بررسی عیوب و روشهای پیشگیری از آنها در کامپوزیتهای ریختگی فروتیک

محمدرضا رحیمی‌پور*، مونا معیری**

پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی

گروه متالورژی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۸۳/۹/۲۴– دریافت نسخه نهایی: ۸٤/۱۱/۱۸)

چکیده - **هدف از این پژوهش بررسی عوامل ایجاد عیوب قطعات ریختگی کامپوزیت فروتیک است که به روش درجا ساخته شده‌اند، نمونه‌ها پس از سنتز به روش درجا، به صورت گریز از مرکز در داخل قالبهای سرامیکی و فلزی ریخته شدند. بررسی‌های ریز ساختاری توسط میکروسکوپ نوری OM و میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM و رادیوگرافی با اشعه ایکس برای اطمینان ازسلامتی نمونه‌ها انجام شد. نتایج آزمایشات نشان داد با کنترل ترکیب شیمیایی، فرایند تولید، سرعت سرد شدن و عملیات حرارتی بعدی می‌توان قطعات کامپوزیت بی‌نقصی را ساخت. همچنین با اعمال فرایند ذوب مجدد، توزیع بهتر ذرات فاز دوم و زمینه یکنواخت‌تری ایجاد شده است.**

واژگان کلیدی: کامپوزیتهای ریختگی، فروتیک، ذوب مجدد

Investigation of Defects in Ferro-Tic Composites and their Prevention

M. R. Rahimi pour and M. Moayeri

Ceramic Department, Materials and Energy Research Centre, Tehran, Iran
Metallurgy Department, Faculty of Engineering, Tehran University

Abstract: ***The effective parameters that influence in situ cast ferroTic composites were investigated. Centrifugal casting of specimens was carried out using ceramic & metallic molds. OM, SEM and XRD techniques were used to examine the existence of flows in the specimens. Results show that the control of chemical composition, processing, cooling rate and heat treatment has***

* – استادیار پژوهشی ** – کارشناس ارشد

[DOR: 20.1001.1.2251600.1385.25.1.11.1]

a promising effect on the quality of specimens. Also remelting process leads to the hemogeneity of matrix by uniform distribution of secondary phase.

Keywords: *Cast composite, FerroTic, remelting*

۱- مقدمه

کامپوزیتهای فروتیک[1] (Fe-TiC) دسته‌ای از مواد مهندسی شامل زمینه آهنی و ذرات فاز دوم کاربید تیتانیم‌اند که به دلیل خواص مطلوب به ویژه خواص سایشی مناسب توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۱]. این دسته از مواد نو عمدتاً به روشهای ذوبی تولید می‌شوند. در سالهای اخیر روشهای ذوبی به دلیل برخورداری از برخی ویژگیها از جمله اقتصادی بودن، امکان ساخت قطعه تمام شده و عدم نیاز به ماشینکاری بعدی، در بسیاری موارد جایگزین روشهای پودری شده‌اند [۲]. روش درجا یکی ازروشهای ذوبی بوده که در آن ذرات فاز دوم در حین ساخت کامپوزیت حاصل می‌شود [۳].

در روشهای ذوبی شناسایی مسائل ذوب و ریخته‌گری امری ضروری برای ایجاد محصولاتی سالم است. از جمله نقایص ریختگی مشاهده شده در این دسته از مواد، جدانشینی ذرات، تخلخل، حفرات گازی، انقباضی و جدایش است [۴]. نوع و میزان عیوب به ماهیت مذاب، روش ریخته‌گری بستگی دارد. با شناسایی عوامل موثر در ایجاد عیوب می‌توان راهکارهای مناسبی برای رفع کردن آنها ارائه کرد. توجه به این نکته ضروری است که برخی از نقایص اجتناب ناپذیر بوده و جزو طبیعت ذوب و روش ساخت محسوب می‌شوند.

در این پژوهش به بررسی نقایص ایجاد شده در روش درجا، علل ایجاد آنها و ارائه راهکارهای مناسب برای از بین بردن و یا کاهش آنها پرداخته شده است. برخی از محققان ضمن تحقیق بر روی روشهای ساخت [۵]، تاثیر ترکیب شیمیایی اولیه بر ریزساختار [٦]، تاثیر عملیات حرارتی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی [۷]، تاثیر جنس قالب بر خواص سایشی کامپوزیت زمینه فلزی فروتیک [۸] به مواردی از نواقص برخورد کردند که بسیار تعیین کننده و با اهمیت تشخیص داده شد.در این پژوهش مشاهدات مزبور مطرح و راه حلهای مناسب برای رفع آنها ارائه شده است.عیوب مزبور در نمونه های مختلف به نوعی وجود داشته است اما به لحاظ مقایسه پذیربودن نتایج، عمدتا عیوب موجود در نمونه Fe-%10Ti-%3C (یعنی نمونه‌ای حاوی ۱۰ درصد وزنی تیتانیم و ۳ درصد وزنی کربن) آورده شده است.

۲- روش انجام آزمایش

برای ساخت نمونه‌هایی از کامپوزیت فروتیک Fe-10%ti-3%C، از چدن حاوی ٤ درصد کربن و فروتیتانیم حاوی ۷۲ درصد تیتانیم استفاده شد. عملیات ذوب با استفاده از یک کوره القایی فرکانس بالا (1MHz)، در یک بوته با گنجایش ۱۰۰ گرم انجام شد. تخلیه مذاب به داخل قالب توسط یک سیستم گریز از مرکز افقی که روی کوره نصب شده انجام شد. کلیه مراحل ذوب و تخلیه تحت شویش گاز آرگون انجام شد. شارژ داخل بوته پس از اعمال حداکثر توان کوره پس از یک دقیقه کاملاً ذوب و برای بررسی تاثیر زمان نگهداری مذاب، نمونه‌های ذوب شده به مدت ۲۰، ٤۰ و ٦۰ ثانیه در دمای $1600^{\circ}C$ نگهداری و سپس بلافاصله با استفاده از سیستم گریز از مرکز که سرعت چرخش آن ۵۰۰rpm بود به‌طور افقی به درون قالبها تخلیه شد. عملیات تخلیه حدود ۳۰ ثانیه به طول انجامید. قالبها از دو نوع جنس سرامیکی و مسی ساخته شده بودند. برخی از قالبهای سرامیکی برای کاهش سرعت انجماد در دمای $400^{\circ}C$ پیش گرم شدند.

برای بررسی سلامت قطعات از آزمایش رادیوگرافی با اشعه ایکس استفاده شد تا نمونه‌های معیوب از نمونه‌های سالم تمیز داده شوند. برای بررسی تاثیر ذوب مجدد بر روی ریزساختار کامپوزیت، نمونه‌ها در دمای ۱٦۰۰ درجه سانتیگراد مجدداً

[DOR: 20.1001.1.2251600.1385.25.1.11.1]

ذوب و پس از ریخته‌گری در قالب مربوطه در هوا سرد شدند. برای انجام عملیات حرارتی سرمایش و برگشت و نیز آنیل از یک کوره موفلی استفاده شد. برای سرمایش نمونه‌ها در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت آستینته و سپس در روغن سرمایش شدند. برگشت نمونه‌ها نیز به مدت یک ساعت در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد انجام شد. آنیل کردن نمونه‌ها هم به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۹۸۰ درجه سانتیگراد در داخل کوره انجام شد. همچنین برای بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر استحکام پیوند ذرات کاربیدی با زمینه نمونه‌ها در یک دستگاه آزمون سایش به روش پین روی دیسک، در مسافت ۷۰۰ متر و با سرعت ۰/۸ متر بر ثانیه سائیده شدند. نمونه به شکل پین و دیسک از جنس فولاد D_3 نرماله شده با سختی ۳۰۰ ویکرز بود.

بررسیهای ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری OM و میکروسکوپ الکترونی SEM انجام شد. اختلاف سختی بسیار بالای بین فاز زمینه (عمدتاً پرلیت) و فاز دوم (کاربید تیتانیم) باعث می‌شود که در حالت اچ نشده بتوان به آسانی شکل و نحوه توزیع ذرات فاز دوم را مطالعه کرد. با اچ کردن نمونه‌ها، به دلیل رنگ طوسی ذرات کاربید تیتانیم در میکروسکوپ نوری، این فاز با برخی فازهای زمینه تداخل کرده و تشخیص آن مشکل است. بنابراین در مواردی که تشخیص نوع فازهای زمینه هدف نباشد نمونه‌ها در حالت اچ نشده مورد بررسی قرار گرفت. نویسنده و همکارانش با استفاده از روش EDS و نیزXRD نوع فازهای زمینه و فاز دوم (کاربید تیتانیم) را شناسایی و اثبات کرده‌اند [٦].

۳- نتایج و بحث

کامپوزیت Fe-%10 Ti-%3C حاوی 15 درصد حجمی از ذرات TiC در یک زمینه عمدتاً پرلیتی بود. عوامل زیادی بر روی سلامت این کامپوزیت ریخته‌گری شده موثر است، برخی از این عوامل قابل پیشگیری بوده و برخی دیگر به دلیل ماهیت روش اجتناب ناپذیرند.

در اینجا نقایص متداول و مشاهده شده که به طور کلی در ساخت کامپوزیتهای فروتیک و به طور خاص در ساخت کامپوزیت Fe-%10 Ti-%3C در آنها ایجاد می‌شود مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهای مناسب برای رفع آنها ارائه شده است.

۳-۱- نواقص

۳-۱-۱- جدایش

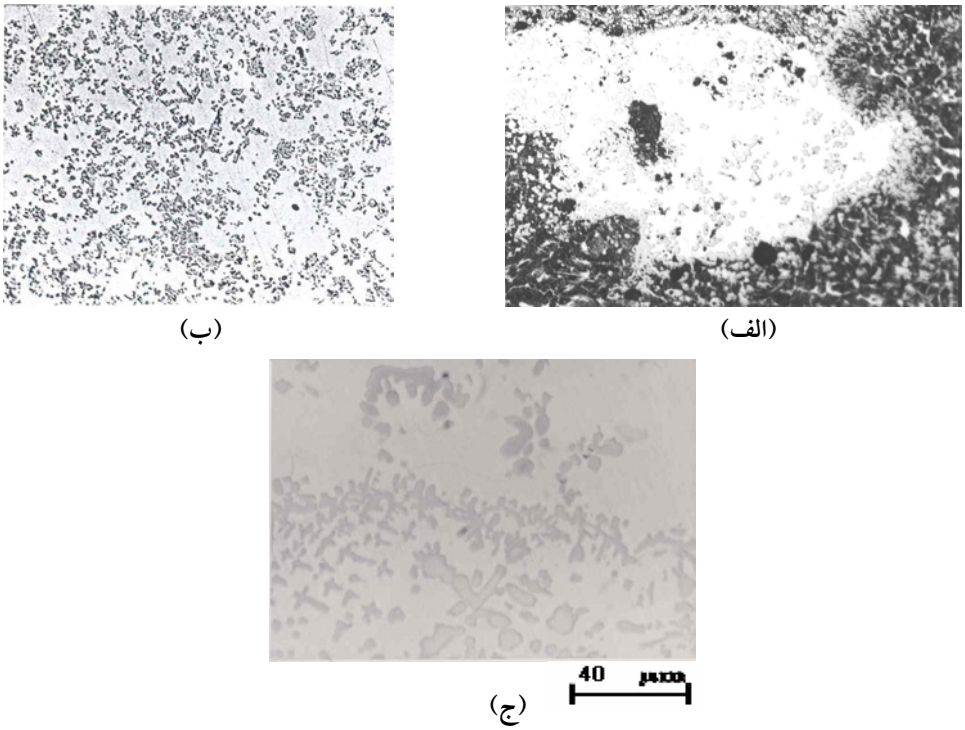
در این کامپوزیت جدایش به دو صورت ماکروسکوپی و میکروسکوپی نمایان می‌شود. جدایش میکروسکوپی در اثر توزیع نایکنواخت عناصر آلیاژی حین انجماد در زمینه و جدایش ماکروسکوپی به دو صورت جدایش در مذابها و جدایش در ذرات فاز ثانویه مشاهده شد.

۳-۱-۱-۱ جدایش در مذابها

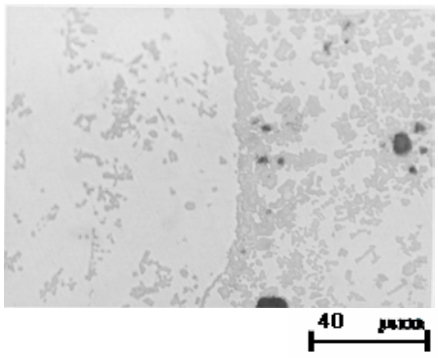
اختلاف دانسیتهٔ مذابهای چدن و فروتیتانیم و نیز زمان کم نگهداری مذابها در دمای ذوب مهمترین عوامل عدم اختلاط مذابهاست. هر چند در کوره‌های القایی فرکانس بالا به مقدار کمی مذاب متلاطم خواهد بود. در شکل (۱) تصویر میکروسکوپ نوری کامپوزیت حاوی ۱۰ درصد وزنی تیتانیم و ۳ درصد وزنی کربن که در حالت مذاب به مدت ۲۰، ۴۰ و۶۰ ثانیه در دمای ۱۶۰۰ نگه داشته شده ملاحظه می‌شود. نمونه‌ای که به مدت ۲۰ ثانیه نگهداری شده مذابهای Fe-C و Fe-Ti فرصت کافی برای اختلاط و انجام کامل واکنش بین تیتانیم و کربن و ایجاد کاربید تیتانیم را نداشته است، شکل (۱-الف). در زمان ۴۰ ثانیه اختلاط کامل و واکنشها کامل به نظر می‌آید، شکل (۱-ب). افزایش زمان باعث برخورد ذرات کاربیدی و وقوع پدیده کامل شدن[۲] و گاه جدانشینی ذرات فاز دوم شده است، شکل (۱-ج).

مذابهای Fe-Ti و Fe-C دارای چگالیهای متفاوت بوده و در نتیجه تمایل دارند که در طی انجام واکنش تغییر مکان داده وبه حالت پایدار برسند[۹]. این عامل تا حدی موجب ایجاد سیلان در مذاب می‌شود لیکن عدم زمان کافی برای تداخل

[DOR: 20.1001.1.2251600.1385.25.1.11.1]



شکل ۱- نمونه Fe -10% Ti -3%C ریخته شده به روش گریز از مرکز در قالب سرامیکی
(فاز تیره رنگ پرلیت و فاز طوسی رنگ کاربید تیتانیم، مدت زمان نگهداری در حالت مذاب : الف)۲۰ ثانیه ب) ۴۰ ثانیه ج)۶۰ ثانیه

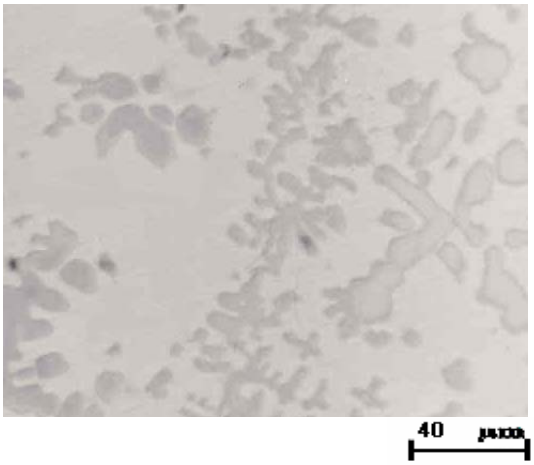


شکل ۲- عدم واکنش کامل بین مذابها و تمرکز ذرات کاربیدی در مرز مذابها در نمونه حاوی ۱۰ درصد وزنی تیتانیم و ۳ درصد وزنی کربن، ریخته‌گری شده به روش گریز از مرکز در قالب سرامیکی، مدت زمان نگهداری مذاب: ۲۰ ثانیه

مذابها موجب جدایش شده و در قطعه تمام شده ایجاد نقص کرده است. کافی نبودن زمان نگهداری مذاب در بوته و قالبهایی با سرعت تبریدی بالا نظیر قالب مسی، این نقص را شدت می‌بخشد.

در این پژوهش فروتیتانیم در پایین بوته و چدن در بالای آن قرار داشت در نتیجه اتمهای کربن برای ایجاد یک توزیع همگن و یکنواخت می‌بایست از مرز کاربیدی عبور کرده تا در نهایت ذرات کاربیدی به صورت یکنواخت در تمام زمینه ایجاد شوند. انجام واکنش بین Ti وC مانند هر واکنشی که توسط نفوذ کنترل شود به زمان و دما نیاز دارد [٤]. چنانچه در شکل (۲) ملاحظه می‌شود ذرات کاربیدی تشکیل شده لیکن در مرز میان دو مذاب تجمع پیدا کرده‌اند و فرصتی برای

[DOR: 20.1001.1.2251600.1385.25.1.11.1]



شکل ۳- خوشه‌ای شدن ذرات کاربیدی در نمونه Fe -10%Ti -3 %C، ریخته‌گری شده به روش گریز از مرکز در قالب سرامیکی پیش‌گرم شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد، درحالت اچ نشده

توزیع یکنواخت و واکنش بیشتر مذابها وجود نداشته است. انحنای موجود در شکل که در اکثر نقاط به سمت مذاب چدنی است ناشی از اختلاف ضریب نفوذ کربن و تیتانیم در دو سمت فصل مشترک مذاب چدن و مذاب فروتیتانیم است. در این نمونه علیرغم استفاده از روش گریز از مرکز برای آمیختگی هر چه بیشتر مذابها همچنان شاهد جدایش مذابها می‌باشیم.

۳-۱-۱-۲- جدایش در ذرات فاز ثانویه

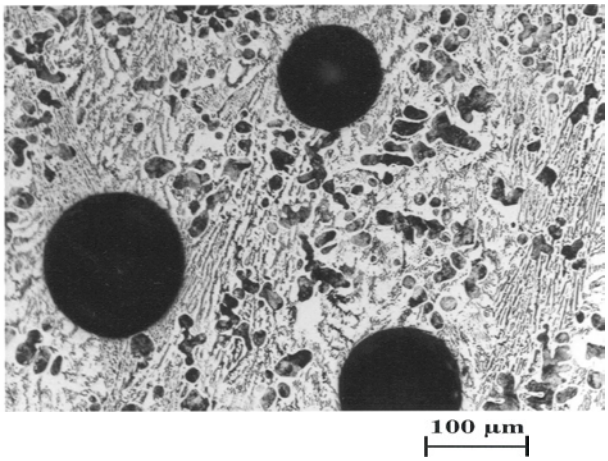
از عوامل موثر بر این نوع جدایش می‌توان روش ساخت و ماهیت مذابها را ذکر کرد. این نقص در اکثر روشهای ریختگی نمایان است و در برخی موارد اجتناب ناپذیر است.

در روش گریز از مرکز حین ریختن مذاب به درون قالب به دلیل وجود نیروی گریز از مرکز می‌توان با کنترل سرعت چرخش به توزیع مناسبی از ذرات فاز دوم دست یافت. در این روش به دلیل وجود اختلاف جرم حجمی بین اجزا نیروهای متفاوتی نیز به آنها وارد می‌شود و در نتیجه ذرات کاربیدی به یک سمت رانده می‌شوند. بدیهی است کنترل سرعت چرخش امری ضروری برای ایجاد یک قطعه سالم است. در برخی موارد که به ایجاد خواص متفاوت در قسمتهای مختلف نمونه نیاز است چنین جدایش ترجیحی مطلوب است.

در مواردی که قطعه کوچک بوده وسرعت سرمایش بالاست و یا در مواردی که از قالبهایی با قدرت تبریدی بالا استفاده می‌شود، پس از ریختن مذاب به درون قالب انجماد کامل صورت می‌گیرد و فرصتی برای جدایش ذرات فاز ثانویه وجود ندارد. در قالبهای بزرگ و یا در قالبهای پیش گرم شده شاهد جدایش ذرات کاربیدی و خوشه‌ای شدن آنها خواهیم بود. در شکل (۳) تصویر میکروسکوپ نوری نمونه‌ای که در قالب سرامیکی(پیش گرم شده) ریخته شده، نشان داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود ذرات کاربید تیتانیم در زمینه به شدت خوشه‌ای شده‌اند. در اثر برخورد ذرات به یکدیگر و رانش آنها توسط نیروهای وارده تجمع ذرات کاربیدی در یک طرف نمونه مشاهده می‌شود.

در روش ریخته‌گری ثقلی که مقدار زیادی از مذاب به داخل قالب ریخته می‌شود، ذرات TiC در بوته شناور و پس از ریخته‌گری در قالب نیز امکان به هم پیوستن را پیدا می‌کنند اختلاف جرم حجمی ذرات کاربیدی و مذابهای حاصله موجب شناور شدن ذرات در بوته‌های بزرگ حاوی مقادیر زیادی از مذاب، می‌شود [۱۰]. بر اساس قانون استوکس و عوامل موثر بر روی آن می‌توان شناور شدن ذرات را مورد بررسی قرار داد. علاوه بر آن تاثیر ذرات بر همدیگر نیز از موارد قابل توجه است [٤]. هنگامی که دانسیته ذرات

[DOR: 20.1001.1.2251600.1385.25.1.11.1]



شکل ۴- حفرات گازی در نمونهFe-10%Ti-3%C ریخته‌گری شده در قالب سرامیکی به روش گریز از مرکز، ساختار زمینه: پرلیت، محلول اچ: نایتال ۲ درصد، قالب سرامیکی

در زمینه به اندازه کافی زیاد باشد مذابی که ذره در آن شناور می‌شود تحت تاثیر ذرات دیگر واقع می‌شود و بدین ترتیب با افزایش دانسیته ذرات در مذاب سرعت شناور شدن کاهش می‌یابد. اختلاف در انرژی آزاد فصل مشترک بین سازه‌ها نیز تا حدی این مسئله را تحت شعاع قرار می‌دهد. وجود نیروهای هیدرواستاتیک در سیالات حاوی ذرات جامد، به خوشه‌ای شدن آنها کمک می‌کند. در اثر این پدیده ذرات بهم پیوسته شده و سرعت حرکت آنها تغییر می‌کند [٤].

۳-۱-۲- تخلخل

شکل (۴) نمونه‌ای از حفرات گازی در نمونه Fe-10% Ti-3%C در حالت ریخته شده در یک قالب مسی را نشان می‌دهد.

در این دسته از کامپوزیتها صرف نظر از تخلخلهای معمول ریخته‌گری نظیر تخلخلهای گازی و انقباضی، حفرات دیگری که ناشی از فرایند است، ایجاد می‌شوند. در فرایندهایی که سازه دوم در مذاب پراکنده می‌شود برای توزیع بهتر سازه دوم می‌بایست مذاب به حرکت در آید. در حین این لرزش یا تلاطم لحاظ ارتباط بیشتر بین مذاب و اتمسفر محیط امکان حل شدن بیشترگاز درمذاب وجود دارد.

در کامپوزیتها امکان جوانه‌زنی حبابهای گازی در حین انجماد بر روی سطح سازه دوم وجود دارد که در نتیجه موجب شناور شدن آنها می‌شود. علاوه بر آن امکان پیوستن حبابهای گازی به ذرات فاز دوم حین حرکت ذرات وجود دارد [۷].

عدم سیالیت کافی در حین ریخته‌گری و نحوه انجماد مذابهای آهنی حاوی TiC یکی از عمده‌ترین دلایل ایجاد حفره در قطعات ریخته شده است. حفرات گازی همان‌طور که در شکل (٤) مشخص است به صورت کاملاً گرد با سطحی صاف در نمونه‌ها مشاهده می‌شوند. ورود گاز از اتمسفر محیط، واکنشهای درون مذاب و حبس شدن هوا درون قطعات به دلیل شرایط نامناسب ریختگی از دیگر عوامل حفرات گازی‌اند. حفرات انقباضی که اغلب به صورت نامنظم در نمونه‌ها مشاهده می‌شوند، عمدتاً در اثر تغذیه‌گذاری نامناسب در قطعات ایجاد می‌شوند. همان‌گونه که ذکر شد عدم سیالیت کافی یکی از عوامل ایجاد حفره در قطعات است، در نتیجه کنترل ترکیب شیمیایی برای دستیابی به کسر حجمی بهینه از کاربید تیتانیم یکی از عوامل کنترل‌کننده سیالیت و در نتیجه حفرات است. طراحی صحیح سیستم راهگاهی و تغذیه‌گذاری در کنار کنترل ترکیب شیمیایی می‌تواند کمک زیادی به ساخت قطعات فاقد حفرات انقباضی کند.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1385.25.1.11.1]

(پ) (ب) (الف)

شکل ۵-تصاویر رادیوگرافی از نمونه‌های حاوی: الف) حاوی ۱۵ درصد حجمی TiC در قالب سرامیکی، وضعیت نمونه سالم ب) ۱۵ درصد حجمی TiC در قالب مسی، وضعیت نمونه: دارای تخلخل پ) ۵ درصد حجمی TiC در قالب مسی، وضعیت نمونه: سالم

۳-۱-۳- نیامد[۳]

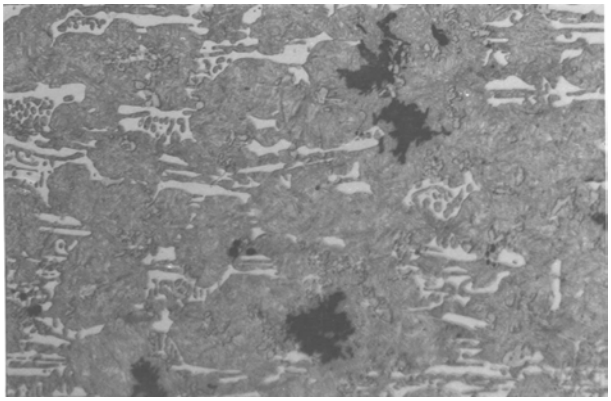
نیامد و یا به عبارت دیگر پر نشدن قالب از مذاب یکی دیگر از عیوب مشاهده شده در نمونه‌های ریخته‌گری شده است که بعضاً در قطعات مشاهده می‌شود. با توجه به حضور فاز دوم این عیب بیش از سایر موارد کامپوزیتهای ذره‌ای را تحت تاثیر قرار می‌دهد. حبس شدن حبابهای هوا در قطعات، حضور مقادیر بالایی از ذرات فاز دوم، حضور آخالها و ذرات ناخواسته در اثر واکنش‌های شیمیایی درون مذاب از علل سیالیت ناکافی مذاب‌اند [٤].

در شکل (۵) تصاویر رادیوگرافی نمونه‌هایی با درصدهای مختلف از فاز دوم در دو نوع قالب مسی و سرامیکی نشان داده شده است . نمونه ریخته شده در قالب سرامیکی نسبت به نمونه ریخته شده در قالب مسی با درصدهای یکسان از ذرات کاربید تیتانیم (۱۵ درصد حجمی) سیالیت بهتری داشته و مذاب به طور کامل به داخل قالب سیلان پیدا کرده است. در نمونه های دارای مقادیرکمتراز ذرات فاز دوم، سیالیت بیشترو احتمال بروز عیب کمتر می‌شود.

نقطه ذوب چدن (Fe-4%C) و فروتیتانیم (Fe-72%Ti) در محدوده ۱۱۰۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد است[۱۱]، در نتیجه بلافاصله بعد از ذوب و تماس مذابها در بوته علی‌رغم ایجاد فوق ذوب (۱۶۰۰ درجه سانتیگراد) ذرات TiC تحت نیرو محرکه بالایی تشکیل می‌شوند. مقدار، اندازه و شکل این ذرات بستگی به شرایط ذوب و ترکیب شیمیایی اولیه مذاب دارد. بسیاری از خواص فیزیکی و شیمیایی یک مذاب و یا خواص بعدی یک آلیاژ و یا کامپوزیت تابعی از ترکیب شیمیایی اولیه آنهاست. به عنوان مثال نزدیک بودن ترکیب آلیاژ به نقطه یوتکیک در اکثر آلیاژها موجب کاهش نقطه ذوب و افزایش سیالیت مذاب حین ریخته‌گری می‌شود [۹]. کامپوزیتهای فروتیک با توجه به روش تولیدشان (روش درجا) بیش از بقیه آلیاژها تحت تاثیر این عامل‌اند زیرا زمینه در کامپوزیتهای فروتیک از چدن تا انواع فولادهای آلیاژی را شامل می‌شود [۱۲]. انتخاب ترکیب شیمیایی مناسب می‌تواند به تولید هر یک از آنها منجر شده و در نتیجه خواص متفاوت و شرایط خاصی را بر مذاب اعمال کند. ترکیب شیمیایی علاوه بر تاثیری که بر زمینه دارد بر مقدار و نوع فاز دوم نیز موثر است. تغییر در ترکیب شیمیایی میزان فاز دوم را تغییر داده و موجب تغییر در سیالیت مذاب می‌شود.

وجود مقادیر زیادی از این ذرات درون مذاب ضمن کاستن از سیالیت آن، سطوح مناسبی برای جوانه‌زنی بوده و

[DOR: 20.1001.1.2251600.1385.25.1.11.1]



شکل ۶- تشکیل گرافیت برفکی شکل در نمونه آنیل شده Fe-10% Ti-3%C : ساختار زمینه پرلیت، شرایط عملیات حرارتی: گرم کردن نمونه تا $^{\circ}C$ ۹۵۰ به مدت ۱ ساعت و سرمایش در هوا، ابعاد نمونه: نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱/۵ و طول ۵ سانتی متر

موجبات انجماد خمیری را فراهم می‌آورد. تاثیر مقدار ذرات فاز دوم بر ویسکوزیته به مراتب بیشتر از تاثیر دماست. به صورت تجربی مشاهده شده است که در شرایط یکسان از تولید ،عیوب ریختگی در نمونه حاوی مقادیر بیشتری از ذرات فاز دوم، بیشتر است [٤].

۳-۱-٤- عیوب ناشی از عملیات حرارتی

در صورت نگهداری نمونه‌ها در دمای آستنیته کردن، $^{\circ}C$۹۸۰، شاهد پدیده گرافیت زایی خواهیم بود که به شدت بر خواص مکانیکی قطعه نهایی موثر است. نگهداری طولانی نمونه‌ها در این دما به موجب رابطه (۱) سبب تبدیل فاز شبه پایدار Fe_3C به گرافیت می‌شود.

$$Fe_3C \rightarrow Gr + \gamma(980^{\circ}C) \qquad (۱)$$

گرافیت تولید شده به صورت برفکی است، شکل(۶).

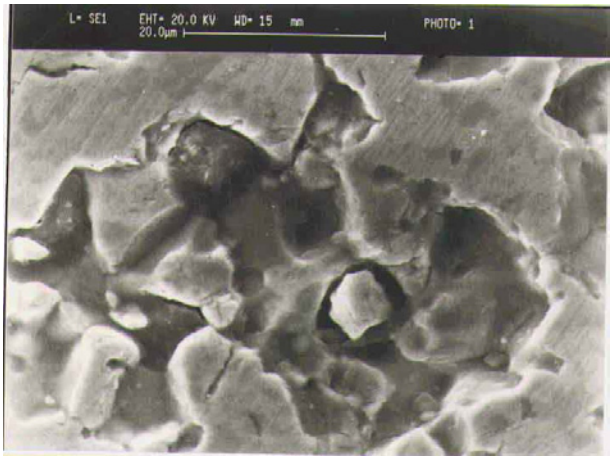
بررسی تاثیر منفی ایجاد گرافیت بر استحکام نهایی کامپوزیت فروتیک در مرجع [۵] آورده شده است.

با توجه به اینکه از عمده مصارف این دسته از مواد مصارف سایشی می‌باشد حضور گرافیت و نقش آن به عنوان روغنکاری جامد تاثیر مثبتی بر مقاومت سایشی قطعه در حال سایش دارد. در نمونه‌های عملیات حرارتی شده، خواص سایشی بهبود یافته که البته حضور فازهایی سخت نظیر مارتنزیتی برآن بی‌تاثیر نیست [۱۳].

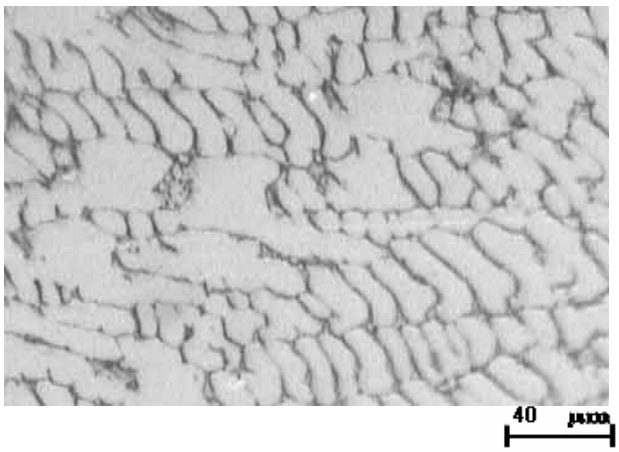
در شکل (۷) تصویر میکروسکوپ الکترونی از الکترونهای ثانویه نمونه سائیده شده در مسافت ۷۰۰ متر آورده شده است. این نمونه قبل از سایش تحت عملیات حرارتی سرمایش و برگشت قرار گرفت. ضریب انبساط حرارتی متفاوت فازهای کاربیدی و آهنی موجب انبساط و انقباضهای متفاوت بین آنها شده و در نتیجه به ایجاد تنش و احیانا ترک، در فصل مشترک منجر شده که از استحکام پیوند بین ذرات و زمینه کاسته و در مواردی که تحت سایش قرار می‌گیرند ذرات کاربید تیتانیم از زمینه کنده شده و موجبات تغییر مکانیزم سایش و در اکثر موارد کاهش مقاومت سایشی را فراهم می‌آورد [١٤ و ١٥]. در مراجع [۱ و ۷] به طور مفصل در مورد مکانیزم سایش و سایر جنبه‌های عملیات حرارتی بحث شده است.

در مواردی که نمونه برای مدت زمان طولانی تحت عملیات آنیل قرار می‌گیرد سطح نمونه به تدریج کربن خود را از دست داده و در نهایت تبدیل به فریت می‌شود. شکل (۸) تصویر نمونه شامل ۱۰ درصد تیتانیم و ۳ درصد کربن که به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۹۸۰ درجه سانتیگراد آنیل شده است را نشان می‌دهد. سطح نمونه کاملاً دکربوره شده به طوری که دانه‌های فریتی در تصویر مشخص است. با توجه به زمانهای نگهداری در دمای آستنیته کردن فواصل مختلفی ازسطح نمونه

[DOR: 20.1001.1.2251600.1385.25.1.11.1]



شکل ۷- تصویر SEM از الکترونهای برگشتی نمونه Fe-10% Ti-3%C در حالت سرمایش و برگشت شده بعد از سائیده شدن به مسافت ۷۰۰ متر



شکل۸- نمونه عملیات حرارتی شده، دانه‌های فریت در سطح نمونه Fe-10% Ti-3%C، محلول اچ نایتال ۲ درصد

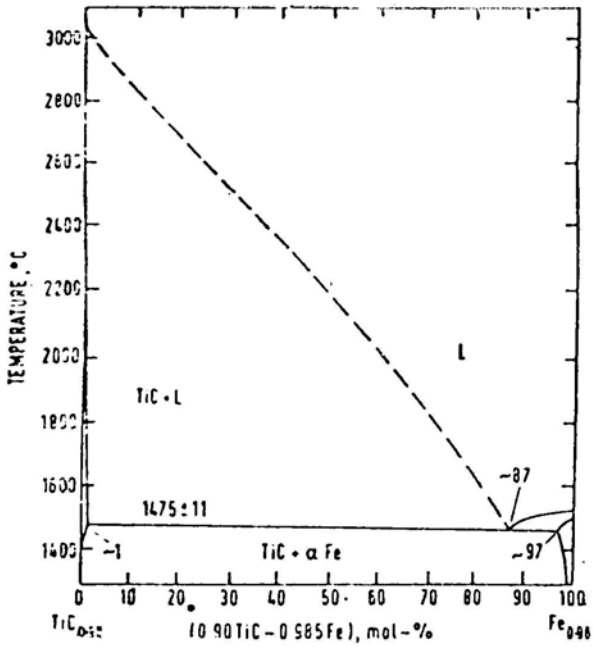
تحت تاثیر این پدیده قرار می‌گیرد واز استحکام نهایی قطعه می‌کاهد. این پدیده با نتایج آرنولد [۱۶] که در حین عملیات حرارتی این دسته از کامپوزیتها مشاهده شده، مطابقت دارد.

۳-۲- راهکارهای رفع نواقص

همان‌گونه که در ابتدای بخش ۳ اشاره شد ترکیب شیمیایی و روش ساخت دو علت عمده ایجاد عیوب در قطعات ریختگی‌اند. کنترل شرایط حاکم بر یک روش ساخت مشخص و انتخاب ترکیب شیمیایی مناسب تا حد زیادی موجب کاهش عیوب می‌شود. کنترل ترکیب شیمیایی به دلیل ایجاد زمینه‌ای با ساختارهای متفاوت همچنین ایجاد مقادیر متفاوتی از کاربید تیتانیم نقشی اساسی و تعیین کننده را خواهد داشت.

راقوناس[۴] و همکارانش در سیستم Fe/TiC، ۱۰ درصد حجمی از کاربید تیتانیم را برای ایجاد قطعه‌ای سالم در ریخته گری استاتیک پیشنهاد کردند که با یافته‌های موجود در این پژوهش مطابقت دارد. آنها همچنین نشان دادند که در مقادیر بیشتر از ۱۰ درصد فاز دوم، برای ساخت قطعه‌ای سالم اعمال فشار به قطعه در حال انجماد ضروری است. برای ساخت قطعات سالم حاوی مقادیر بیشتری از کاربید تیتانیم می‌توان از

[DOR: 20.1001.1.2251600.1385.25.1.11.1]



شکل ۹- نمودار تعادلی دوتایی آهن –کاربید تیتانیم [۷]

روشهای دیگری نظیر ریختهگری کوبشی استفاده کرد. جایگزین کردن روش ریختهگری کوبشی با فشار حدود psi ۱۰۰۰ موجب انجماد درون بوته میشود و در نمونههای حاوی مقادیر زیادی از ذرات فاز ثانویه نتایج بهتری از دانسیته و کاهش تخلخل را در پی داشته است [۱۷].

در روش گریز از مرکز هر چه سرعت چرخش قالب حاوی مذاب بیشتر باشد امکان جابهجایی ذرات سبکتر به سمت مرکز و رانده شدن مذاب آهنی به سمت بیرون بیشتر شده و از سوی دیگر از میزان تخلخل کاسته میشود بنابراین اعمال یک سرعت بهینه برای دستیابی به قطعهای سالم امری ضروری است. میزان سرعت بستگی به ترکیب شیمیایی و میزان فاز دوم دارد. در مورد نمونه C Ti-3% Fe-10% rpm ۵۰۰ سرعت مناسبی تشخیص داده شد.

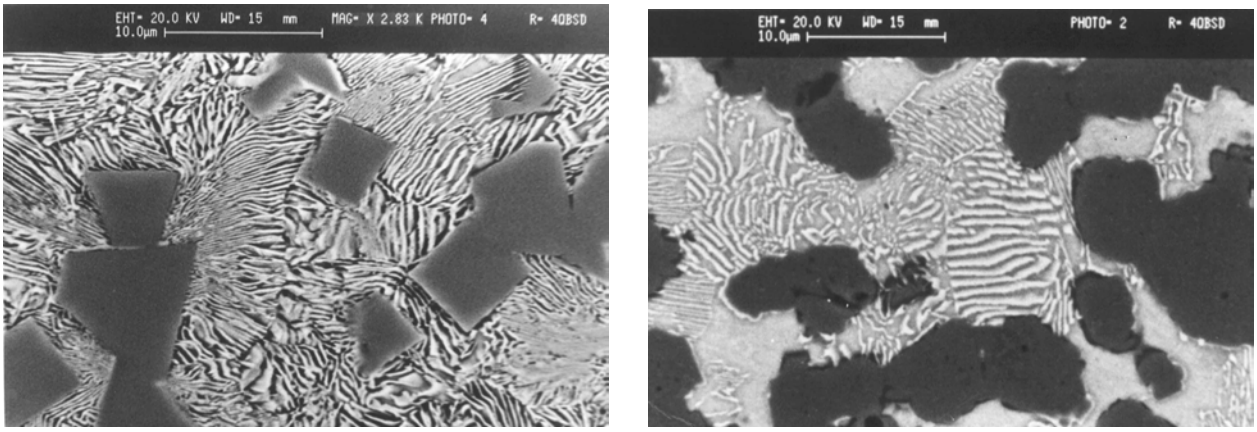
تخلخل در انواع گازی و انقباضی از دیگر عیوبی است که بعضاً در قطعات مشاهده میشود. حفرات گازی در اثر تماس مستقیم بوته با اتمسفر محیط و ورود هوا به آن ایجاد میشود بنابراین محافظت مذاب در اتمسفر مناسب میتواند تا حد زیادی سلامت قطعات را تضمین کند. محافظت مذاب با اتمسفر گاز خنثی یکی از راهکارهای پیشنهادی برای جلوگیری از حضور حفرات گازی است. حفرات انقباضی در مواردی که فوق ذوب نامناسبی بر مذاب اعمال میشود و نیز طراحی نامناسب سیستم راهگاهی در قطعات ایجاد میشود. ریختهگری در دمای مناسب و طراحی مناسب سیستم راهگاهی مانع از بروز این عیب در قطعات ریختگی میشود.

نیامد از دیگر عیوبی است که بعضاً در برخی قطعات مشاهده شد که عمدتاً ناشی از دمای نامناسب ریختهگری و حضور مقادیر زیادی از ذرات کاربید تیتانیم در مذاب است. حبس شدن هوا در قطعات از دیگر علل ایجاد نیامد بوده که با طراحی سیستم راهگاهی مناسب و ایجاد امکان خروج حبابهای گازی میتوان این نقص را بر طرف کرد. در صورت بزرگ بودن ذرات اکسیدی از ذرات فاز دوم میتوان با تعبیه فیلتر در سیستم راهگاهی از ورود آنها به داخل محفظه قالب جلوگیری کرد.

عیوبی نظیر جدایش در مذابها گاه در ساخت کامپوزیتهای فروتیک به وقوع پیوست. همانطور که در شکل (۱) مشاهده میشود ذرات کاربید تیتانیم در مرز دو مذاب تجمع کرده و واکنش بیشتر دو مذاب میسر نیست در نتیجه با ایجاد تلاطم بیشتر در مذاب میتوان موجبات توزیع یکنواخت ذرات کاربیدی و نیز دسترسی و تماس بیشتر مذابها را فراهم آورد.

یکی از راهکارهایی که توسط آن میتوان تا حد زیادی این عیوب ریختگی را برطرف ساخت فرایند ذوب مجدد[۵] است. برای این کار نمونههای کامپوزیتی ساخته شده مجدداً در دمای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد ذوب شدند. در این دما با توجه به نقطه ذوب بالای کاربید تیتانیم (تقریباً $^{\circ}C$ ۳۱۰۰) این ذرات به هیچ وجه ذوب نمیشوند بلکه به صورت جزیی در مذاب حل میشوند. شکل کاربیدها پس از ذوب مجدد گویای رسوب مجدد آنهاست.این فرصیه با نمودار تعادلی دوتایی Fe-TiC مطابقت دارد شکل (۹) [۹]. در دمای مذکور ذرات کاربیدی به تدریج در مذاب حل میشوند. برخی از ذرات کوچک کاملاً و ذرات درشتتر به مقدار جزیی حل

[DOR: 20.1001.1.2251600.1385.25.1.11.1]



(ب) (الف)

شکل ۱۰-تصویر میکروسکوپ الکترونی از:
الف) نمونه ذوب مجدد نشده، ذرات کاربید تیتانیم (فاز تیره رنگ) به صورت نامنظم و از
ب) نمونه ذوب مجدد شده،که ذرات کاربید تیتانیم به صورت چهارگوش مشخص است

می‌شوند. با سرد کردن مذاب سطوح ذرات حل نشده مکانهای ترجیحی مناسبی برای رسوب TiC هستند.

در شکل (۱۰) تصویر میکروسکوپ الکترونی دو نمونه با ترکیب شیمیایی ثابت در دو حالت ریختگی شکل (۱۰-الف) و ذوب مجدد شده شکل (۱۰-ب) آورده شده است. شکل متقارن ذرات TiC در نمونه ذوب مجدد شده کاملاً مشخص است. در این شکل توزیع یکنواخت کاربیدها و شکل مکعبی آنها مشخص است. در اثر ذوب مجدد شکل کاربیدها تیتانیم به صورت چند وجهیهای منظم (نزدیکترین شکل به حالت تعادلی) بوده که این ویژگی موجب بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و ریختگی می‌شود. علاوه بر اینکه در این حالت پیوند میان ذرات کاربیدی و زمینه از استحکام مناسبی برخوردار است. اعمال فرایند ذوب مجدد علاوه بر اصلاح شکل و نحوه توزیع ذرات کاربیدی موجب یکنواختی ساختار زمینه نیز شده است.

با توجه به خواص سایشی مطلوبی که این دسته از مواد از خود به نمایش می‌گذارند بررسی فاکتورهای موثر بر روی آن ضروری است. انجام عملیات حرارتی سرمایش اگر چه با ایجاد فازهای سخت موجب افزایش مقاومت به سایش می‌شود اما به جهت تنشهای حرارتی از آن می‌کاهد، لذا انجام عملیات سرمایش به همراه برگشت برای کاستن از تنشهای داخلی مطلوب است.

٤- نتیجه‌گیری

۱. کنترل ترکیب شیمیایی اولیه، فرایند ساخت و عملیات حرارتی بعدی مناسب می‌تواند به مقدار زیادی سلامت کامپوزیت ریختگی فروتیک را تضمین کند.
۲. حضور درصد بالایی از ذرات فاز ثانویه موجب عیوبی از جمله تخلخل و عدم سیالیت می‌شود. بنابراین مقدار ذرات فاز دوم در روش ریختگی تولید کامپوزیت دارای محدودیت است.
۳. گرچه کامپوزیت فروتیک عملیات حرارتی پذیر است اما به علت اختلاف ضریب انبساط حرارتی فاز دوم و زمینه برای جلوگیری از ایجاد ترک در فصل مشترک دو فاز باید تا حد امکان از گرم و سرد کردن کامپوزیت مذکور اجتناب شود.
٤. نگهداری کامپوزیت برای زمانهای طولانی در دمای آستنیته کردن موجب تجزیه سمنتیت به گرافیت شده که این پدیده بر خواص سایشی و مکانیکی قطعه تاثیر می‌گذارد.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1385.25.1.11.1]

۵. روش ذوب مجدد از جمله روشهایی است که تا حد زیادی از عیوبی نظیر خوشه ای شـدن و جـدایش در کامپوزیتهـای فروتیک می کاهـد. اسـتفاده از ایـن روش مـو جـب ایجـاد ساختار یکنواخت زمینه با توزیع و شـکل مناسـبی از ذرات فاز دوم می‌شود.

واژه نامه

1. ferrotic
2. repening
3. missrun
4. raghunath
5. remelting

مراجع

1. Rahimipour, M. R., and Rajabi, A., "Influence of Titanium Content on Matrix Microstructure Wear Bahaviuor of In situ Fe/TiC Composites," *International Journal of Engineering Science.*, Vol. 14, No. 2, pp 109-119,2003.
2. Terry, B. S., and Chinyamakobvu, D. S., "In Situ Poduction of Fe-TiC Composites by Ractions in Liquid iron Aloys," *Journal of Materials Science Letters* 10, pp. 628-629, 1991.
3. Kattamis, T. Z., and Suganuma, T., "Solidification Processing and Tribological Behavior of Particulate TiC-Ferrous Matrix Composites," *Materials Science and Engineering*, A128, pp. 241-252, 1990.
4. Ray, S., "Review Synthesis of Cast Metal Matrix Particulate Composites," *Journal of Materials Science*, Vol. 28, pp. 5397-5413, 1993.

۵. رجبی آ.، و رحیمی پور، م.ر. ،"اثر روش ساخت بر خواص مکانیکی کامپوزیت فروتیـک،" *مجموعـه مقـالات پنجمـین کنگره سالیانه انجمـن مهندسـین متـالورژی ایـران*، دانـشگاه امیرکبیر، ص۷۶۲ –۷۵۵ , آبان ۱۳۸۰.

۶. رحیمی پور، م.، " تاثیر ترکیـب شـیمیایی بـر ریـز سـاختار کامپوزیتهای فروتیک،" *مجله دانشکده فنی دانـشگاه تبریـز*، جلد ۲۸، شماره ۲، ص ۳۶–۳۱ ، ۱۳۸۱.

۷. معیری، م.، "تاثیر عملیـات حرارتـی بـر خـواص مکـانیکی کامپوزیتهای فروتیک،" پایان نامه کارشناسی، دانـشگاه علـم و صنعت ایران، ۱۳۸۲ .

۸. رحیمی پور، م.، و رجبی آ.، "بررسی تاثیر جـنس قالـب بـر خـواص سایـشی کامپوزیـت Fe/TiC ،" *مجموعـه مقـالات ششمین کنگره سالیانه انجمـن مهندسـین متـالورژی ایـران*، دانـشگاه علـم و صنعت ایران، سال ۱۳۸۱، ص ۷ –۱.

9. Terry, B. S., andChinyamakobvu, O. S., "Dispersion and Reaction of TiC in Liquid Iron Alloy," *Materials Science and Technology*, Vol. 8, pp. 399, 1992.
10. Liu, Z., and Fredriksson, H., "On Kinetics of Carbide Precipitation During Reaction Between Graphite and Fe-Ti Liquids Under Microgravity," *Metallurgical Trasnsaction A*, 28A, pp. 707-719, 1997.
11. Murakami, Y., H. Kimura, H., and Nishimura, N., "An Investigation on the Titanium-Iron-Carbon System," *Trans.of Nati .Resea .Ins. for Metal*, Vol. 1, No. 1, 1959.
12. Panchal, J. M., Vela, T., and Robisch, T., "Ferro-TiC Cements for Errosion Resistant Applications," *Alloy Technology Int*., Inc. 1992.
13. Ames, W., and Alpas, A. T., "Wear Mechanisms in Hybrid Composites of Graphite-20 Pct Sic in A356 Aluminium Alloy (Al-7 Pct Si-0.3 pct Mg)," *Metallurgical Transaction A*, Vol. 26A, pp. 85-98, 1995.
14. Pickering, F. B., "Some Effect of Non-Metallic Inclusion on the Properties of Steels," *Proceeding of Mechanical Working and Steel Processing*, pp. 381-401, 1989.
15. Pagounis ,E., and Lindroos, V. K., "Processing and Properties of Particulate Reinforced Steel Matrix Composites," *Materials Science and Engineering* A246, pp. 221-234, 1998.
16. Prill, A. L., and Tarkan, S. E., "Heat Treating of Ferro-TiC C Steel -Bonded Carbide," *ASTM Eng.Conf*., 1968.
17. Raghunath, C., Bhat, M. S. and Rohatgi, P. K., "Technique for Synthesizing Fe-TiC Composites," *Scripta Metallurgica et Matcrialia*, Vol. 32, No. 4, 1995.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1385.25.1.11.1]