذرات تقویت‌کنندهٔ کاربیدسیلیسیم در زمینهٔ آلومینیم، می‌تواند خواص مکانیکی مناسبی را برای کاربردهای مختلف فراهم آورد. در این تحقیق، کامپوزیت زمینهٔ آلومینیم، تولید شده از آلیاژ۶۰۶۱ و۲۰۱۴ تقویت‌شده با ذرات کاربیدسیلیسیم با اندازه متوسط دانه۲۴ میکرون و درصدهای حجمی ۵، ۱۰ و۱۵ به روش ریخته‌گری گردابی تولید شد و برای بررسی خواص مکانیکی استفاده شد. نتایج این تحقیق، نمایان‌گر تأثیر شدید ذرات تقویت‌کننده در مقادیر استحکام تسلیم، مدول الاستیسیته و سختی است. نتایج آزمایش فشار و سختی‌سنجی نشان می‌دهد که مقادیر تنش تسلیم، مدول یانگ و عدد سختی کامپوزیت با افزایش درصد حجمی ذرات افزایش می‌یابد. در این تحقیق عملیات حل‌سازی در دمای ۵۳۰°C به‌مدت دو ساعت و عملیات پیرسازی در دمای ۲۰۰°C در زمان‌های متفاوت از ۱۰ تا۹۶۰ دقیقه بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که مقادیر سختی و سرعت رسوب‌گذاری وابسته به کسر حجمی ذرات تقویت‌کننده هستند. این رفتار با توجه به شبکهٔ نابجایی‌ها در اطراف ذرات تقویت‌کننده توضیح داده شده است.

کلمات کلیدی

کامپوزیت زمینه فلزی، Al/SiC_P، ریخته‌گری گردابی، خواص‌مکانیکی

Effect of Volume Fraction of SiC_P on the Yield Strength, Modules of Elasticity and Age Response in Al/SiC_P Composite

Gh. Khalaj

S. M. Mousavi Khoei

A. Zafari

R. Bagheri

Abstract

Metal matrix composites reinforced with ceramics fibers or particles have been developed in the recent decades to the advancements in science and technology. Investigations preformed reveal that Al matrix composites reinforced with SiC particles provide a wide range of mechanical properties suitable for different applications. In this study, Al6061 and Al2014 alloys were used as the matrix materials. Silicon carbide particles with the average size 24μm, and different volume fractions (5,10,15%) were incorporated as the reinforcement. The composite materials were made via the vortex method. The results of investigation illustrate that increasing the particle content, improve the yield strength, the modules of elasticity and hardness of composite. The results also show that hardness and rate of precipitation in age hardening are dependent to the volume fraction of reinforcement particles. The observations are attributed to the interaction of dislocations with the reinforcement particles.

Keywords

Metal matrix composites, Al/SiC$_P$, Vortex method, Mechanical properties.

مقدمه

استفاده از کامپوزیت‌ها در زمینه‌های خاص نظیر صنایع فضایی، هوایی، هسته‌ای و دفاعی نیاز فزاینده‌ای را به اطلاعات دربارهٔ این مواد پدید آورده است. قسمت اعظم تحقیقات به انجام رسیده در این مواد به منظور بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی استوار بوده است. استحکام و مدول مخصوص بالا، قابلیت کنترل خواص فیزیکی و مکانیکی از طریق کنترل ترکیب شیمیایی، مقاومت خوردگی بالا و امکان استفاده از روش‌های متداول کار بر روی فلزات جهت شکل‌دهی آن‌ها از مزایای عمده‌ی استفاده از مواد کامپوزیت است.

در سال‌های اخیر استفاده از کامپوزیت‌ها بر پایهٔ آلیاژهای فلزی تقویت‌شده با ذرات سرامیکی در صنایع مختلف نظیر صنایع هوا ـ فضا و صنایع دفاعی توسعه گسترده‌ای داشته است. این خانواده از مواد به دلیل سادگی نسبی فرآیند و قابلیت مناسب کنترل ساختار مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. آلیاژهای آلومینیم به دلیل چگالی کم، نقطه ذوب پایین و خواص مکانیکی مطلوب نظیر استحکام و مدول مخصوص بالا بیش از سایر آلیاژهای فلزی در ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱و۲]. تحقیقات نشان می دهد که به کارگیری ذرات تقویت‌کننده کاربیدسیلیسیم در زمینه آلومینیم، خواص مکانیکی مناسبی برای کاربردهای مختلف فراهم می‌آورد [۳و۴]. در این تحقیق سعی شده است با استفاده از ذرات تقویت‌کننده کاربیدسیلیسیم در زمینهٔ آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ و۲۰۱۴ اثر میزان درصد حجمی فاز تقویت‌کننده بر استحکام، مدول الاستیسیته، سختی و سرعت رسوب‌گذاری (در عملیات پیرسازی) کامپوزیت‌های تولید شده مورد مطالعه قرار گیرد.

روش تحقیق

مواد اولیه

در این تحقیق از آلیاژ آلومینیم با شماره استاندارد ۶۰۶۱ و۲۰۱۴ به عنوان فاز زمینه استفاده شد. این آلیاژ به روش ذوب و ریخته‌گری تولید می شود. همچنین از ذرات تقویت‌کننده کاربیدسیلیسیم از تولیدات شرکت Struers دانمارک با اندازه متوسط ۲۴ میکرون و درصدهای حجمی ۵،۱۰ و ۱۵ استفاده شد.

روش تولید

در این تحقیق از روش ریخته‌گری گردابی برای تولید کامپوزیت زمینهٔ آلومینیم تقویت‌شده با ذرات کاربیدسیلیسیم استفاده شد. در این روش برای تولید کامپوزیت، پس از محاسبه مقادیر SiC وAl آلیاژ زمینه ذوب و در دمای ۸۰۰ درجه

سانتی‌گراد نگه‌داری شد. برای جلوگیری از اکسیدشدن مذاب، ذوب آلیاژ زمینه در زیر پوشش سرباره (کورال) صورت گرفت. در این مرحله بوته حاوی آلیاژ مذاب از کوره خارج شد و عمل سرباره‌گیری و گاززدایی با استفاده از گاز نیتروژن صورت گرفت. پس از این کار بوته به داخل کوره برگردانده شد وعمل هم‌زدن با سرعت ۴۵۰rpm شروع شد. افزودن ذرات کاربیدسیلیسیم به درون مذاب با سرعت یکنواخت g/min ۱ انجام شد. همچنین عملیات تولید کامپوزیت زیر پوشش گاز محافظ آرگون صورت گرفت.

آزمایش‌های میکروسکوپی و مکانیکی کامپوزیت‌های تولیدی

با استفاده از میکروسکوپ نوری چگونگی توزیع ذرات تقویت‌کننده در داخل زمینه بررسی و سطح نمونه‌ها قبل از آزمایش میکروسکوپی تا حد ۰/۳ میکرون پولیش شد.

برای ارزیابی رفتار مکانیکی از آزمایش‌های فشار و سختی سنجی استفاده شد. نمونه‌های آزمایش فشار به شکل استوانه با ابعاد L/D=۲ از شمش‌های ریختگی و با استفاده از استاندارد E9-89a به‌روش ماشین‌کاری تهیه شد. آزمایش فشار با استفاده از دستگاه اینسترون مدل ۱۱۱۵ و در دمای اتاق انجام گرفت. سرعت حرکت فک‌ها در آزمایش فشار معادل ۱cm/min انتخاب شد. قابل ذکر است که برای هر یک از کامپوزیت‌های تولید شده در این تحقیق آزمایش فشار سه مرتبه تکرار شد. برای محاسبه مدول الاستیسیته استاندارد E111-82 به کار رفت. برای بررسی رفتار پیری کامپوزیت از آزمایش سختی‌سنجی استفاده شد. نمونه‌ها از شمش‌های ریخته‌گری تهیه و در دمای ۵۳۰°C به مدت دو ساعت حل‌سازی و در آب کوئنچ شدند. برای پیرسازی، نمونه‌ها در دمای ۲۰۰°C و در زمان‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۳۶۰، ۴۸۰، ۷۲۰ و ۹۶۰ دقیقه نگه‌داری و در هوا خنک شدند. آزمایش‌های سختی‌سنجی با ساچمه ۲/۵ میلی‌متر، بار۳۱/۲۵ کیلوگرم و توسط معیار برینل انجام شد.

نتایج و بحث

شکل ۱ مورفولوژی توزیع ذرات تقویت‌کننده در داخل زمینه را برای یکی از کامپوزیت‌های تولید شده در این تحقیق (Al۶۰۶۱/۷.۵ $SiC_{P(24\mu m)}$) نشان می‌دهد. در ساختار میکروسکوپی این کامپوزیت فازهای زیر قابل تشخیص است: (الف) فاز سفید رنگ زمینه آلومینیم خالص است، (ب) فازهای تیره رنگ باریک Mg_2Si است و (ج) فازهای تیره رنگ درشت ذرات تقویت‌کننده SiC هستند.

شکل (۱) مورفولوژی توزیع ذرات تقویت‌کننده در داخل زمینه برای کامپوزیت $Al۶۰۶۱/۷.۵\ SiC_{P(24\mu m)}$.

نتایج آزمایش‌های مکانیکی در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، افزودن ذرات کاربیدسیلیسیم تأثیر بسزایی در خواص مکانیکی کامپوزیت‌های Al6061/SiC و Al2014/SiC دارد.

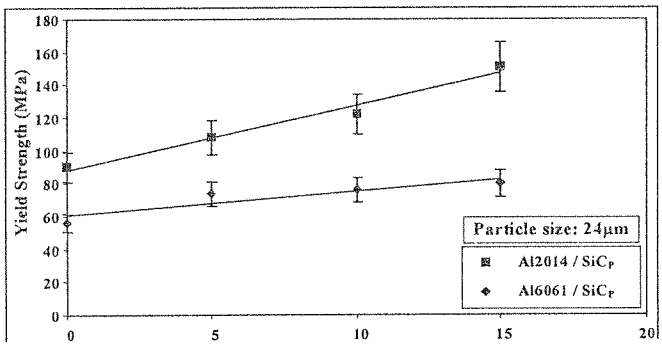
جدول (۱) مشخصات مکانیکی مواد ساخته شده.

(اندازه متوسط ذرات کاربیدسیلیسیم در تمامی کامپوزیت‌های تولیدشده ۲۴ میکرون می‌باشد)

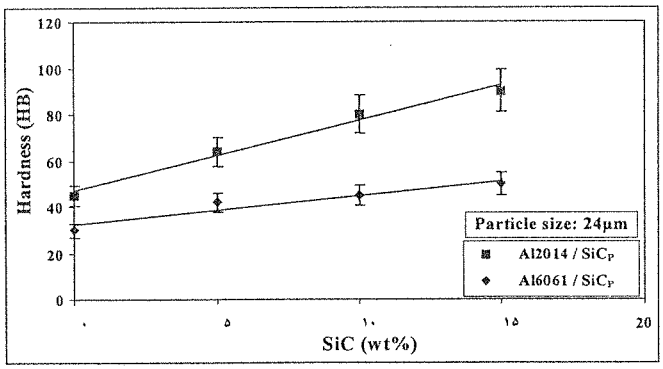
زمینه	درصد حجمی ذرات SiC	استحکام تسلیم MPa	مدول الاستیسته GPa	سختی حل‌سازی HB
۶۰۶۱	۰	۵۶	۶۸	۳۰
۶۰۶۱	۵	۷۴	۸۳	۴۲
۶۰۶۱	۱۰	۷۶	۸۸	۴۵
۶۰۶۱	۱۵	۸۰	۹۵	۵۰
۲۰۱۴	۰	۹۰	۷۴	۴۵
۲۰۱۴	۵	۸۱	۱۰۰	۶۴
۲۰۱۴	۱۰	۱۲۲	۱۴۶	۸۰
۲۰۱۴	۱۵	۱۵۱	۱۶۰	۹۰

شکل‌های ۲ تا ۴ تأثیر کسر حجمی ذرات تقویت‌کننده بر مقادیر استحکام تسلیم، عدد سختی و مدول الاستیسیته را نشان می‌دهند. از روی نمودارهای مذکور می‌توان دریافت که با افزایش درصد حجمی فاز تقویت‌کننده استحکام تسلیم، عدد سختی و مدول الاستیسیته کامپوزیت افزایش می‌یابد.

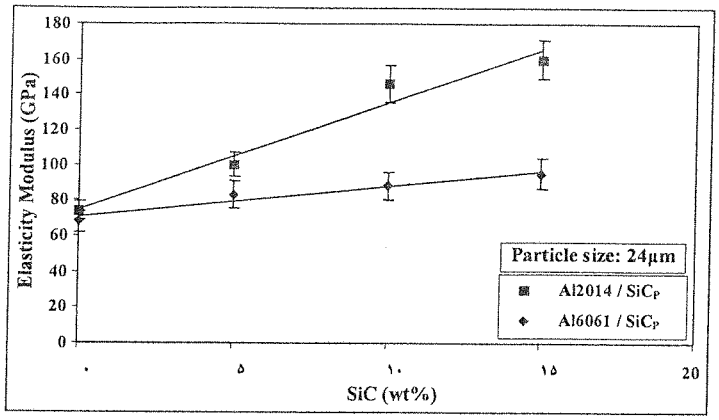
شکل‌های ۲ تا ۴ هم‌چنین نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های ساخته شده با آلیاژ ۲۰۱۴ دارای مقادیر تنش تسلیم، سختی و مدول الاستیسیته بالاتری از کامپوزیت‌های ساخته شده با آلیاژ ۶۰۶۱ است. این اثر با خواص مکانیکی آلیاژهای ۶۰۶۱ و ۲۰۱۴ در شرایط آنیل‌شده تطابق دارد. از این پدیده می‌توان دریافت که علاوه بر فاز تقویت‌کننده، آلیاژ زمینه نیز وظیفه مهمی در کنترل خواص مکانیکی کامپوزیت دارد.



شکل (۲) تغییرات استحکام فشاری با تغییر درصد حجمی فاز تقویت‌کننده برای کامپوزیت‌های مختلف.



شکل (۳) تغییرات سختی با تغییر درصد حجمی فاز تقویت‌کننده برای کامپوزیت‌های مختلف.



شکل (٤) تغییرات مدول الاستیسیته با تغییر درصد حجمی فاز تقویت‌کننده برای کامپوزیت‌های مختلف.

میزان افزایش استحکام تسلیم و مقادیر عدد سختی با افزایش کسر حجمی فاز تقویت‌کننده با تئوری‌های مختلفی قابل توجیه است. Ashby[۵] نشان داد که به علت ناسازگاری بین ذرات تقویت‌کننده و آلیاژ زمینه، ذرات تقویت‌کننده به عنوان مانعی در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل می‌کنند. وجود ذرات تقویت‌کننده باعث می‌شود که نابجایی‌های لازم از نظر هندسی در فصل مشترک زمینه با تقویت‌کننده به‌وجود بیایند. با استفاده از تئوری Ashby میزان افزایش استحکام بر اساس معادله (۱) به اندازه و درصدحجمی فاز تقویت‌کننده مربوط می‌شود:

$$\sigma_{wh۲}= ۵G(۲V_p b/d)^{۰/۵}\ \xi^{۰/۵} \qquad (۱)$$

$\sigma_{wh۲}$ میزان افزایش استحکام، G مدول برشی، V_P درصد حجمی فاز تقویت‌کننده، b بردار برگرز، dاندازه ذرات تقویت‌کننده و ξ مقدار تغییر شکل است.

Arsenault [۶] نظریه دیگری را برای میزان افزایش استحکام در کامپوزیت‌های زمینه فلزی بیان می‌کند. این تئوری میزان افزایش استحکام را به وجود اختلاف در ضریب انبساط حرارتی زمینه و فاز تقویت‌کننده و ایجاد دانسیته‌ی بالایی از نابجایی‌ها در زمینه آلومینیم ارتباط می‌دهد (ضریب انبساط حرارتی آلومینیم حدود هفت برابر ضریب مذکور در مورد کاربیدسیلیسیم می‌باشد). این امر به ایجاد تنش‌های پسماند در حین سرد کردن کامپوزیت از درجه حرارت‌های بالا در حین فرایند تولید منجر می‌شود. وجود این تنش‌های باقی‌مانده باعث می‌شود که زمینه آلومینیم در حالت کشش و فاز تقویت‌کننده تحت فشار قرار گیرد. ایجاد تنش‌های باقی‌مانده سبب افزایش دانسیته‌ی نابجایی‌ها در فصل مشترک فاز زمینه و تقویت‌کننده می‌شود. با استفاده از این تئوری Arsenault میزان افزایش استحکام را با رابطه‌ی زیر ارزیابی می‌کند:

$$\sigma_{dis} = ۲\beta\mu\ [(bV_p\xi)/(۱-V_p)]^{۰/۵}\ R^{۰/۳۳}\ (۱+۲/R)\ [۱/V]^{۰/۱۶۶} \qquad (۲)$$

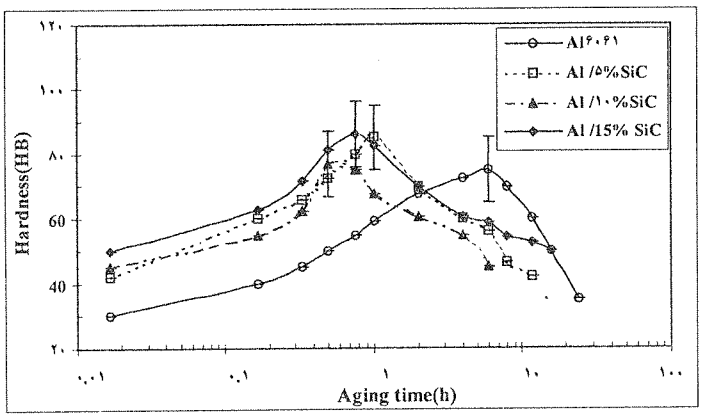
σ_{dis} میزان افزایش استحکام، μ مدول برشی زمینه، b طول بردار برگرز، Vp درصد حجمی ذرات، ξ درصد تغییر طول، R نسبت طول به قطر ذرات(برای ذرات کروی R=۱ است) و V حجم ذرات است. β ثابت هندسی است که برای آلومینیم ۱/۲۵ در نظر گرفته می‌شود.

تئوری‌های فوق به‌خوبی میزان افزایش دانسیته‌ی نابجایی‌ها را با افزودن ذرات تقویت‌کننده نشان می‌دهد. با لحاظ کردن هر یک از تئوری‌های مذکور ایجاد یک ساختار سلولی از نابجایی‌ها در اطراف فاز تقویت‌کننده تأیید می‌شود. بر این اساس اگر اندازه ذرات تقویت‌کننده ثابت باشد، با افزایش درصد حجمی فاز تقویت‌کننده، میزان ساختار سلولی نابجایی در اطراف فاز تقویت‌کننده، در هم فرورفتگی ساختار سلولی و موانع موجود بر سر راه حرکت نابجایی‌ها افزایش خواهد یافت. این عمل باعث می‌شود که تنش لازم برای عبور نابجایی‌ها از ذرات تقویت‌کننده افزایش یابد و حرکت نابجایی‌ها کند شود و در نتیجه استحکام

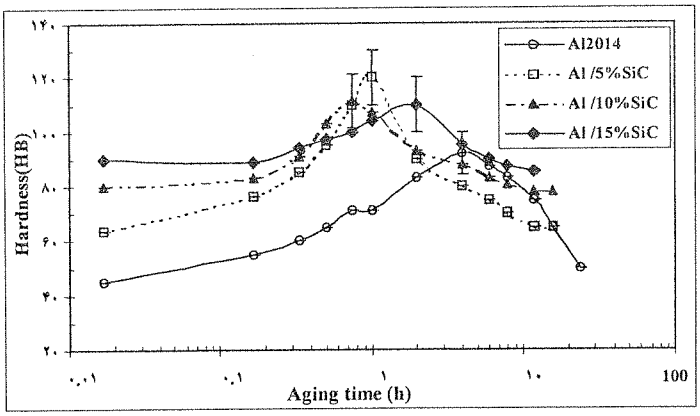
و سختی کامپوزیت افزایش یابد. این اثر در شکل‌های ۲ و۳ دیده می‌شود. از شکل‌ها می‌توان دریافت که در کامپوزیت با زمینه Al6061 با افزایش درصد حجمی فاز تقویت‌کننده از ۵ تا ۱۵ استحکام تسلیم و عدد سختی به ترتیب از ۷۴Mpa به ۸۰Mpa و از ۴۲HB به ۵۰HB افزایش می‌یابد. این پدیده به خوبی در کامپوزیت Al2014 نیز دیده می‌شود.

شکل۴ تغییرات مدول الاسیتسیته را با تغییر درصد حجمی ذرات SiC برای کامپوزیت‌های Al6061/SiC و Al2014/SiC نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت که مدول الاستیسیته کامپوزیت Al/10%SiC با تغییر آلیاژ زمینه از Al6061 به Al2014 تا حدود ۱/۷ برابر افزایش یافته است. این پدیده با اختلاف موجود در مدول الاستیسیته آلیاژهای تقویت‌نشده Al6061 و Al2014 تطابق دارد.

شکل‌های ۵ و۶ مقادیر سختی را به‌عنوان تابعی از زمان پیری، در دمای پیری ثابت ۲۰۰°C، برای آلیاژ ۶۰۶۱ و ۲۰۱۴ تقویت‌نشده و کامپوزیت(های تقویت‌شده با ۵، ۱۰و ۱۵ درصد حجمی و اندازه دانه۲۴ میکرون) نشان می‌دهد. شکل‌های۵ و۶ هم‌چنین نشان می‌دهند که زمان قلهٔ پیری از حدود ۶ ساعت برای حالت تقویت‌نشده تا حدود ۱/۵ ساعت برای کامپوزیت کاهش یافته است (به‌دلیل پراکندگی زیاد در داده‌های سختی، تفاوتی در زمان قلهٔ پیری برای سه کامپوزیت قابل تشخیص نیست).



شکل (۵) تغییرات سختی با زمان پیری دردمای ۲۰۰°C برای آلیاژ ٦۰٦۱ تقویت‌شده با $SiC_{(24\mu m)}$



شکل (٦) تغییرات سختی با زمان پیری در دمای ۲۰۰°C برای آلیاژ ۲۰۱٤ تقویت‌شده با $SiC_{(24\mu m)}$

در فرایند پیری، نابجایی‌ها همچون محل‌های جوانه‌زنی غیرهمگن برای رسوبات عمل می‌کنند و مسیرهای نفوذی چرخش کوتاه را برای اتم‌های محلول فراهم می‌آورند. در نتیجه، هم جوانه‌زنی و هم رشد رسوبات در زمینه به شدت تحت تأثیر حضور ذرات تقویت‌کننده است. در مقایسه با آلیاژ تقویت نشده، در دمای پیری ثابت، زمینه کامپوزیت در زمان کوتاه‌تری به حداکثر

سختی می‌رسد و این پدیده "پیری شتاب‌یافته" نامیده می‌شود. پیری شتاب‌یافته، اثرات مهمی بر انعطاف‌پذیری، استحکام کششی نهایی، مقاومت شکست، مقاومت رشد ترک خستگی و مقاومت سایشی دارد [۷].

در دماهای پیری پایین (۱۵۰°C)، جوانه‌زنی مناطق GP غالباً همگن است و شکل‌گیری آنها عمدتاً به جای‌خالی‌های اضافی، ناشی از کوئنچ از دمای حل‌سازی، بستگی دارد. بنابراین، توانایی تولید دانسیته‌ی بالاتر محل‌های جوانه‌زنی غیرهمگن (مثل نابجایی‌ها) در ماده کامپوزیت عامل مهمی در تعیین سینتیک رسوب‌زایی نیست. از طرفی، در دماهای پیری بالا (۱۹۰°C)، رسوبات (β و S) به‌طور غیرهمگن روی نابجایی‌ها جوانه می‌زنند. به دلیل اینکه ماده کامپوزیت تعداد بیشتری محل جوانه‌زنی غیرهمگن دارد، جوانه‌زنی و رشد رسوبات در کامپوزیت نسبت به آلیاژ تقویت‌نشده سریع‌تر اتفاق می‌افتد. این اثر به‌خوبی در شکل‌های ۵ و۶ دیده می‌شود. با دقت در این شکل‌ها می‌توان دریافت که زمان قلهٔ پیری از حدود ۶ ساعت برای حالت تقویت‌نشده تا حدود ۱/۵ ساعت برای کامپوزیت کاهش یافته است.

نتایج نشان می‌دهند که یک مقدار بحرانی مشخصی از دانسیته نابجایی‌ها حتی در مقادیر کم (ذرات) تقویت‌کننده تولید می‌شوند که محل‌های جوانه‌زنی غیرهمگن برای رسوب‌های استحکام‌بخش فراهم می‌کنند و سبب پیری شتاب‌یافته در ماده کامپوزیت می‌شوند[۸]. بر همین اساس، افزایش در مقدار تقویت‌کننده (بیش از ۵٪) اثر مشخصی بر پیری شتاب‌یافته در آلیاژ۶۰۶۱ و ۲۰۱۴ ندارد. این مسئله تأیید می‌کند که احتمالاً یک دانسیته بحرانی برای نابجایی‌ها وجود دارد که در این دانسیتهٔ نابجایی زمان پیرسازی برای رسیدن به قلهٔ سختی به حداقل خود می‌رسد. به‌نظر می‌رسد کسر حجمی ۵ درصد ذرات SiC دانسیتهٔ بحرانی نابجایی را تأمین می‌کند.

نتیجه‌گیری

۱- اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده کاربیدسیلیسیم به آلیاژ ۶۰۶۱و ۲۰۱۴ ، در مقایسه با آلیاژ تقویت‌نشده آلومینیم، به افزایش قابل توجهی، در استحکام و سختی منجر می‌شود.

۲- در صورتی که اندازه ذرات تقویت‌کننده ثابت باشد، با افزایش درصد حجمی فاز تقویت‌کننده استحکام تسلیم، سختی و مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد و زمان رسیدن به قله سختی کاهش می‌یابد

۳- ترکیب شیمیایی آلیاژ نقش مهمی در کنترل استحکام فشاری و مدول الاستیسیته کامپوزیت دارد، به‌طوری که میزان افزایش استحکام و مدول الاستیسیته با تغییر آلیاژ زمینه از آلیاژ ۶۰۶۱ به ۲۰۱۴ از ۱/۵ تا ۳ برابر افزایش یافت.

۴- سینتیک رسوب‌زایی در دانسیته بحرانی نابجایی‌ها (که توسط حدوداً ۵ درصد حجمی ذرات تقویت‌کننده تأمین می‌شود) به بالاترین مقدار خود می‌رسد. افزایش دانسیتهٔ نابجایی‌ها با افزودن کسر حجمی فاز تقویت‌کننده تاثیر قابل توجهی در سینتیک رسوب‌زایی ندارد.

مراجع

[1] M. Manoaharan and J. J. Lewandowski, "Effect of reinforcement size and matrix microstructure on the fracture properties of an aluminum metal matrix composite", Materials Science and Engineering A, 1992, Vol. 150A, P. 179.

[2] H. Ohtsu, "Design and manufacturing of advanced composites", ASM/EDS, 5th Annual Conference on Advanced Composites, Dearnborn, MI, USA, 1989, P. 187.

[3] P. K. Rohatgi, R. Asthana and S. Das, "Solidification, structure and properties of cast metal-ceramic particle composites", International Metal Reviews, 1986, Vol. 31, No. 3, P. 116.

[4] S. V. Kamat, J. P. Hirth and R. Mehrabian, "Mechanical properties of particulate-reinforced aluminium-matrix composites", Acta Metallurgice, 1989, Vol. 37, No. 9, P. 2395.

[5] W. S. Miller and F. J. Humphery, "Strengthening mechanisms in particulate metal matrix composites", Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, Vol. 25, No. 1, P. 33.

[6] R. J. Arsenault and N. Shi, "Dislocation generation due to differences between the coefficients of thermal expansion", Materials Science and Engineering, 1986, Vol. 81, P.175.

[7] R. J. Arsenault, "Strengthening mechanisms in particulate metal matrix composites", Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, Vol. 25, No. 1, P. 33.

[8] S. Suresh, A. Mortensen and A. Needleman, "Fundamentals of metal-matrix composites", Butterworth-Heinmann, USA, 1993, P.121.