

مکانیزم تشکیل ذرات TiB_2 در کامپوزیت زمینه فلزی $Al-TiB_2$ به روش آلیاژ-آلیاژ

مسعود امامی

استادیار گروه مهندسی متالورژی و مواد - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

همایون طاهبازفر

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی متالورژی و مواد - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۰/۴/۲، تاریخ تصویب ۸۱/۴/۱)

چکیده

در این تحقیق، کامپوزیت $Al-TiB_2$ از اختلاط دو آمیزان $Al-Ti$ و $Al-B$ به صورت مذاب تهیه گردید. نسبت Ti به B بگونه ای انتخاب گردید که ذرات TiB_2 به صورت نسبتا کاملی در زمینه آلومینیوم تشکیل گردند. آلیاژهای $Al-8\%Ti$ و $Al-4\%B$ نیز با استفاده از نمکهای K_2TiF_6 و KBF_4 ساخته شدند. مطالعه نحوه تشکیل ذرات سرامیکی TiB_2 با بکارگیری $Hot Stage$ و میکروسکوپ نوری صورت گرفت. این امر امکان مشاهده مستقیم استحاله فازی را ممکن ساخته و از طریق ضبط تصاویر واقعی و مشاهده آن مکانیزم استحاله تعیین گردید. ضمنا با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مجهز به سیستم آنالیز $EDAX$ ، مطالعه تغییر حالت در نمونه های پس از انجماد نیز میسر گردید. بررسی صورت گرفته با سیستم $Hot Stage$ نشان داد که حرکت اتمی بر (B) به سمت ذرات $TiAl_3$ و ترکیب با آن موجب تشکیل ذرات TiB_2 در فصل مشترک ذرات $TiAl_3$ و زمینه آلومینیوم میگردد. به دلیل کوچک بودن شعاع اتمی عنصر بر (B) و امکان نفوذ آن از بین ذرات TiB_2 دسترسی به تمام اتمهای مهاجر (B) در فصل مشترک پیشرونده موجود بوده و محصول نهایی ذرات بسیار ریز TiB_2 بویژه بصورت خوشه های آگلومره شده میباشد که بدلیل ماهیت گرمایزای واکنش و آزاد شدن حرارت در تکامل فرآیند تشکیل TiB_2 این امر صورت می گیرد. مطالعات میکروسکوپی در هنگام مشاهده شرایط واقعی فرآیند نشان می دهد که بدلیل تحرک ذرات TiB_2 اولیه بر روی فاز $TiAl_3$ و جدا شدن راحت آنها از ذرات $TiAl_3$ ، امکان رشد ذرات در این حالت بیشتر بوده و با نفوذ بر (B) به درون ذرات $TiAl_3$ ، ذرات TiB_2 ساخته شده در حین رشد خود با اتصال به ذرات TiB_2 اولیه به صورت حلقه ای از ذرات آگلومره شده جایگزین ذرات بزرگ $TiAl_3$ میگرددند.

واژه های کلیدی: کامپوزیتهای زمینه فلزی، آلیاژهای آلومینیوم، مکانیزم تشکیل ذرات TiB_2 ، ریزساختار

مقدمه

البته در کنار این مزایا معایبی چون کاهش قابلیت ماشینکاری، خواص خستگی حرارتی ضعیف و قیمت بالا را نیز میتوان نام برد [۱ و ۲].

استفاده از کامپوزیت بعنوان ماده مهندسی در نیمه دوم قرن بیستم شدت بیشتری یافت و در طی ۲۰ سال اخیر مطالعات گسترده ای بر روی انواع مختلف مواد کامپوزیتی زمینه فلزی انجام و روشهای متعددی مورد آزمایش قرار گرفته است. یکی از فرآیندهای شناخته شده روش درجا میباشد که جهت تولید کامپوزیتهای زمینه آلومینیومی در سال ۱۹۸۰ ابداع گردید [۳]. روشهای درجا به فرآیندهای

با پیشرفت سریع فن آوری همواره تولید موادی جدید با خصوصیاتی برتر مورد نظر بوده تا نیازهای صنایع مختلف را بخصوص در صنایع نظامی و هوا - فضا مرتفع سازد.

در مورد سازه های دینامیکی مانند هواپیما این نیاز بیشتر محسوس است، زیرا علاوه بر استحکام بالا مسئله سبکی نیز مطرح میباشد. کامپوزیتهای زمینه فلزی در مقایسه با آلیاژ زمینه دارای خواص بهتری از نظر مدول الاستیک، استحکام در دمای بالا و مقاومت در برابر اکسیداسیون میباشد.

شکل پذیری خوب در دمای محیط بوده و همراه با ۸٪ افزایش در مدول الاستیسیته و حفظ استحکامی تا دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد میباشد [۸].

فرآیند مهم دیگری که برای تولید کامپوزیت های زمینه آلومینیومی با ذرات سخت TiB_2 عرضه شده است فرآیند مخلوط نمکها میباشد. در این فرآیند نمکهای متداول حاوی Ti و B بترتیب K_2TiF_6 و KBF_4 میباشد [۹ و ۱۰]. مهمترین مزیت این کامپوزیت ریز بودن ذرات TiB_2 (۱-۵ میکرون) میباشد که پایداری خوبی در آلومینیم مذاب داشته و با آن وارد واکنش نمیشود. این کامپوزیت قابلیت ماشینکاری خوبی داشته و همچنین از مقاومت به سایش خوبی برخوردار است [۱۱].

یکی از فرآیندهای مایع- جامد فرآیند آلیاژ- آلیاژ میباشد که هم در حالت مایع و هم پلاسما (در درجه حرارت های بسیار بالا) انجام میگردد [۱۲]. این روش نسبت به حالت پودری از سرعت کمتری برخوردار است و بدلیل ارزانتر بودن آلیاژها نسبت به پودر آنها روش اقتصادی تر است.

در این پژوهش هدف اصلی مطالعه نحوه تشکیل ذرات TiB_2 در زمینه آلومینیم خالص میباشد. از جمله عوامل مهمی که بر نحوه شکل گیری ذرات از طریق فرآیند درجا تأثیر دارند میتوان از ترکیب شیمیایی مواد، درجه حرارت اختلاط، درجه حرارت فوق ذوب و زمان واکنش نام برد.

روش تحقیق

برای ساخت آلیاژساز B 4% wt Al از آلومینیوم خالص تجارتي و نمکهای K_2TiF_6 و KBF_4 خالص استفاده گردید. نمکهای حاوی Ti و B به همراه مواد گدازآور و کریولیت به مذاب Al در کوره القایی اضافه گردیدند. عمل همزدن توسط سیستم القایی همراه با همزدن دستی بگونه ای مطلوب در مدت زمان ۳۰ دقیقه صورت گرفت تا واکنش بطور موثر انجام پذیرد. بعد از تهیه دو آمیزان، آنها را در دو بوتله گرافیتی بطور جداگانه ذوب و سپس در بوتله دیگری مخلوط نموده که با همزدن بوسیله میله گرافیتی کامپوزیت شکل گیرد. در این شرایط مخلوط دو آلیاژ در بک کوره الکتریکی نگهداشته شد تا واکنش تشکیل ذرات TiB_2 کامل شود. در پایان واکنش بوتله را از کوره خارج نموده و پس از عمل همزدن مجدد آلیاژ مذاب

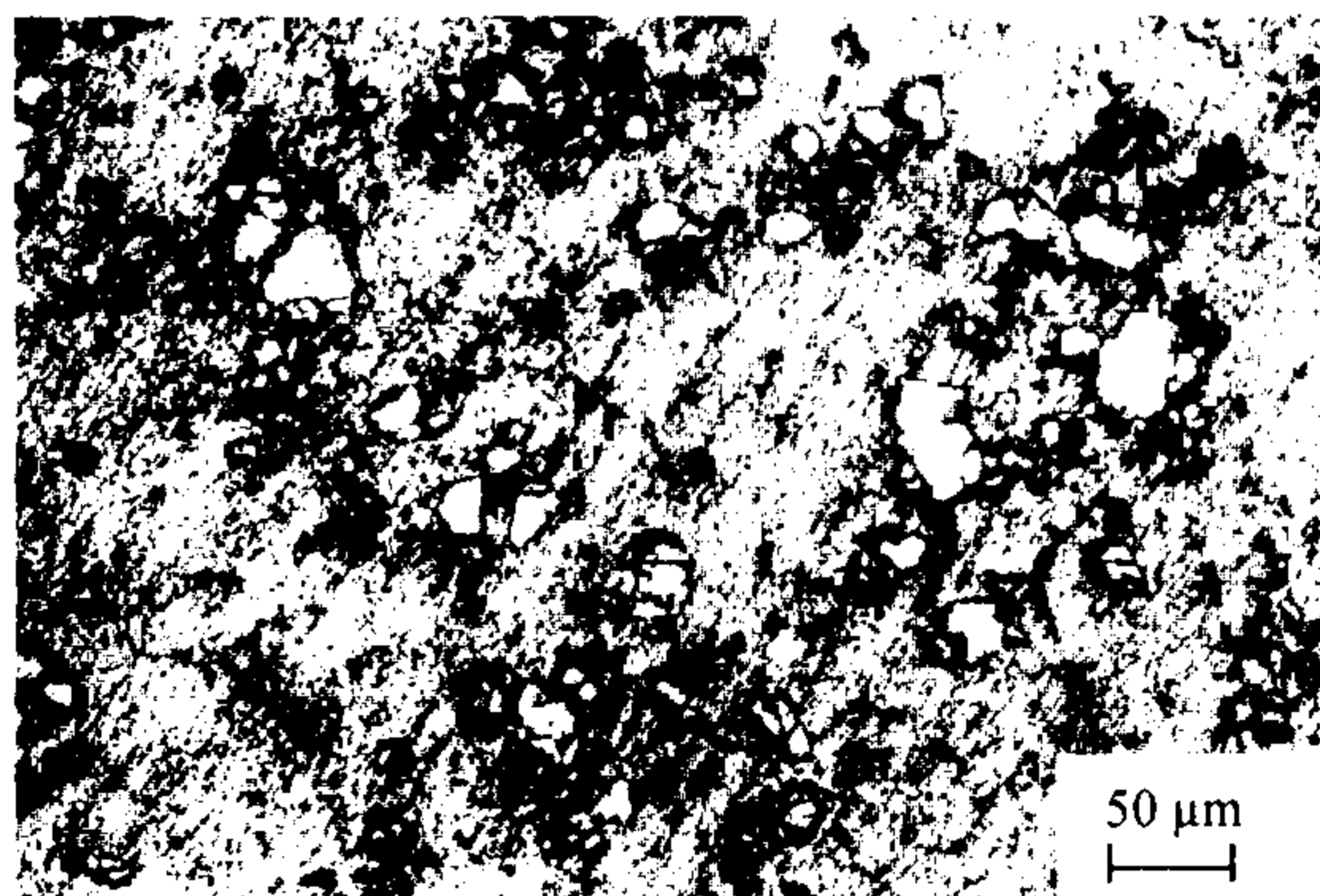
متعددی تقسیم می گردد که روش آلیاژ - آلیاژ یکی از این فرآیندها میباشد که در سال ۱۹۸۷ توسط Brupbacher و همکارانش ابداع شد [۴].

کامپوزیتهای تولید شده به روش درجا از پایداری ترموشیمیایی بالایی برخوردار بوده و برای کاربردهای پیشرفته سازه ای و سایشی مناسب می باشند. اختلاط مکانیکی الیاف و یا ذرات با زمینه های مختلف فلزی بگونه ایست که غالباً از نظر ترمودینامیکی پایدار نمی باشند، ولی چنانچه شرایط مساعدی برای جوانه زنی فاز دوم از فاز زمینه مادر ایجاد شود پایداری ترمودینامیکی بیشتری را میتوان انتظار داشت.

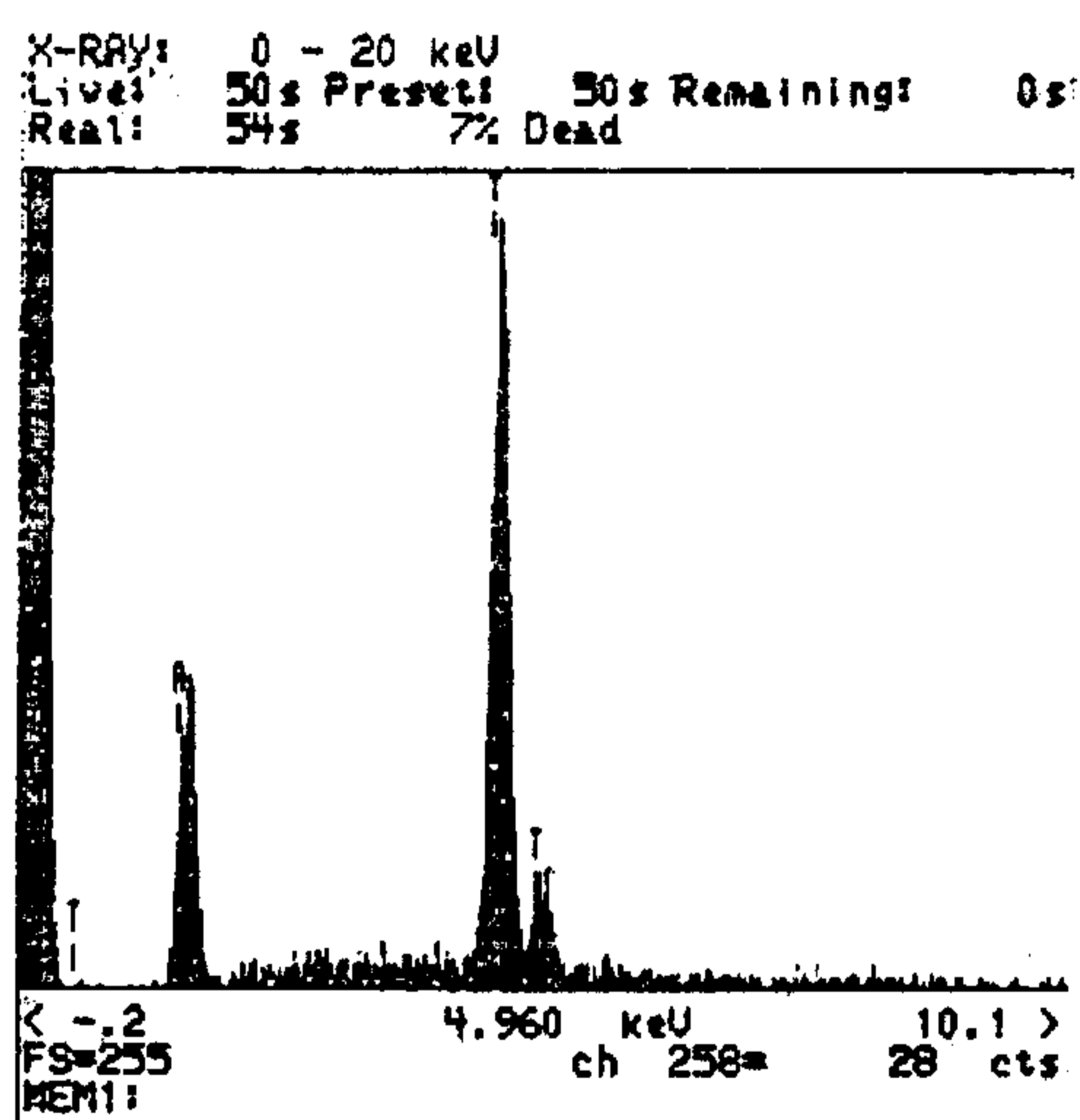
با طراحی مناسب و انتخاب آلیاژ زمینه و همچنین استفاده بهینه از ماده جامد، مایع و یا گاز واکنش دهنده محدوده وسیعی از کاربردها، نیتریدها، اکسیدها، برآیدها و سیلیکاتها را میتوان در فاز زمینه ایجاد نمود. با توجه به فاز دوم واکنشهای مختلفی بصورت های مختلف گاز- مایع، مایع- جامد و مایع- مایع و غیره مشاهده و دسته بندی شده، ولی اساسی ترین مبحث علمی در این مورد کنترل واکنش بویژه از نظر سینتیکی است، تا تشکیل گازها و شکل گیری فصل مشترک مورد نظر بگونه ای مطلوب صورت بگیرد. ذرات سرامیکی فاز دوم ترکیبهایی چون TiC , TiC , TiB_2 , B_4C , SiC , Si_3N_4 و BN میباشد که در درون آلیاژهایی مانند Al , Cu , Mg و Ni بعنوان زمینه توزیع میگردند. گسترش کامپوزیتهای نوع درجا نیازمند مطالعه بر روی اثر عوامل کنترل کننده سیستم بر پایداری و رشد فاز تقویت کننده سرامیکی است [۵]. فرآیندهای سیستم درجا متنوع بوده و بیش از ۸ روش از آن امروزه معرفی شده اند [۵].

یکی از فرآیندهای شناخته شده، فرآیند XD^{TM} شرکت Martin Marietta میباشد [۶ و ۷]. بهترین مثال برای این فرآیند تشکیل ذرات TiB_2 در زمینه آلومینیم و یا آلیاژهای آن است. با اختلاط پودر مواد حاوی بر و تیتانیم در محیط آلومینیم و حرارت دادن آن، نفوذ Ti و B و تشکیل فاز TiB_2 ممکن میشود. اندازه ذرات تقویت کننده TiB_2 در این کامپوزیت، بین ۰/۱ الی ۳۰ میکرون گزارش شده است. کامپوزیت TiB_2 4Vol% Al-Ti ساخته شده به این روش، در مقایسه با آلیاژ زمینه دارای خواص استحکامی و

نتیجه آنالیز EDX ذرات سفید رنگ $TiAl_3$ در شکل (۲) ارائه گردیده است. همانگونه که شکل (۱) نشان می‌دهد اندازه ذرات $TiAl_3$ بسیار بزرگ بوده و دارای ابعادی در حدود ۳۰ میکرون و بیشتر می‌باشد. مطالعاتی که تا کنون گزارش شده نشان می‌دهد که معمولاً فاز $TiAl_3$ در درون زمینه آلومینیم بصورت سوزنی شکل درشت تشکیل می‌گردد [۱۳] و این زمانی است که Ti مورد نیاز از اکسید تیتانیم (TiO_2) بدست آمده باشد. در حالیکه حضور فعال K در نمک K_2TiF_6 می‌تواند موجب اصلاح تیغه‌های $TiAl_3$ شده و آنها را به ذراتی کوچکتر تبدیل کند. اصلاح ترکیبات بین فلزی با استفاده از عناصری مانند Na , Sr , K بارها مورد تأکید قرار گرفته است [۱۴].



شکل ۱: تصویر میکروسکپ نوری آلیاژ $Al-Ti$ تهیه شده با استفاده از نمک K_2TiF_6 .



شکل ۲: آنالیز EDX ذرات سفید رنگ $TiAl_3$ در آلیاژساز $Al-Ti$.

در قالبهای مورد نظر ریخته‌گری شدند. دمای اختلاط و بارریزی در هر ذوب با هم مشابه بودند. بمنظور تعیین مکانیزم تشکیل ذرات TiB_2 ، از میکروسکوپ نوری مجهز به Hot Stage مدل Lietz 1730 استفاده گردید. جهت مشاهده مستقیم استحاله توسط میکروسکوپ Hot Stage، نمونه‌ها را در شرایط درجه حرارت اختلاط و بارریزی ۸۵۰ درجه سانتیگراد و زمان مکث (زمان بین اختلاط و ریخته‌گری) ۵ دقیقه نگهداشته تا تحت چنین شرایطی (دما و زمان کم) واکنش عملاً کامل نشده و ساختار انجمادی با حرارت دادن در سیستم Hot Stage مجدداً فعال گردد و در چنین شرایطی مشاهدات بصورت تصاویر ویدئویی ثبت و ضبط گردد.

در سیستم Hot Stage درجه حرارت آزمایش $710^\circ C$ و میزان خلاء 10^{-4} میلی بار بود. در چنین شرایطی، از بزرگنمایی‌های ۲۰۰ و ۴۰۰ استفاده گردید. همگام با مطالعه فاز در سیستم Hot Stage، نمونه‌های کامپوزیتی پس از ریخته‌گری و برش صیقلکاری شده و نهایتاً جهت ساختار میکروسکوپی حکاکی شدند. بررسی ساختار میکروسکوپی نمونه‌ها در بزرگنمایی بالا توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل CAMBRIDGES360 انجام گرفت. از این تصاویر به‌طور مقایسه اندازه ذرات TiB_2 ، نحوه توزیع ذرات و پدیده آگومره شدن استفاده شد. آنالیز EDX نیز برای تفکیک فازها و ترکیبات ایجاد شده مورد استفاده واقع شد. مطالعه فازهای متشکله در نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از دستگاه دیفراکتومتر "PhilipsPW 1800" انجام شد که در آن اشعه تکفام $Cu K\alpha$ بکار گرفته شده بود. برای تعیین قطر متوسط درشت‌ترین ذرات TiB_2 از روش بکار گرفته شده در مرجع [۱۲] استفاده شد. جدول (۱) ترکیب شیمیایی فلز زمینه و آمیزان‌های ساخته شده را نشان می‌دهد.

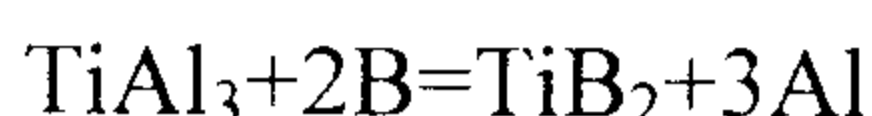
نتایج و بحث

شکل (۱) تصویر میکروسکوپ نوری آلیاژساز $Al-Ti$ را نشان می‌دهد که با استفاده از نمک K_2TiF_6 بدست آمده است.

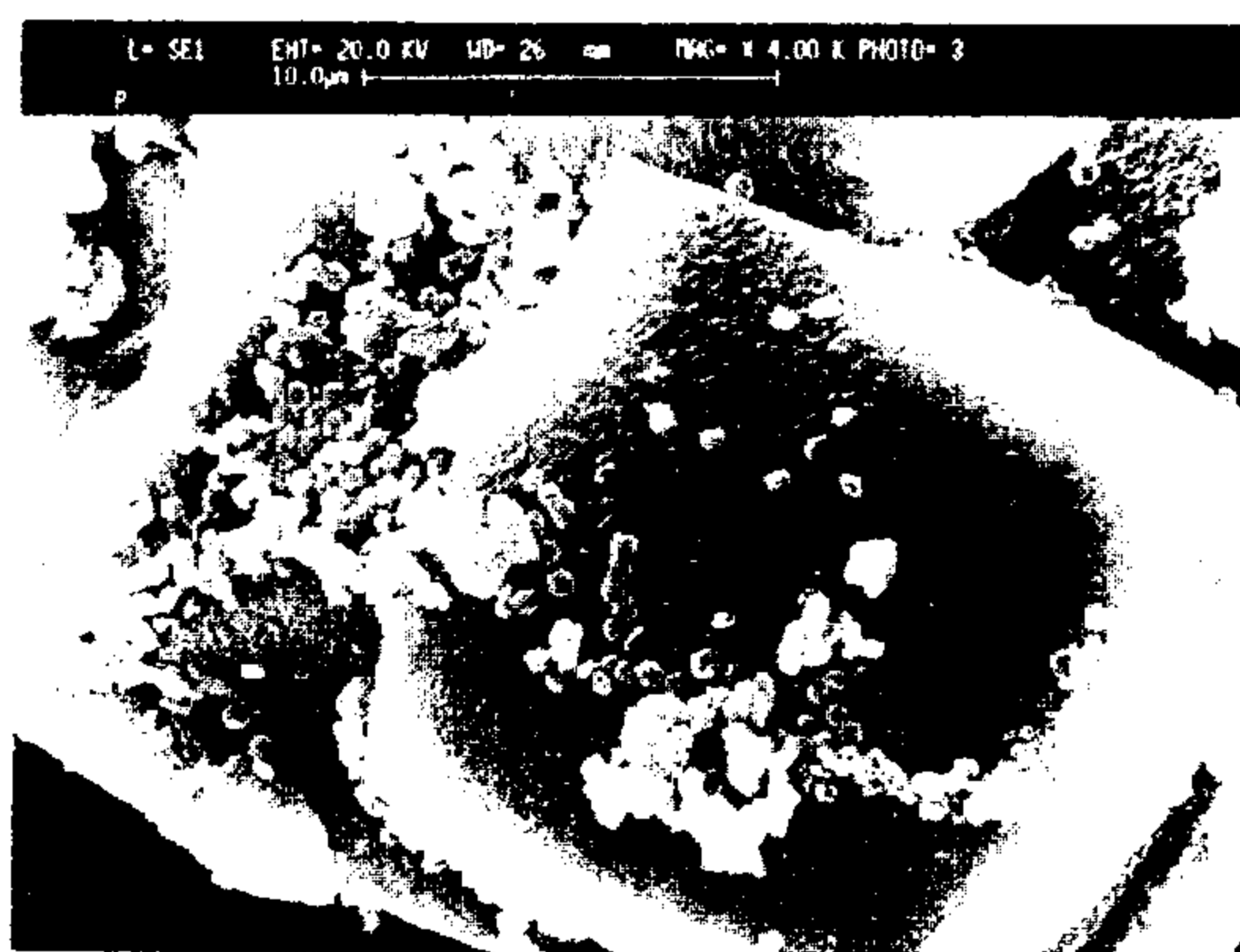
جدول ۱: ترکیب شیمیایی مواد اولیه مورد استفاده جهت ساخت کامپوزیت.

ترکیب شیمیایی	نوع ماده
Si 0.06%, Fe 0.2%, Mn 0.03%, Ti 0.02%, V 0.01, Cu 0.01%, Mg 0.01%, Al: Rem.	فلز زمینه
B 4%, Si 0.3%, Fe 0.5%, Mn 0.2%, Ti 0.12%, Cu 0.1%, Mg 0.1%, Al: Rem.	آمیزان Al-B
Ti 8%, Si 0.1%, Fe 0.5%, Mn 0.2%, Cu 0.1%, Mg 0.1%, Al: Rem.	آمیزان Al-Ti

همانگونه که در شکل (۳) دیده می شود می توان پیش بینی نمود که با ایجاد شرایط مناسب نفوذ (درجه حرارت و زمان مناسب) اتمهای B محلول در مذاب به طرف ذرات $TiAl_3$ حرکت و با نفوذ در آن با Ti موجود در $TiAl_3$ به صورت زیر وارد واکنش شده و ذرات TiB_2 را تشکیل دهند.



(۱)



شکل ۵: تصویر SEM ذرات استخراج شده از نمونه ریختگی از ماده کامپوزیتی Al-TiB₂، نشان دهنده ذرات ریز TiB_2 بر روی ذرات درشت $TiAl_3$.

شکل (۶) تصاویر انتخاب شده از فیلم آزمایش Hot Stage را ارائه می کند که مراحل تجزیه ذرات $TiAl_3$ و تشکیل ذرات TiB_2 را با گذشت زمان نشان می دهد.

تصاویر ویدیویی به خوبی نشان می دادند که ذرات ریزتر $TiAl_3$ سریعتر وارد واکنش شده و ذرات TiB_2 با سرعت رشد بیشتری تولید میشوند. در چنین شرایطی وجود عناصر اصلاح کننده با ریز نمودن ترکیب بین فلزی $TiAl_3$ هجوم اتمهای بر را به مرزهای بیشتری از این فاز تسهیل نموده و تشکیل کامپوزیت و یکنواختی بیشتر آنرا در توزیع ذرات TiB_2 در زمینه موجب می گردد.

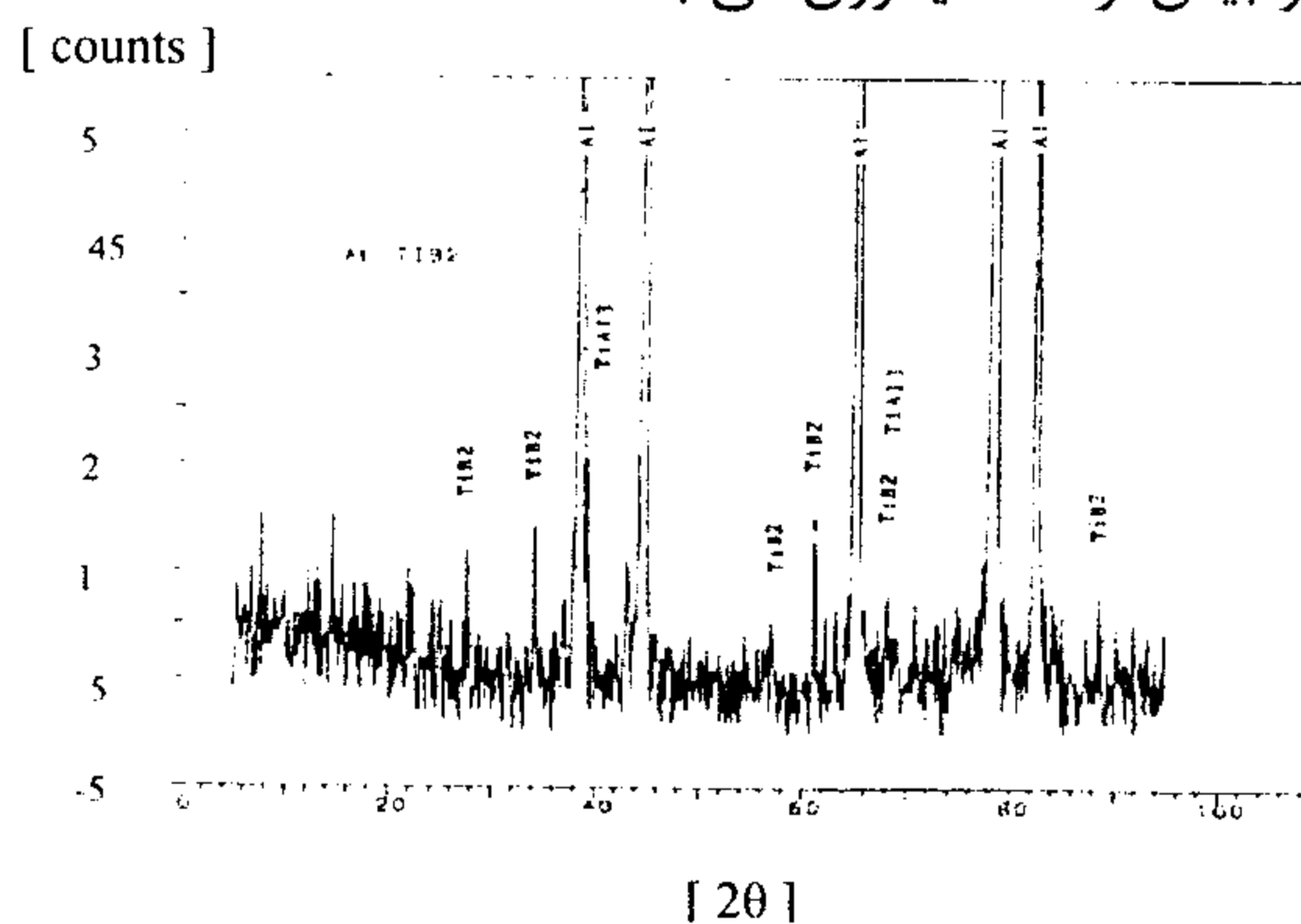
امکان تشکیل ذرات $TiAl_3$ در حالت جامد مزیت بزرگی

شکلهای (۳) و (۴) تصاویر SEM نمونه کامپوزیتی $Al-TiB_2$ و همچنین الگوی تفرق اشعه X این نمونه را که در شرایط درجه حرارت اختلاط و بارریزی ۹۰۰ درجه سانتیگراد با زمان نگهداری ۱۵ دقیقه تهیه شده اند را نشان می دهد.



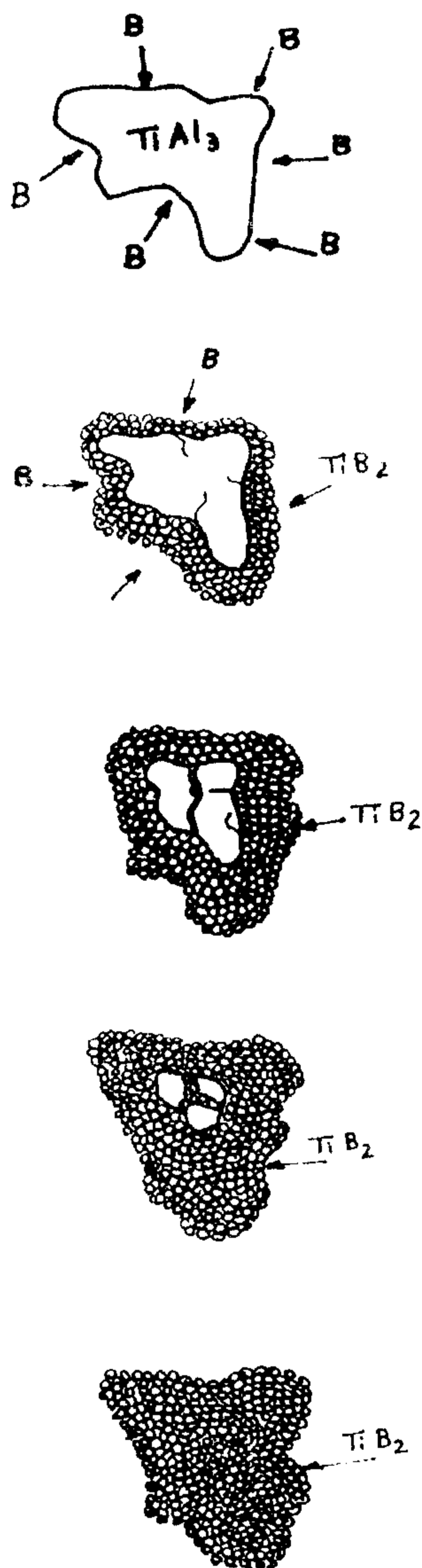
شکل ۳: تصویر SEM نمونه ریختگی از ماده کامپوزیتی Al-TiB₂.

شکل (۵) نیز تصویر SEM از ذرات استخراج شده از نمونه توسط انحلال آن در اسید فلورئیدریک غلیظ را نشان می دهد. این شکل نمایانگر ذرات TiB_2 هگزاگونال ریز با قطر کمتر از ۳ میکرون در کنار ذرات بسیار بزرگ $TiAl_3$ با قطر بیش از ۲۰ میکرون می باشد.



شکل ۴: الگوی تفرق اشعه X نمونه کامپوزیتی.

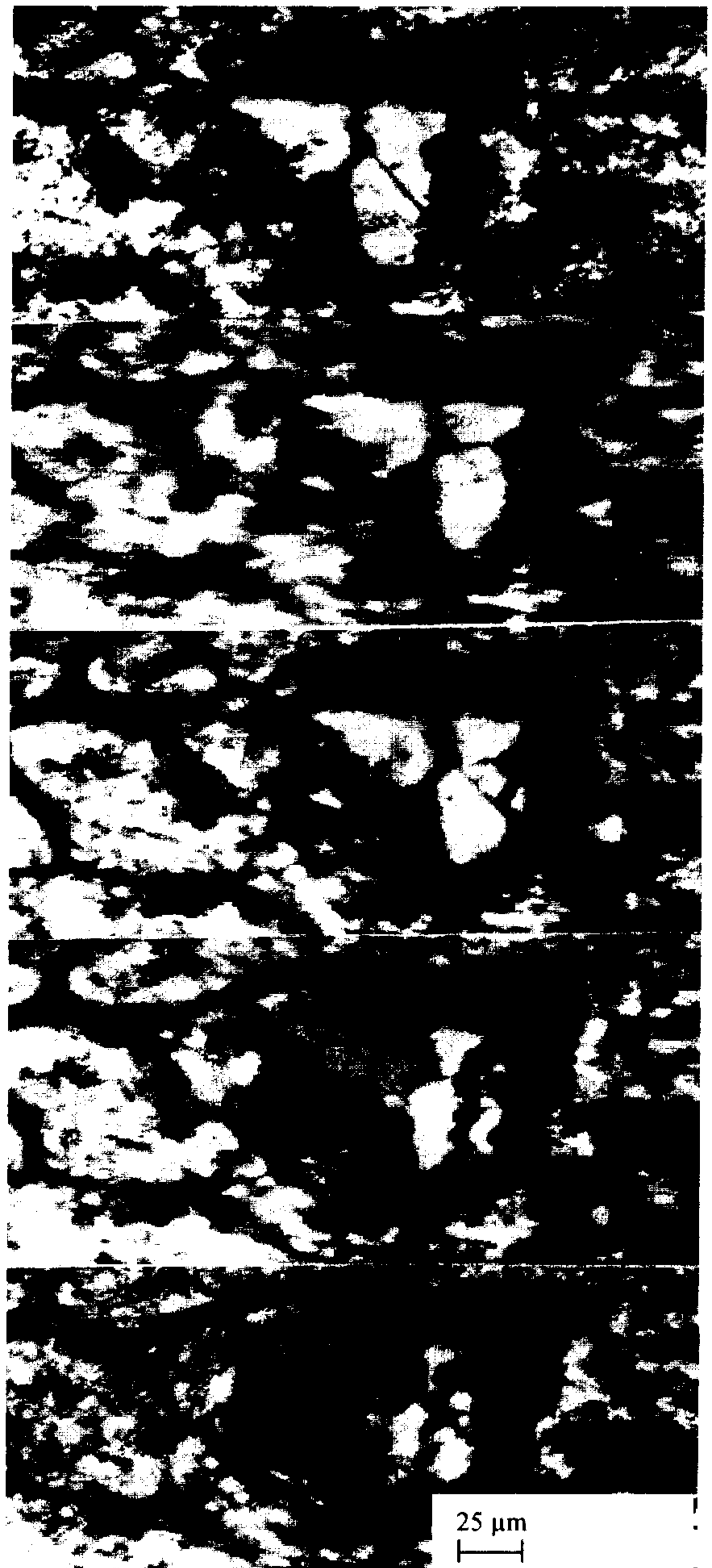
علاوه بر ذوب اجزا دیگر، سبب شدیدتر شدن واکنش بین سازنده ها با فاز دوم سرامیکی می گردد. در کامپوزیت $Al-TiB_2$ واکنش بین تیتانیم و بر (B) در دماهای حدود ۶۵۰ درجه سانتیگراد اتفاق می افتد، در حالیکه در غیاب آلومینیوم تشکیل TiB_2 در درجه حرارت های کمتر از ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد امکان پذیر نیست [۱۲].



شکل ۷: تصویر شماتیک از مراحل تشکیل کامپوزیت $Al-TiB_2$ در حالت جامد (از بالا به پایین).

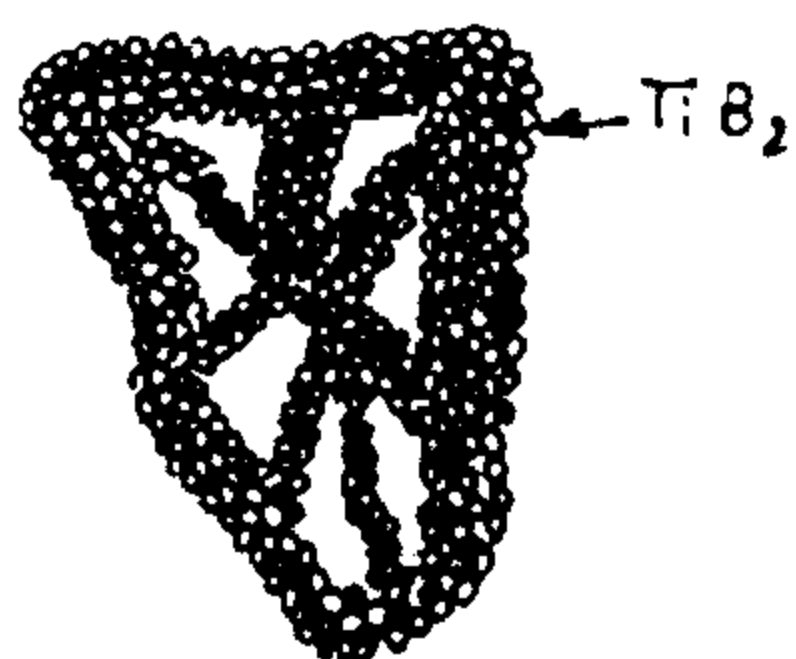
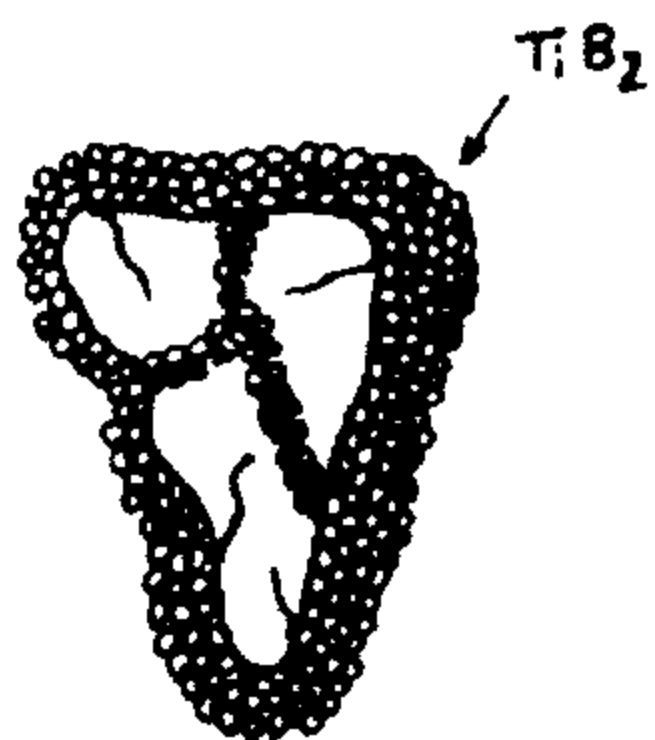
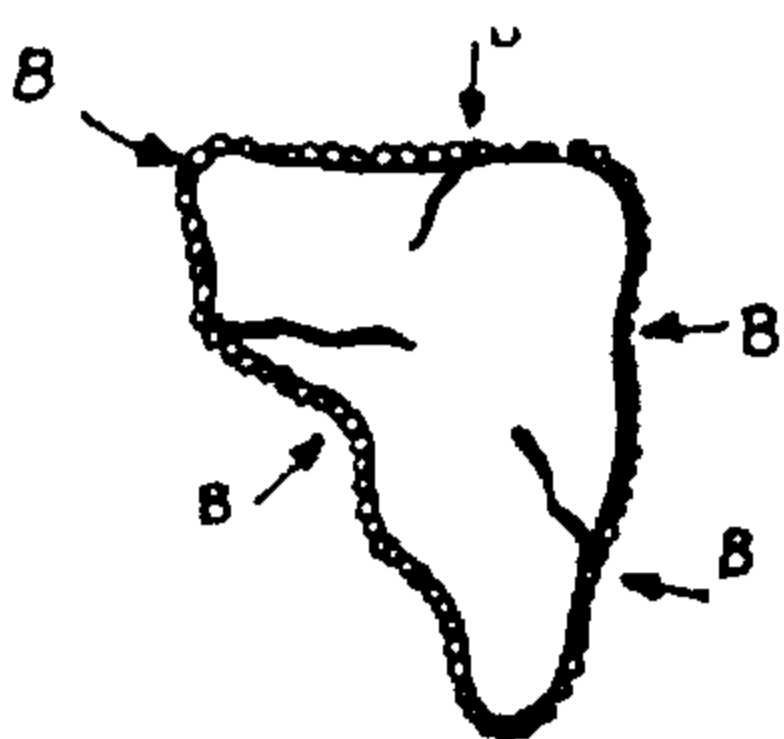
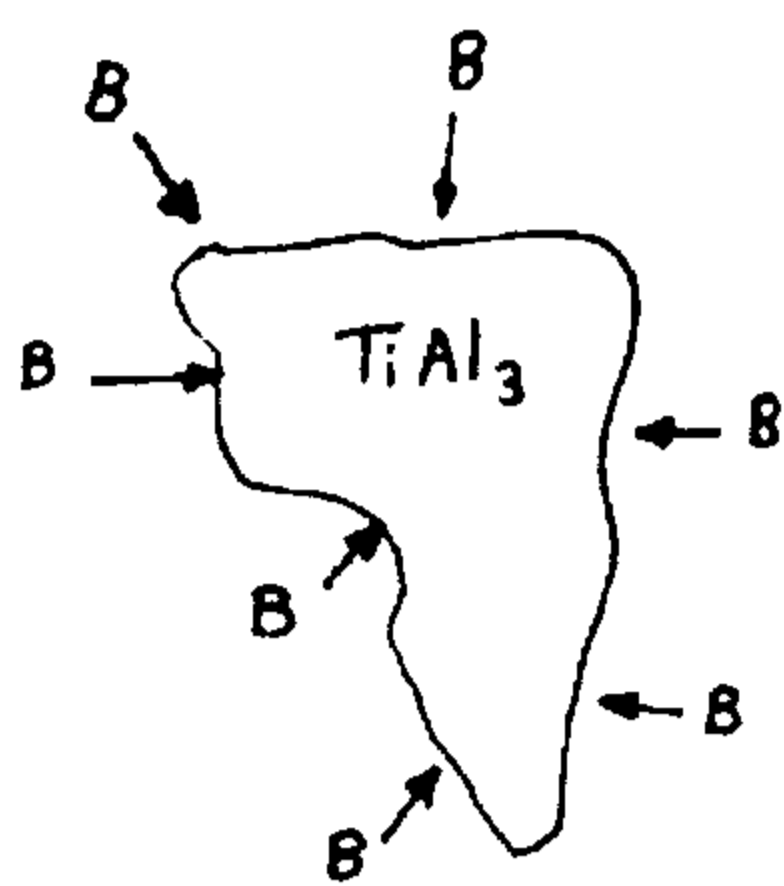
پس از اتمام واکنش بین عناصر تیتانیم و بر (B)، درجه حرارت کاهش یافته که این مرحله روی میزان رشد و اندازه نهایی ذرات TiB_2 موثر است. می توان نرخ سرد

است که با کمک آن می توان مخلوط را تا درجه حرارتی که امکان نفوذ عناصر فراهم شود حرارت داده و واکنش را جهت ساخت کامپوزیت در درجه حرارت هایی پایین تر از حد انتظار پیش برد.



شکل ۶: مراحل تغییرات استحاله یک ذره $TiAl_3$ در سیستم HotStage را نشان می دهد که در اثر حرارت و با گذشت زمان اندازه و شکل آن در حال تغییر است. (از بالا به پایین)

در این حالت سازنده سرامیکی به راحتی در حدود درجه حرارت های ذوب فلز حلال ترکیب شده و طبیعت گرمای این واکنش موجب افزایش سریع درجه حرارت گشته و



شکل ۹: تصویر شماتیک از مراحل تشکیل کامپوزیت $Al-TiB_2$ در حالت مایع (از بالا به پایین).

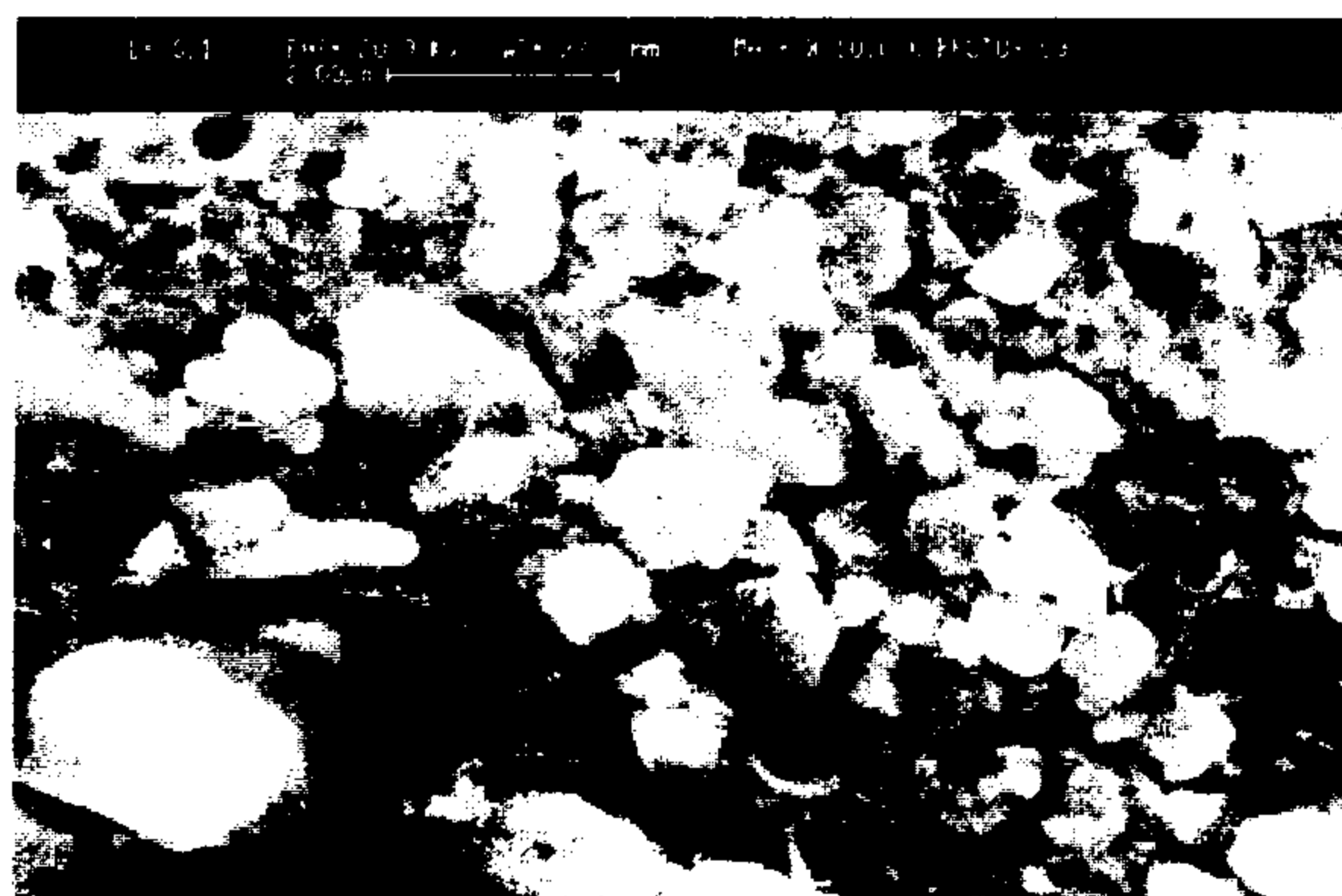
عبور نموده و خود را به این ذره برسانند. در نتیجه رشد آنها متوقف و درشت شدن این ذرات به مراحل اولیه واکنش منحصر می گردد. در شرایط واقعی که استحاله تبدیل $TiAl_3$ به TiB_2 در حالت مذاب کامل در فرآیند

شدن را تا اندازه ای با تغییر مقدار توده مواد مخلوط شده، کنترل نمود به طوری که جرمهای بزرگتر به دلیل ظرفیت گرمایی بیشتر سرعت سرد شدن کمتری را ارائه نماید.

شکل (۷) بصورت شماتیک نحوه تشکیل ذرات TiB_2 را با توجه به اطلاعات میکروسکپ Hot Stage نشان می دهد. با توجه به اینکه استحاله در حالت فلز جامد صورت می گیرد مراحل را می توان بصورت زیر تشریح نمود:

- حرکت اتمهای بر به سمت ذرات $TiAl_3$
 - تشکیل ذرات TiB_2 در فصل مشترک ذرات $TiAl_3$ و زمینه آلومینیومی
 - نفوذ بر از میان ذرات TiB_2 به دلیل کوچک بودن قطر اتمی آن

- ادامه روند تشکیل ذرات TiB_2 ، آگلومراسیون ذرات TiB_2 بدلیل آزاد شدن گرمای ناشی از واکنش اگزوترمیک شکل (۸) آگلومراسیون ذرات TiB_2 را نشان می دهد.

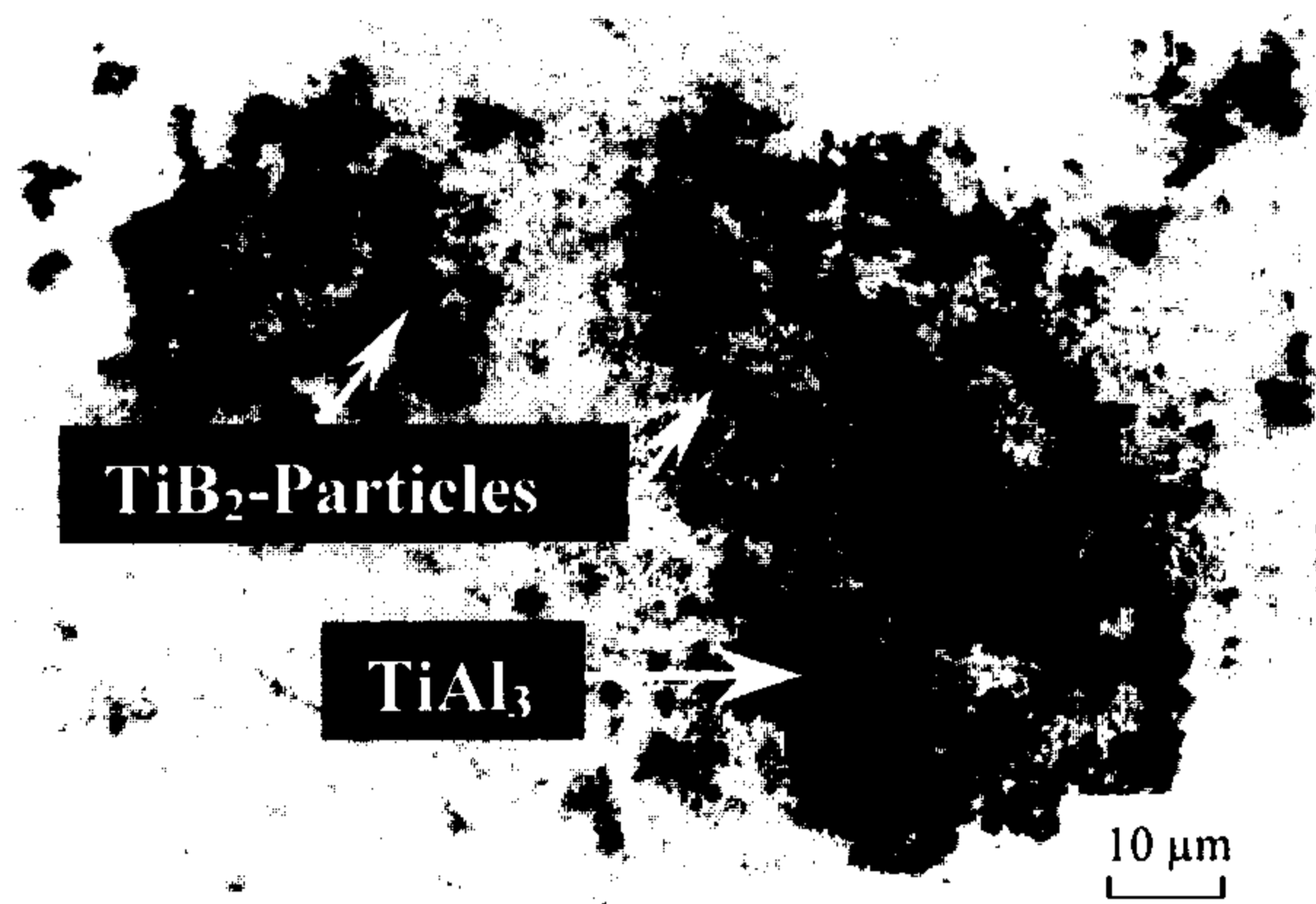


شکل ۸: تصویر SEM از ذرات ریز TiB_2 در نمونه کامپوزیت $Al-TiB_2$.

اگر فرض شود مدتی از شروع واکنش گذشته و نیمی از قطر ذره $TiAl_3$ به ذرات آگلومره شده TiB_2 تبدیل شده باشد عنصر بر به راحتی از میان ذرات TiB_2 عبور نموده و با ذره $TiAl_3$ در فصل مشترک جدید واکنش می دهد.

اگر یک ذره TiB_2 را که در مراحل اولیه فرآیند تشکیل شده در نظر بگیریم، با پیشروی واکنش این ذره از ذره $TiAl_3$ اولیه دور شده و لایه های آگلومره شده ذرات TiB_2 بین آنها قرار می گیرد. این ذره برای ادامه رشد خود نیازمند اتمهای B است. اتمهای B به علت قطر اتمی کوچک در دسترس بوده ولی اتمهای Ti بعد از تجزیه بدلیل قطر اتمی بزرگتر نمیتوانند از میان ذرات TiB_2

سپس در ادامه فرآیند ترکها گسترش یافته و موجب تکه تکه شدن ذرات $TiAl_3$ می گردند. این امر نیز سطوح جدیدی را ایجاد نموده که باعث افزایش نطفه های سازنده ذرات ریز TiB_2 می گردد. این روند مجددا تکرار شده و باز ذرات جدید TiB_2 با ابعاد ریزتر حاصل میشوند. نتیجه خرد شدن مکرر ذرات TiB_2 این است که ریزساختار نهایی کامپوزیت دارای محدوده وسیعی از ابعاد می باشد.



شکل ۱۰: تصویر میکروسکپ نوری نمونه کامپوزیتی، حضور حلقه های حاوی ذرات ریز TiB_2 و ذرات شکسته شده $TiAl_3$ را در درون زمینه آلومینیمی نشان میدهد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق بخشی از طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه تهران است. لذا نویسندگان این مقاله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه و نیز معاونت پژوهشی دانشکده فنی تشکر و قدردانی می نمایند.

مایع به مایع صورت می گیرد، تفاوت در ریزساختار را می توان پیش بینی نمود. این تفاوت در ریزساختار به دلیل امکان حرکت ذرات TiB_2 در مذاب است که در حالت جامد (با استفاده از میکروسکپ Hot Stage) وجود ندارد. در حالت مایع ذرات TiB_2 که تمایل زیادی به کاهش سطح خود دارند، پس از تشکیل از ذره $TiAl_3$ جدا شده و در حالیکه رشد می کنند به طرف ذرات TiB_2 که در مراحل اولیه فرآیند تشکیل شده اند حرکت می کنند و به آنها می چسبند و در نهایت به صورت حلقه ای از ذرات آلگومره شده TiB_2 جایگزین ذرات $TiAl_3$ می شوند. شکل (۹) بصورت شماتیک تشکیل ذرات TiB_2 را نشان می دهد.

مشاهده می شود که پس از حمله اتمهای بر (B) به آنها ابتدا ترک خورده، سپس این ترکها اشاعه یافته و سبب تکه تکه شدن ذرات $TiAl_3$ می شوند. آنگاه ذرات بر (B) به سطح این ذرات هجوم برده و واکنش Ti و B با تشکیل لایه ای از ذرات TiB_2 در سطح این ذرات تکه تکه شده دوباره آغاز می شود.

شکل (۱۰) حضور ذرات TiB_2 را در کنار ذرات $TiAl_3$ خرد شده در درون زمینه آلومینیمی نشان می دهد.

نتیجه گیری

۱- با مخلوط کردن مذاب آلیاژسازهای Al-Ti و Al-B و ایجاد شرایط مناسب برای نفوذ عناصر Ti و B، کامپوزیت Al-TiB₂ قابل تهیه می باشد.

۲- سرعت زیاد نفوذ عنصر بر (B) و مهاجرت آسان آن به مرزهای $TiAl_3$ ، تجزیه این فاز را موجب شده و تشکیل ذرات TiB_2 را در فصل مشترک امکان پذیر می سازد.

۳- مشاهدات بعمل آمده با بکارگیری میکروسکپ نوری مجهز به Hot Stage نشان داد که پس از هجوم اتمهای بر (B) ابتدا ترکهایی بر روی سطح ذرات $TiAl_3$ ایجاد شده،

مراجع

- 1 - Taya, M. and Aresenault, R. J. (1989). *Metal matrix composite, thermo-mechanical behaviour*, Oxford.
- 2 - Luster, J. W., Thumann, M. and Bhaumann, R. (1993). *Mat. Sci. Tech.*, Vol. 9, PP. 853-861.
- 3 - Kelly, A. (1994). *Concise encyclopedia of composite materials*. Revised. PP. 853-861.
- 4 - Brupbacher, J. M. (1987). *U.S. Patent* 4, 710, 348.

- 5 - Koczak, M. J. and Prekumar, M. K. (1993). *JOM*, PP. 44-48.
- 6 - Christodoulou, L. (1988). *U.S. Patent* 4, 751, 048.
- 7 - Brupbacher, J. M. (1989). *U.S. Patent* 4, 836, 982.
- 8 - Langan, T. J. and Pickens, J. R. (1991). *Scripta Metall.* Vol.25, PP. 1587-1591.
- 9 - Lee, M. S. Terry, B. S. and Grieveson, P. (1993). *Metall. Trans. B.*, Vol. 24B, PP. 947-955.
- 10 - Koczak, M. J. and Prekumar, M. K. (1993). *JOM*, PP. 44-48.
- 11 - Brupbacher, J. M. et al. (March 1989). *U.S. Patent* 4, 808, 348.
- 12 - Sahoo, P. and Koczak, M. J. (1990). *Proc. Confe. On advanced metal and ceramic matrix composites*, Metallurgical Society of AIME, Warrendale, PA, USA, P. 141.

۱۳ - طاهبازفر، ه. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران (۱۳۷۷).

۱۴ - شبستری، س. نشریه آلومینیوم، زمستان، ص ۳۰-۴۰، (۱۳۷۵).

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - In Situ