

عملیات حرارتی همگن سازی چدنهای نشکن از طریق ذوب جزئی

محمود نیلی احمد آبادی

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

مسعود مصلاهی پور یزدی

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

(تاریخ دریافت ۸۱/۱۲/۲۰، تاریخ تصویب ۸۲/۴/۱۴)

چکیده

یکی از مشکلات اساسی حین انجماد چدنهای نشکن، جدایش عناصر آلیاژی می‌باشد. جدایش عناصر آلیاژی منجر به افت خواص چدنهای نشکن و چدنهای نشکن آستمپر شده می‌شود. در این پژوهش ضمن بررسی نحوه توزیع عناصر آلیاژی گرافیت‌زا و کاربیدزا در زمینه چدنهای نشکن، به منظور همگن نمودن توزیع عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن برای اولین بار، عملیات حرارتی همگن‌سازی از طریق ذوب جزئی به کار گرفته شد. نتایج Spot-EDS نمونه‌ها، حاکی از توزیع یکنواخت و همگن شدن توزیع عناصر آلیاژی پس از عملیات حرارتی همگن‌سازی بود. نتایج آنالیز تصویری از نمونه‌های همگن و آستمپر شده نشان داد عملیات حرارتی همگن‌سازی با استفاده از ذوب جزئی بر همگن نمودن ریز ساختار پس از عملیات حرارتی آستمپرینگ چدنهای نشکن بسیار موثر می‌باشد. بررسی مورفولوژی گرافیتها قبل و بعد از عملیات حرارتی همگن‌سازی از طریق ذوب جزئی، حاکی از تاثیر جزئی عملیات حرارتی همگن‌سازی از طریق ذوب جزئی بر مورفولوژی گرافیتها بود.

واژه‌های کلیدی: عملیات حرارتی همگن سازی، چدن نشکن، جدایش، آستمپرینگ

مقدمه

هر نوع انحراف از ترکیب متوسط شیمیایی در قطعات منجمد شده، جدایش (S) نامیده می‌شود [۲۰۱]. تفاوت در ضریب توزیع عناصر آلیاژی مورد استفاده در ترکیب شیمیایی چدنهای نشکن، منجر به جدایش شدید عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن می‌گردد [۴۰۳]. جدایش عناصر گرافیت‌زا در زمینه چدنهای نشکن اطراف کوره‌های گرافیتی می‌باشد و عناصر کاربیدزا در مناطق بین کوره‌های گرافیتی جدایش می‌یابد [۶۰۵]. تاثیر جدایش عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن عبارت است از:

الف) به دلیل توزیع نایکنواخت عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن، نمودار تعادلی در مناطق مختلف زمینه متفاوت می‌گردد. در نتیجه دمای آستنیتیه کردن حین عملیات آستمپرینگ در مناطق مختلف زمینه متفاوت خواهد بود [۷۰۵].

ب) جدایش عناصر آلیاژی منجر به حلالیت نایکنواخت کربن در مناطق مختلف زمینه می‌شود. در نتیجه سرعت

استحاله آستمپرینگ در نواحی مختلف زمینه تغییر

می‌کند [۸۰۵].

ج) جدایش عناصر آلیاژی باعث کاهش پنجره^۱ بین دو مرحله استحاله آستمپرینگ می‌شود [۸].

د) جدایش عناصر آلیاژی منجر به افت خواص مکانیکی چدنهای نشکن آستمپر شده، بخصوص کاهش چقرمگی چدنهای نشکن می‌شود [۹۰۸].

گزارشهای ارائه شده در مورد عملیات حرارتی همگن‌سازی چدنهای نشکن، حاکی از عدم امکان حذف جدایش از زمینه چدنهای نشکن می‌باشد [۱۰-۱۲]. Dorazil گزارش

نموده که افزایش دما و زمان آستنیتیه از $850^{\circ}C$ به $1000^{\circ}C$ به مدت یک ساعت تاثیر چندانی در کاهش جدایش عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن ندارد [۱۰]. گزارش Lacaze حاکی از عدم موفقیت عملیات

حرارتی همگن‌سازی چدنهای نشکن در دمای $1100^{\circ}C$ به مدت یک ساعت در کاهش و حذف جدایش عناصر آلیاژی از زمینه چدنهای نشکن می‌باشد [۱۲].

شدند.

محدوده دمای عملیات حرارتی همگن‌سازی از طریق ذوب جزئی توسط رابطه ارائه شده برای دمای یوتکتیک (TE, °C) در چدنهای نشکن (معادله ۱) محاسبه گردید.

$$TE = 1154 + 4 \times \%Si + 5 \times \%Cu + 8 \times \%Al + 4 \times \%Ni - 2 \times \%Mn \quad (1)$$

محدوده دماهای انتخابی برای عملیات حرارتی همگن‌سازی از طریق ذوب جزئی چدنهای نشکن عبارت بودند از:

الف) محدوده دمای حوالی خط یوتکتیک مناطق بین سلولی در منطقه سه فازی مذاب، آستنیت و گرافیت $\gamma + G + L$.

ب) محدوده دمای بالای خط یوتکتیک مناطق بین سلولی در منطقه دو فازی مذاب و آستنیت $L + \gamma$.

به منظور تعیین پروفیل غلظتی عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن، نمونه‌ها توسط سنباده‌های متفاوت و خمیر الماسه آماده سازی سطحی شدند و توسط محلول اچ نایتال دو درصد اچ شدند. سپس بیش از سه جفت گرافیت مجاور با قطر در حدود قطر متوسط گرافیتها انتخاب گردید و پنج نقطه بین هر دو گرافیت مجاور توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد آنالیز Spot-EDS واقع شد. بررسی کسر حجمی حوضچه‌های مذاب تشکیل شده حین عملیات حرارتی همگن‌سازی از طریق ذوب جزئی توسط آنالیزگر تصویری صورت گرفت.

برای بررسی تاثیر عملیات حرارتی همگن‌سازی از طریق ذوب جزئی بر عملیات حرارتی آستمپرینگ چدنهای نشکن، نمونه‌ها در دو حالت همگن شده و نشده مورد عملیات حرارتی آستمپرینگ واقع شدند. سیکل عملیات حرارتی آستمپرینگ نمونه‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است.

ارزیابی تاثیر عملیات حرارتی همگن‌سازی از طریق ذوب جزئی بر پروفیل غلظتی عناصر آلیاژی توسط مقایسه نسبت جدایش عناصر آلیاژی (معادله ۲) در نمونه‌های همگن شده و همگن نشده انجام گرفت.

$$K(x) = \frac{C_g(x)}{C_n(x)} \quad (2)$$

عدم امکان همگن‌سازی زمینه چدنهای نشکن به روش‌های متعارف باعث گردیده تا روش ذوب جزئی برای همگن‌سازی توزیع عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن مورد بررسی قرار گیرد.

ایده عملیات حرارتی همگن‌سازی با استفاده از ذوب جزئی نخستین بار توسط Purdy ارائه گردید [۱۳] و سپس در سال ۲۰۰۱ توسط Malakhov این عملیات بر روی آلیاژ چند تایی Cu-Ni-Sn صورت گرفت [۱۴].

عملیات حرارتی از طریق ذوب جزئی متشکل از مراحل زیر می‌باشد:

الف) حرارت دادن تا دمای همگن‌سازی ب) انجماد ایزوترم ج) همگن‌سازی.

دمای همگن‌سازی حین عملیات حرارتی همگن‌سازی از طریق ذوب جزئی از اهمیت زیادی برخوردار است. لازم بذکر است دمای همگن‌سازی به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود تا بین دمای یوتکتیک مربوط به مناطق مختلف زمینه واقع شود. در این حالت در مناطقی از زمینه که دارای دمای یوتکتیک کمتر از دمای همگن‌سازی می‌باشد، حوضچه‌های مذاب تشکیل شده و در دیگر مناطق فاز جامد پایدار باقی می‌ماند.

هدف از این تحقیق بررسی تاثیر همگن‌سازی از طریق ذوب جزئی بر ساختار چدنهای نشکن است که تاکنون توسط روشهای دیگر قابل همگن‌سازی نبوده‌اند.

روش انجام آزمایش

چدن نشکن مورد نیاز در این پژوهش، توسط کوره القائی با فرکانس متوسط ذوب و در قالب ماسه CO₂ ریخته‌گری شد (جدول ۱). عملیات کروی‌سازی گرافیتها توسط فروسیلیکومنیزیم با ترکیب 49%Fe-45%Si-6%Mg و از روش ساندویچی در پاتیل انجام شد. همچنین برای جوانه‌زائی، جوانه‌زای فروسیلیس با ترکیب 75%Fe-25%Si پس از عملیات کروی‌سازی به مذاب داخل پاتیل اضافه گردید. به منظور عملیات حرارتی همگن‌سازی از طریق ذوب جزئی، نمونه‌هایی با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ mm توسط دستگاه برش از شمش چدن نشکن ریخته‌گری شده، بریده شد. به منظور بررسی نمونه‌هایی با شرایط انجمادی مشابه، نمونه‌ها از قسمت مرکزی شمش بریده

می‌شود، عنصر آلیاژی سیلیسیم بعلت ضریب توزیع بزرگتر از یک [۳] در حین انجماد مذاب چدنهای نشکن به فاز جامد تشکیل شده پس زده می‌شود. در نتیجه عنصر آلیاژی سیلیسیم در مناطقی از زمینه که در مراحل اولیه انجماد، منجمد می‌شود یا به عبارت دیگر اطراف کره‌های گرافیتی جدایش می‌یابد. عنصر آلیاژی منگنز به علت ضریب توزیع کوچکتر از یک [۳] بر عکس عنصر آلیاژی سیلیسیم در حین انجماد چدنهای نشکن به فاز مذاب پس زده می‌شود. در نتیجه عنصر آلیاژی منگنز در مناطقی از زمینه که در آخرین مرحله از انجماد مذاب چدنهای نشکن منجمد می‌شود یا به عبارت دیگر در مناطق بین کره‌های گرافیتی جدایش می‌یابد [۱۶،۱۵].

در رابطه فوق $K(x)$ نسبت جدایش عنصر آلیاژی x ، $C_g(x)$ غلظت عنصر آلیاژی x در مجاورت کره گرافیت و $C_n(x)$ غلظت اسی عنصر آلیاژی x در نمونه می‌باشد.

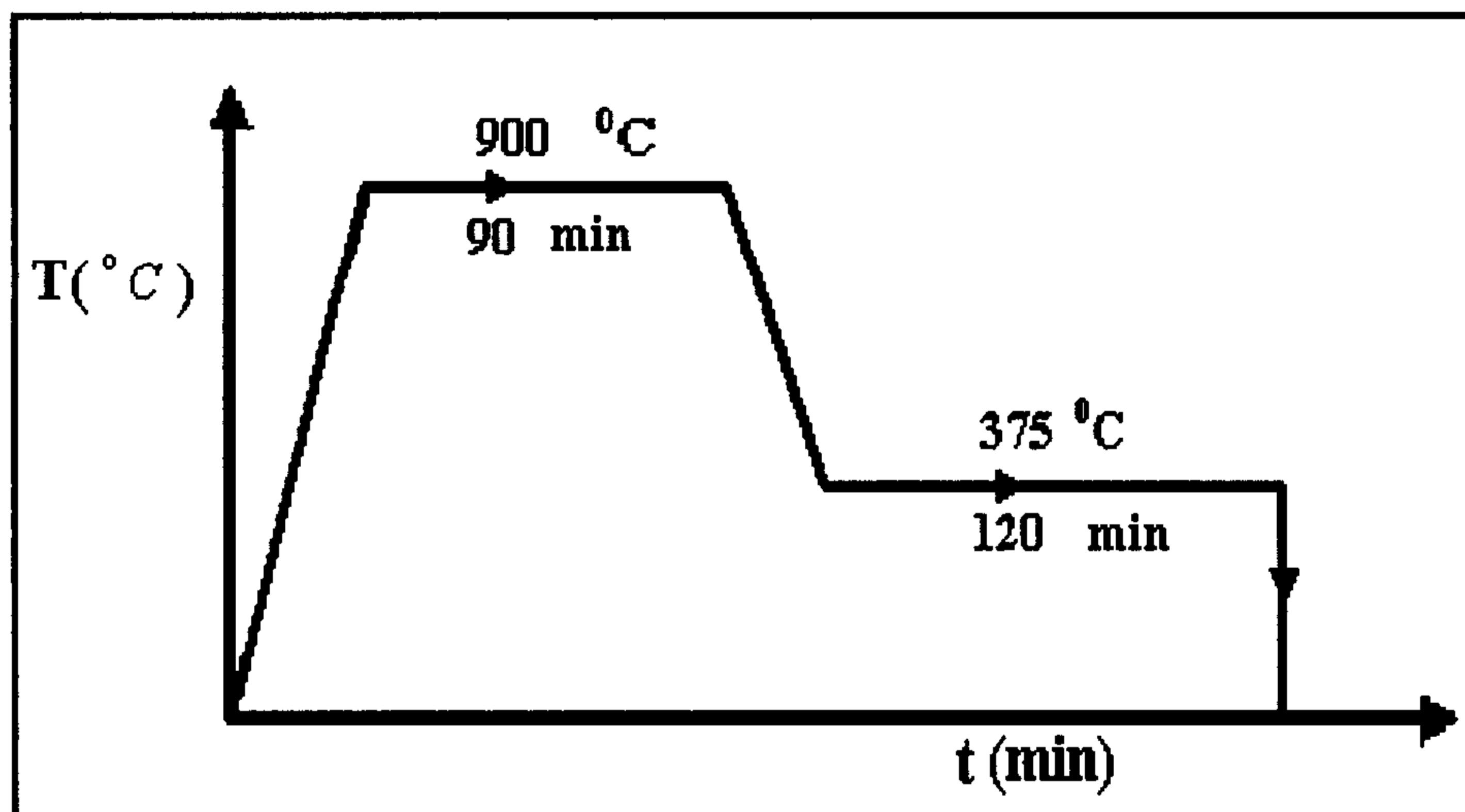
برای بررسی تاثیر عملیات همگن‌سازی بر مورفولوژی گرافیتها نمونه‌های همگن شده و همگن نشده بعد از عملیات آماده سازی سطحی بدون اچ نمودن توسط آنالیزگر تصویری مورد بررسی واقع شدند.

نتایج و بحث

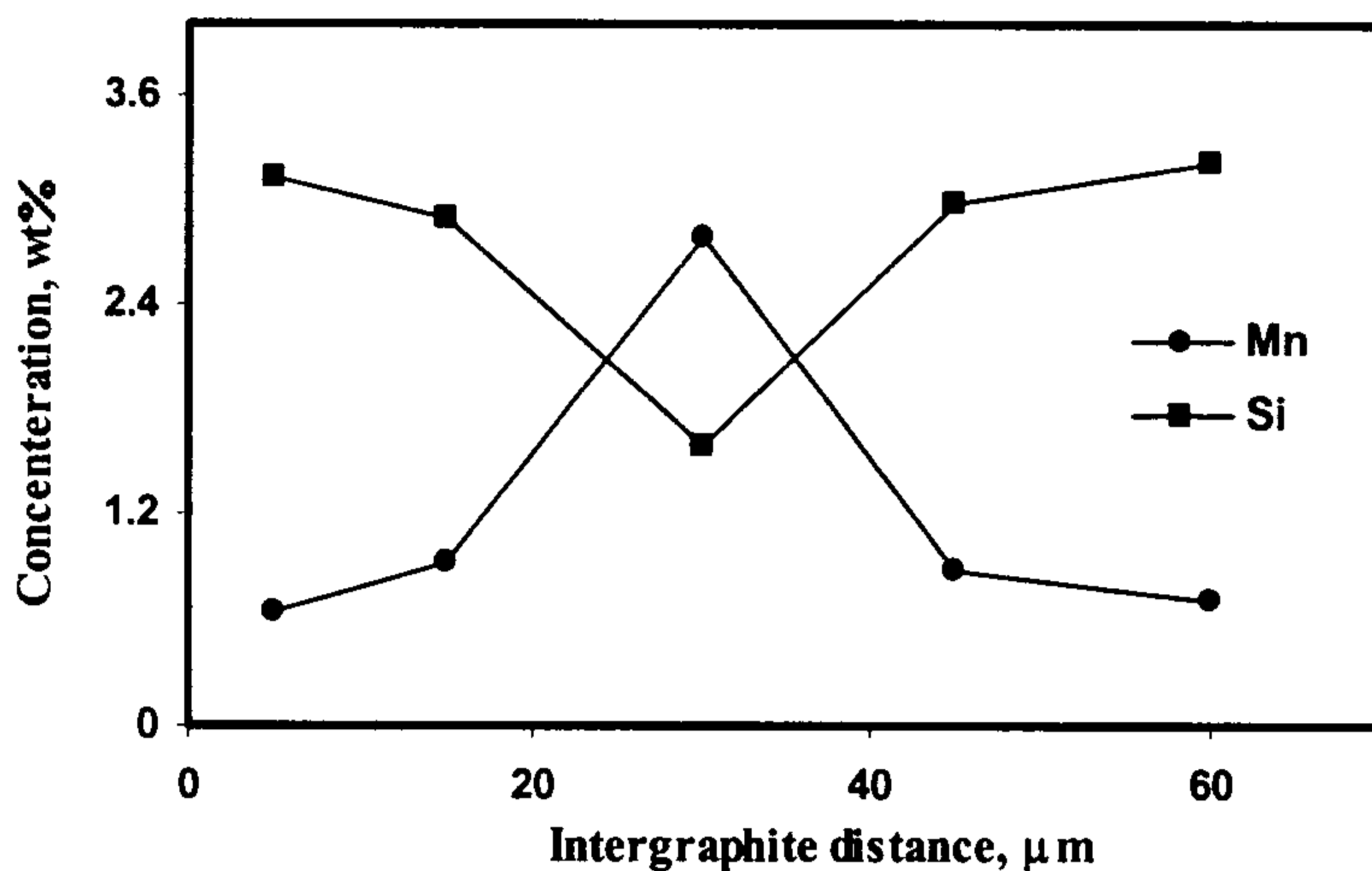
نتایج حاصل از آنالیز Spot-EDS نمونه‌های ریختگی بدون عملیات حرارتی همگن‌سازی در شکل (۲) نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل دیده

جدول ۱: ترکیب شیمیایی شمش چدن نشکن مورد استفاده .

Fe	C	Si	Mn	Mg
Balance	۳/۴	۲/۵	۱/۰	۰/۰۳۵



شکل ۱: سیکل استمپرینگ نمونه‌ها .



شکل ۲: نحوه جدایش عناصر آلیاژی در زمینه نمونه‌های ریختگی بدون عملیات همگن سازی.



شکل ۳: تصویر میکروسکوپی نمونه همگن شده (L: لدبوریت).

به عبارت دیگر در مناطقی که عنصر آلیاژی منگنز جدایش یافته، بعلت کاهش نقطه یوتکتیک شرایط برای تشکیل حوضچه‌های مذاب فراهم می‌شود.

به منظور بررسی تاثیر دمای عملیات حرارتی همگن‌سازی بر کسر حجمی حوضچه‌های مذاب تشکیل شده در حین عملیات حرارتی همگن‌سازی، نمونه‌ها در دو دمای 1150°C و 1160°C مورد عملیات حرارتی همگن سازی واقع شدند.

تغییرات کسر حجمی حوضچه‌های مذاب در حین عملیات حرارتی همگن‌سازی از طریق ذوب جزئی در حوالی دمای یوتکتیک در شکل (۴) ارائه شده است. حوضچه‌های مذاب

(الف) عملیات همگن سازی در نزدیکی خط یوتکتیک:

تصویر میکروسکوپی نمونه‌های ذوب جزئی شده در مراحل اولیه عملیات حرارتی همگن‌سازی از طریق ذوب جزئی در شکل (۳) نشان داده شده است. تشکیل فاز لدبوریت در شکل (۳) حاکی از به وجود آمدن حوضچه‌های مذاب در مراحل اولیه عملیات حرارتی همگن‌سازی می‌باشد که با سریع سرد کردن نمونه‌ها و کاهش دما از درجه حرارت یوتکتیک، حوضچه‌های مذاب به لدبوریت (مجموعه‌ایی از آستنیت و سمانتیت) تبدیل شده است. همانطوریکه در شکل (۳) دیده می‌شود حوضچه‌های مذاب در مناطق بین کره‌های گرافیتی، یا

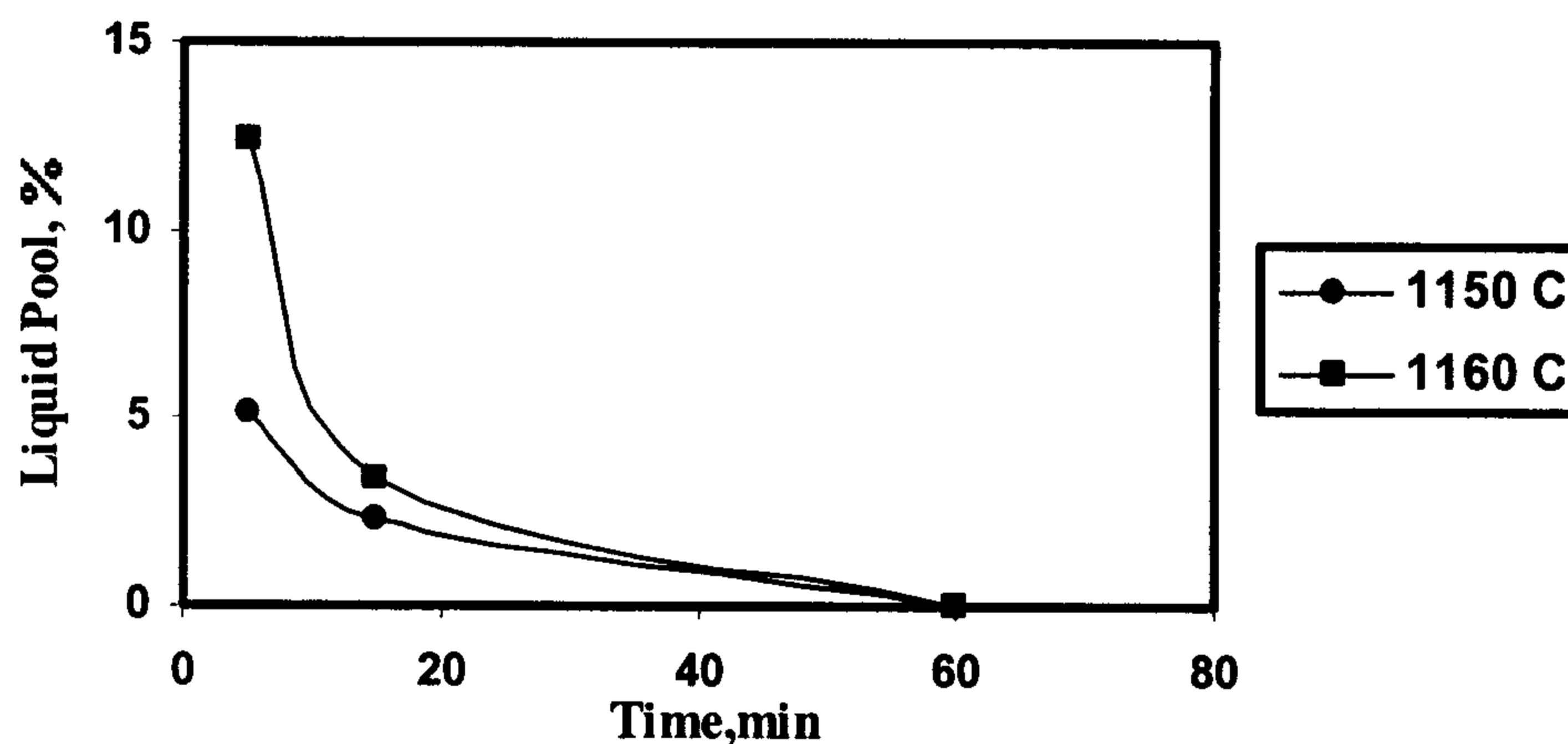
دماهای مختلف عملیات حرارتی همگن سازی مدت زمان لازم برای انجماد کامل حوضچه‌های مذاب تقریباً یکسان می‌باشد.

نحوه توزیع عناصر آلیاژی در نمونه‌های همگن شده از طریق ذوب جزئی در جدول (۲) آورده شده است. مقایسه پروفیل غلظتی عناصر آلیاژی در نمونه‌های همگن شده و همگن نشده در اشکال (۵) و (۶) نشان داده شده است. همانگونه که در این اشکال و جدول (۲) دیده می‌شود، با افزایش دمای عملیات حرارتی همگن سازی تا ایجاد حوضچه‌های مذاب، بر خلاف تحقیقات و آزمایشات انجام شده تا امروز، عملیات حرارتی همگن سازی در حذف جدایش از زمینه چدنهای نشکن موفق می‌باشد. مقایسه نسبت جدایش در نمونه‌های همگن شده و همگن نشده در شکل (۷) ارائه شده است. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود پس از عملیات حرارتی همگن سازی، نسبت جدایش عناصر آلیاژی به سمت یک نزدیک شده که نشان دهنده توزیع یکنواخت عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن بعد از عملیات همگن سازی می‌باشد.

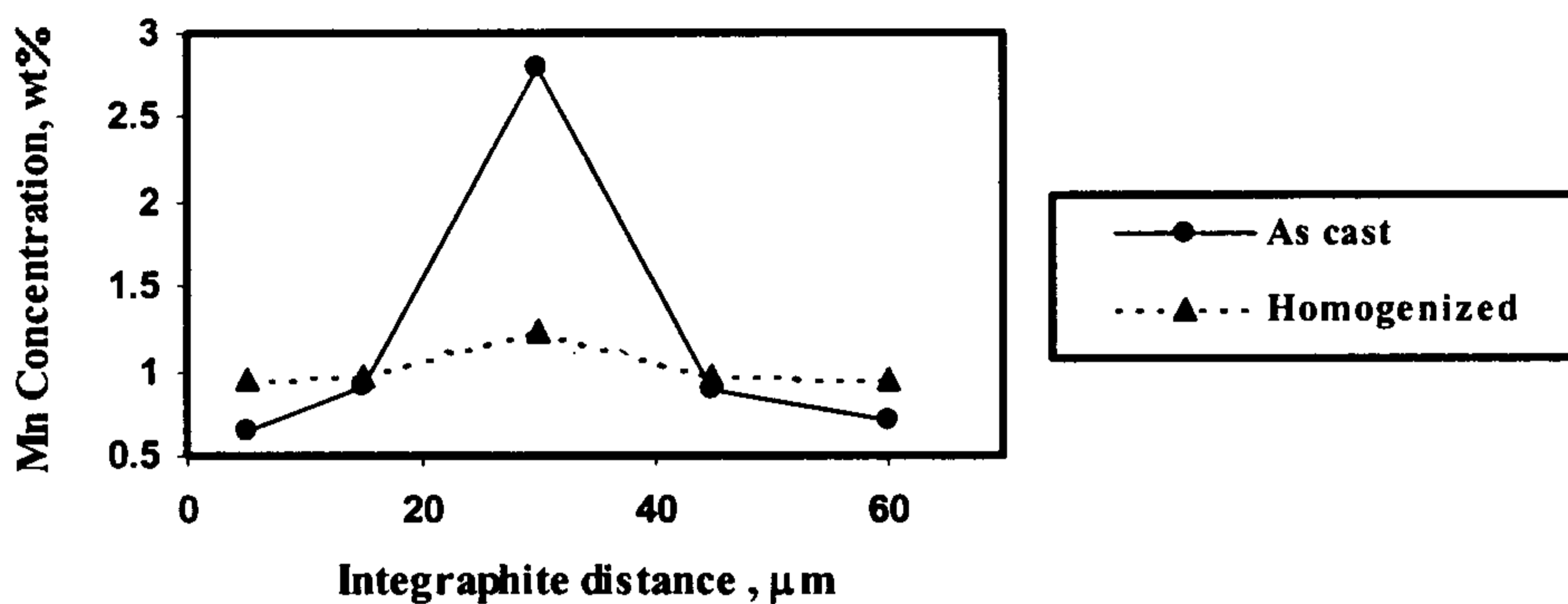
تشکیل شده غنی از عنصر آلیاژی منگنز می‌باشد و مناطق اطراف حوضچه‌های مذاب، غنی از عنصر آلیاژی سیلیسیم، فلاکس عنصر آلیاژی منگنز از حوضچه‌های مذاب به مناطق جامد اطراف حوضچه‌های مذاب و فلاکس عنصر آلیاژی سیلیسیم از مناطق جامد اطراف حوضچه‌های مذاب به حوضچه‌های مذاب منجر به افزایش نقطه یوتکتیک در حوضچه‌های مذاب شده و حوضچه‌های مذاب شروع به انقباض می‌نماید و در نهایت با افزایش نقطه یوتکتیک در حوضچه‌های مذاب از دمای عملیات حرارتی همگن سازی، حوضچه‌های مذاب باقیمانده به صورت ایزوترم منجمد می‌شود. نکته مهم در شکل فوق انجماد کامل حوضچه‌های مذاب در مدت زمان تقریباً یکسان در حین همگن سازی در دماهای مختلف می‌باشد. در دماهای بالاتر همگن سازی علی‌رغم بزرگتر بودن کسر حجمی حوضچه‌های مذاب تشکیل شده ضریب نفوذ عناصر آلیاژی و سرعت جابجایی آنها هم بیشتر می‌باشد. در دماهای پایین‌تر عملیات حرارتی همگن سازی علی‌رغم کمتر بودن ضریب نفوذ عناصر آلیاژی، کسر حجمی حوضچه‌های مذاب تشکیل شده هم کمتر می‌باشد. در نتیجه در

جدول ۲: پروفیل غلظتی نمونه همگن شده .

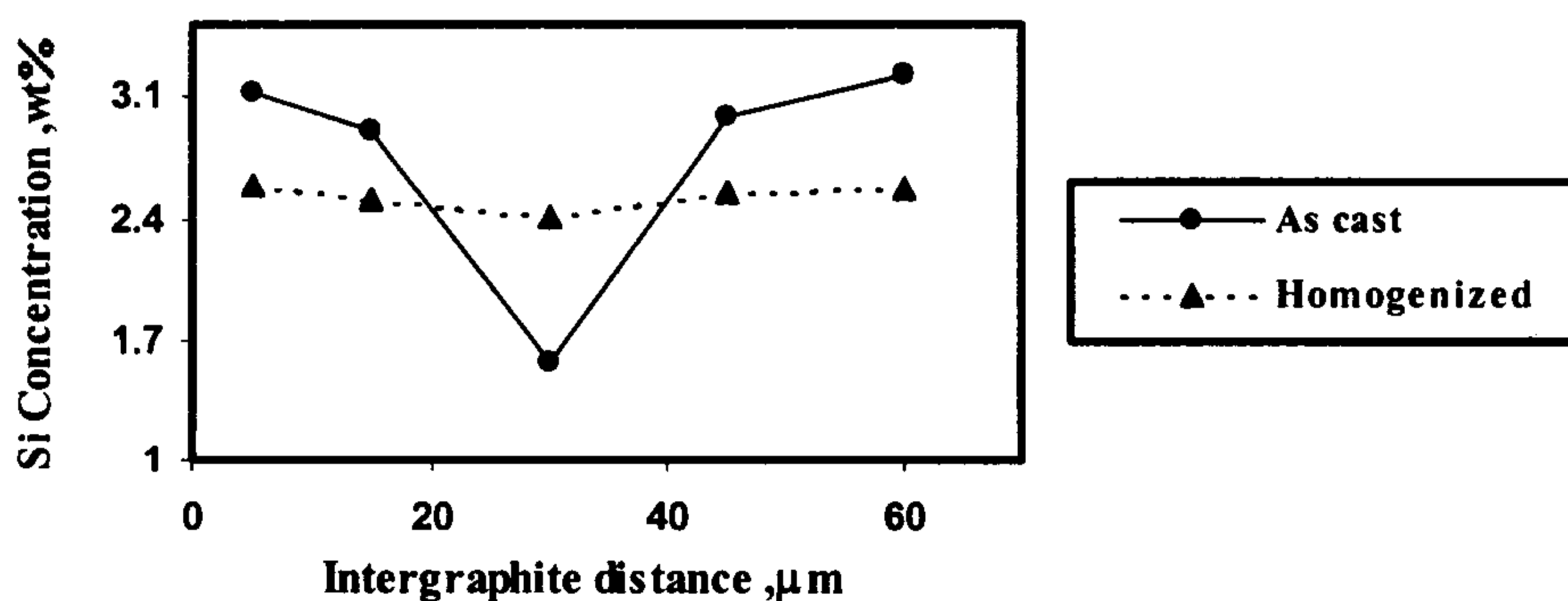
عنصر آلیاژی	فاصله بین گرافیتی (μm)				
	۵	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰
Mn(Wt%)	۰/۹۶	۰/۹۸	۱/۲۳	۰/۹۷	۰/۹۵
Si(Wt%)	۲/۵۹	۲/۵۱	۲/۴۲	۲/۵۵	۲/۵۷



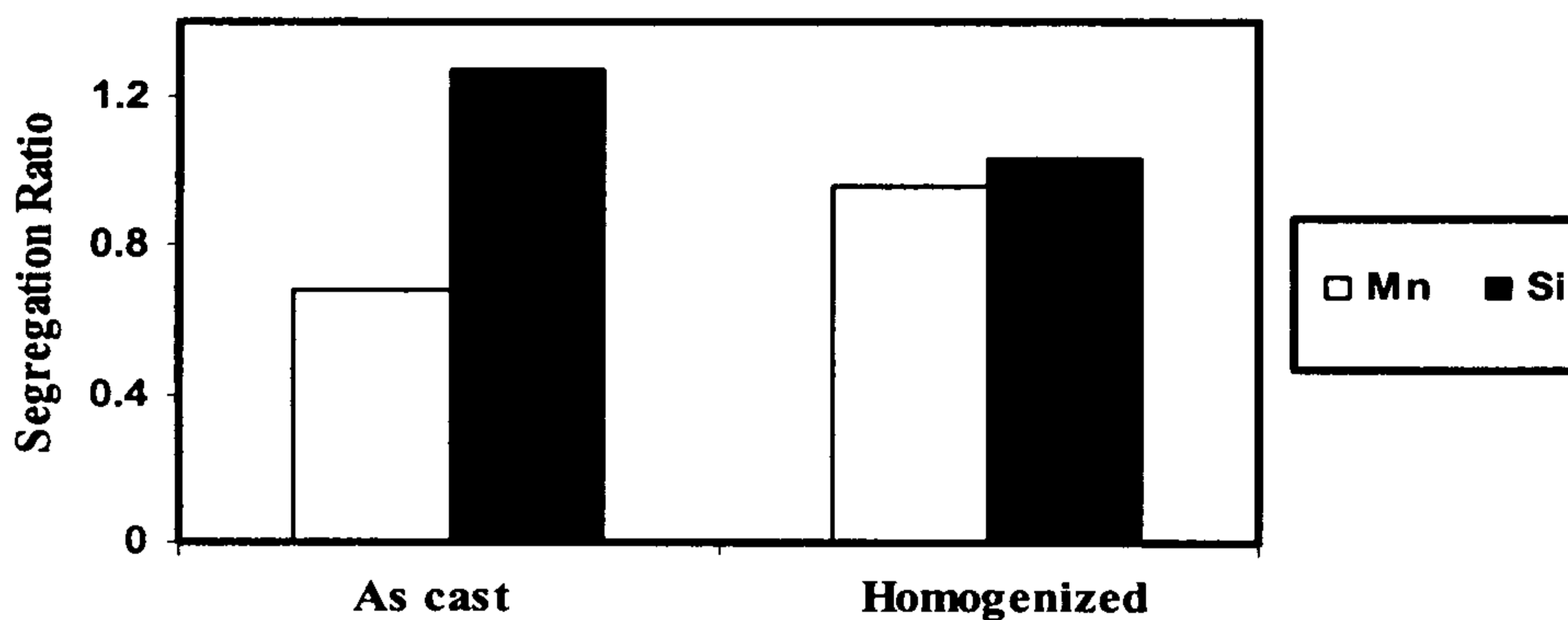
شکل ۴: تغییرات درصد مذاب در حین عملیات حرارتی همگن سازی .



شکل ۵ : مقایسه توزیع عنصر آلیاژی منگنز در نمونه‌های ریختگی و همگن شده .



شکل ۶ : مقایسه توزیع عنصر آلیاژی سیلیسیم در نمونه‌های ریختگی و همگن شده .



شکل ۷ : مقایسه نسبت جدایش نمونه‌های همگن شده و همگن نشده .

سختی‌پذیری این مناطق و در نتیجه به تاخیر افتادن استحاله آستمپرینگ در نواحی بین کره‌های گرافیتی می‌شود. که این تاخیر منجر به افزایش مقدار UAV (در حدود ۱۲٪) در نمونه‌هایی که بدون عملیات همگن‌سازی مورد عملیات آستمپرینگ واقع می‌شوند، می‌گردد. ولی نمونه‌هایی که پس از عملیات حرارتی همگن‌سازی مورد

تصویر میکروسکوپی نمونه‌های آستمپر شده در دو حالت همگن شده و همگن نشده به ترتیب در اشکال (۸) و (۹) ارائه شده است. مناطق سفید رنگ در شکل (۸) معرف آستنیت باقیمانده ناپایدار^۲ می‌باشد. جدایش عنصر آلیاژی منگنز در مناطق بین کره‌های گرافیتی منجر به افزایش پتانسیل شیمیایی عنصر آلیاژی کربن، افزایش

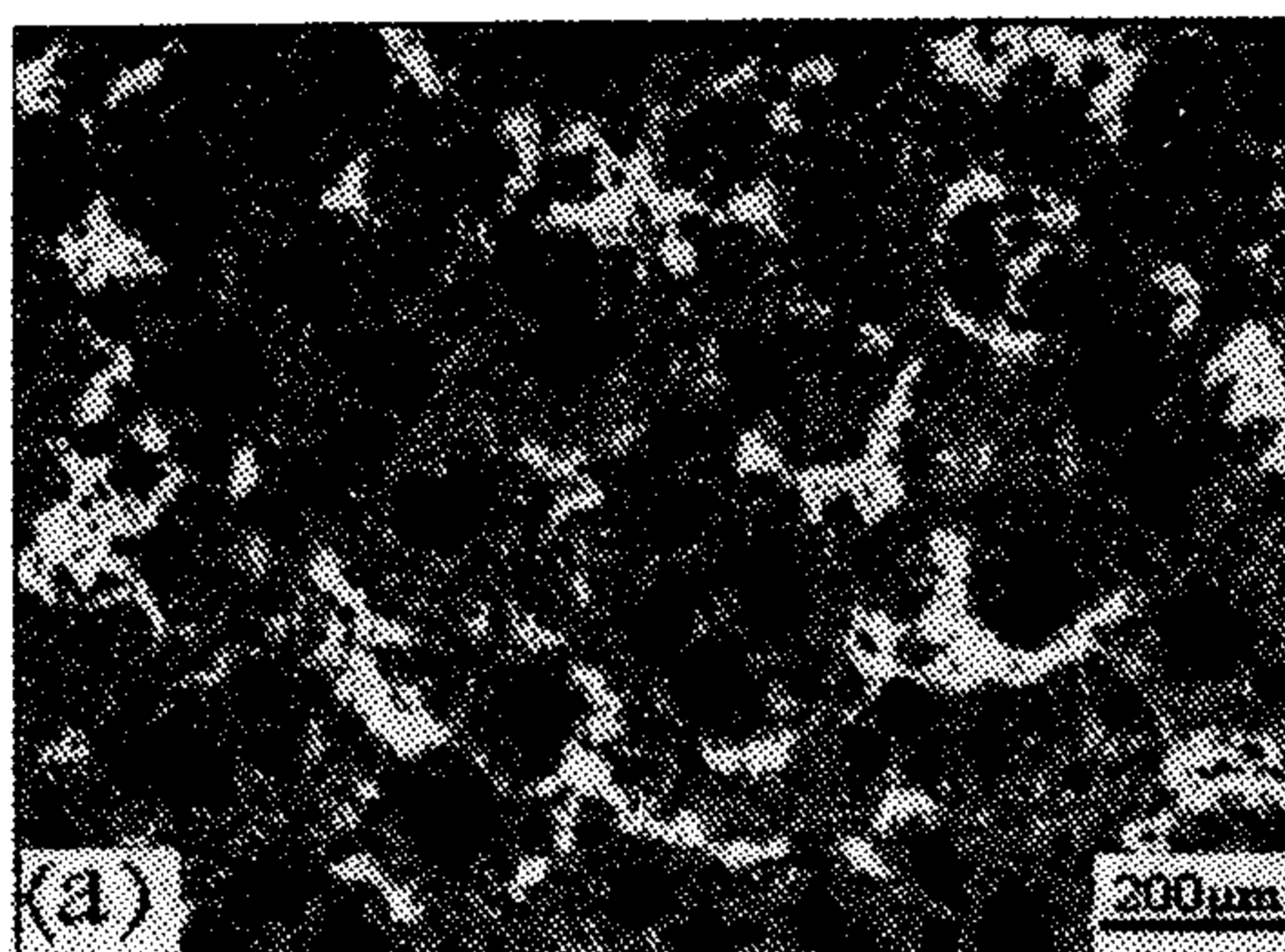
دمای یوتکتیک (دمای $1200^{\circ}C$) در اشکال (۱۱) ارائه شده است. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود با افزایش دمای عملیات حرارتی همگن‌سازی تا بالای دمای یوتکتیک، پروفیل غلظتی عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن نه تنها همگن نشده بلکه جدایش عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن شدیدتر هم گشته است. با در نظر گرفتن نمودار فازی ارائه شده در شکل (۱۲) و انتخاب دمای همگن‌سازی در بالای خط یوتکتیک برای آلیاژی با ترکیب C_1 ، نمونه در منطقه دو فازی $L + \gamma$ واقع می‌شود. در این منطقه مذاب با ترکیب B با جامد با ترکیب A در تعادل بوده و سیستم در این حالت پایدار می‌باشد. در این شرایط منگنز به علت ضریب توزیع کوچکتر از یک از فاز جامد به سمت حوضچه‌های مذاب نفوذ می‌نماید و سیلیسیم به علت ضریب توزیع بزرگتر از یک به سمت فاز جامد پس زده می‌شود. در نتیجه جدایش عناصر آلیاژی منگنز و سیلیسیم در زمینه چدنهای نشکن نه تنها کاهش نمی‌یابد بلکه افزایش نیز می‌یابد.

عملیات آستمپرینگ واقع می‌شوند میزان UAV بشدت کاهش یافته است (در حدود ۱٪) که نشان دهنده توزیع یکنواخت عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن و سختی پذیری یکسان مناطق مختلف زمینه می‌شود، در نتیجه استحاله آستمپرینگ در مناطق مختلف زمینه چدنهای نشکن پس از عملیات حرارتی همگن‌سازی با سرعت تقریباً یکسانی انجام شده و میزان آستنیت باقیمانده ناپایدار به حداقل مقدار ممکن رسیده است.

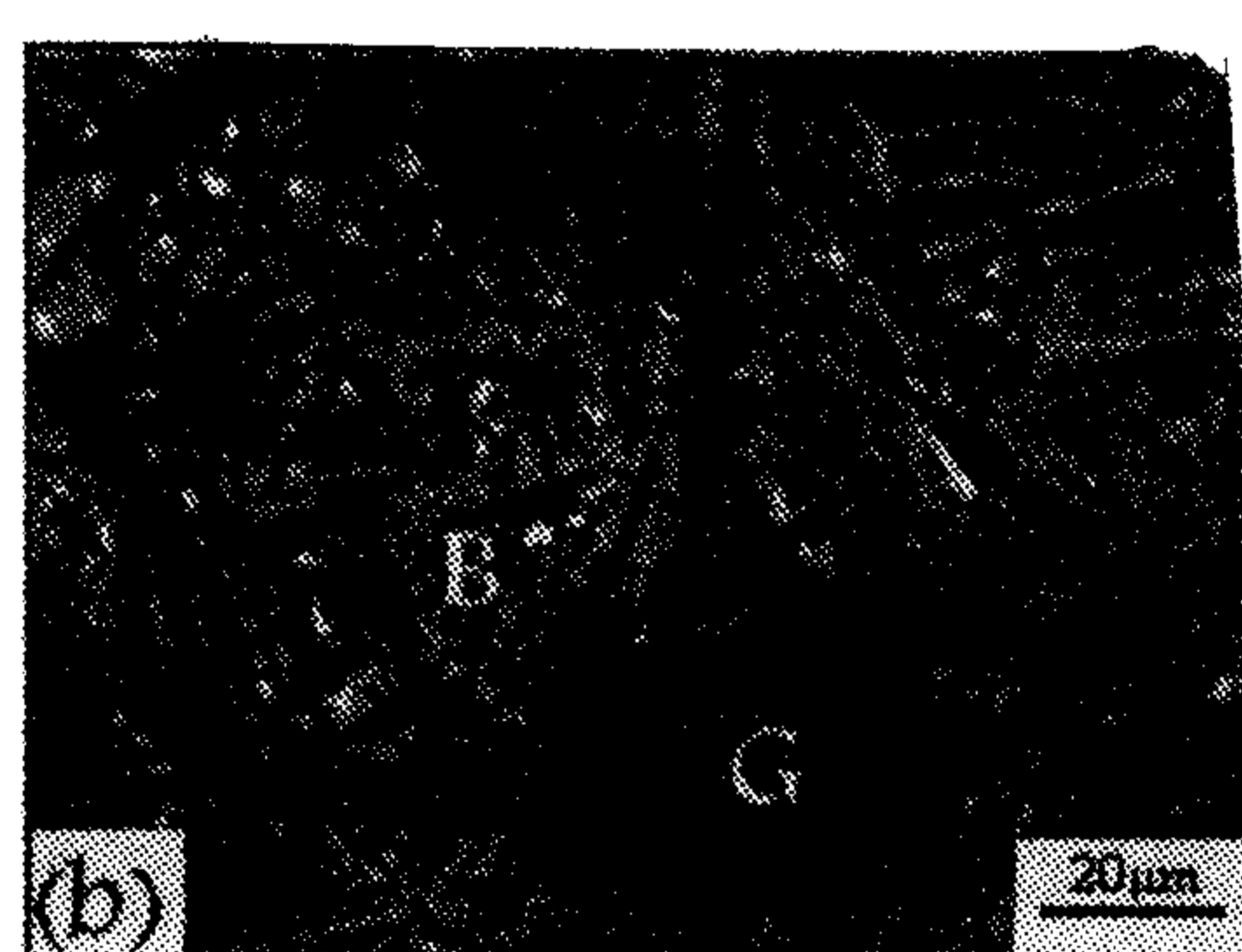
تاثیر عملیات حرارتی همگن‌سازی بر مورفولوژی گرافیتها در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود پس از عملیات حرارتی همگن‌سازی از طریق ذوب جزئی تغییر جزئی در مورفولوژی گرافیتها بوجود می‌آید. افزایش کرویت گرافیتها احتمالاً به علت حل شدن برخی از گرافیتها با اشکال غیر کرووی در زمینه چدنهای نشکن می‌باشد.

ب) همگن‌سازی در دمای بالای خط یوتکتیک

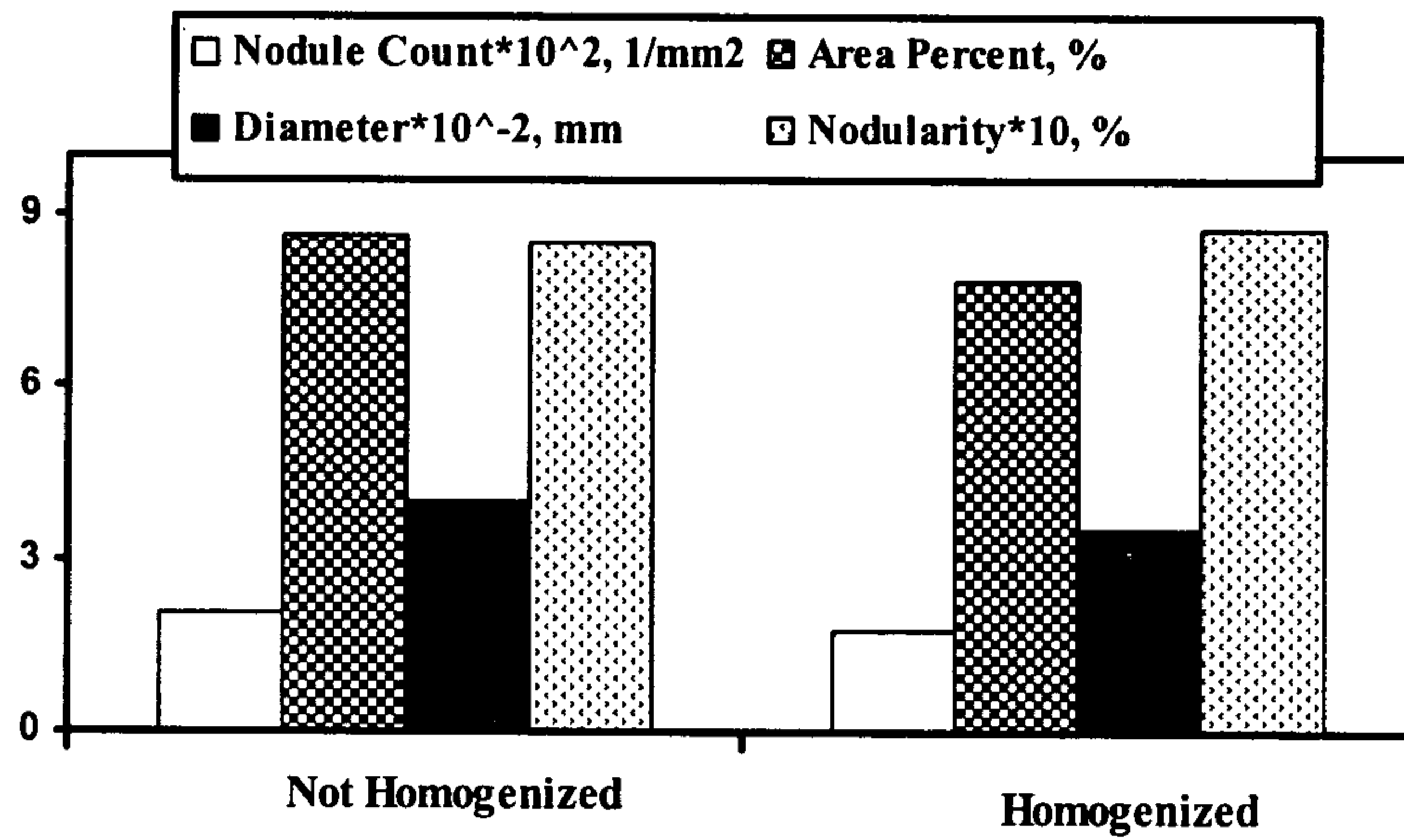
Line Scan نمونه‌های همگن شده در بالای



شکل ۸ : ریزساختار نمونه آستمپر شده بدون عملیات همگن سازی (a) بزرگنمایی ۵۰X (b) بزرگنمایی ۵۰۰X .



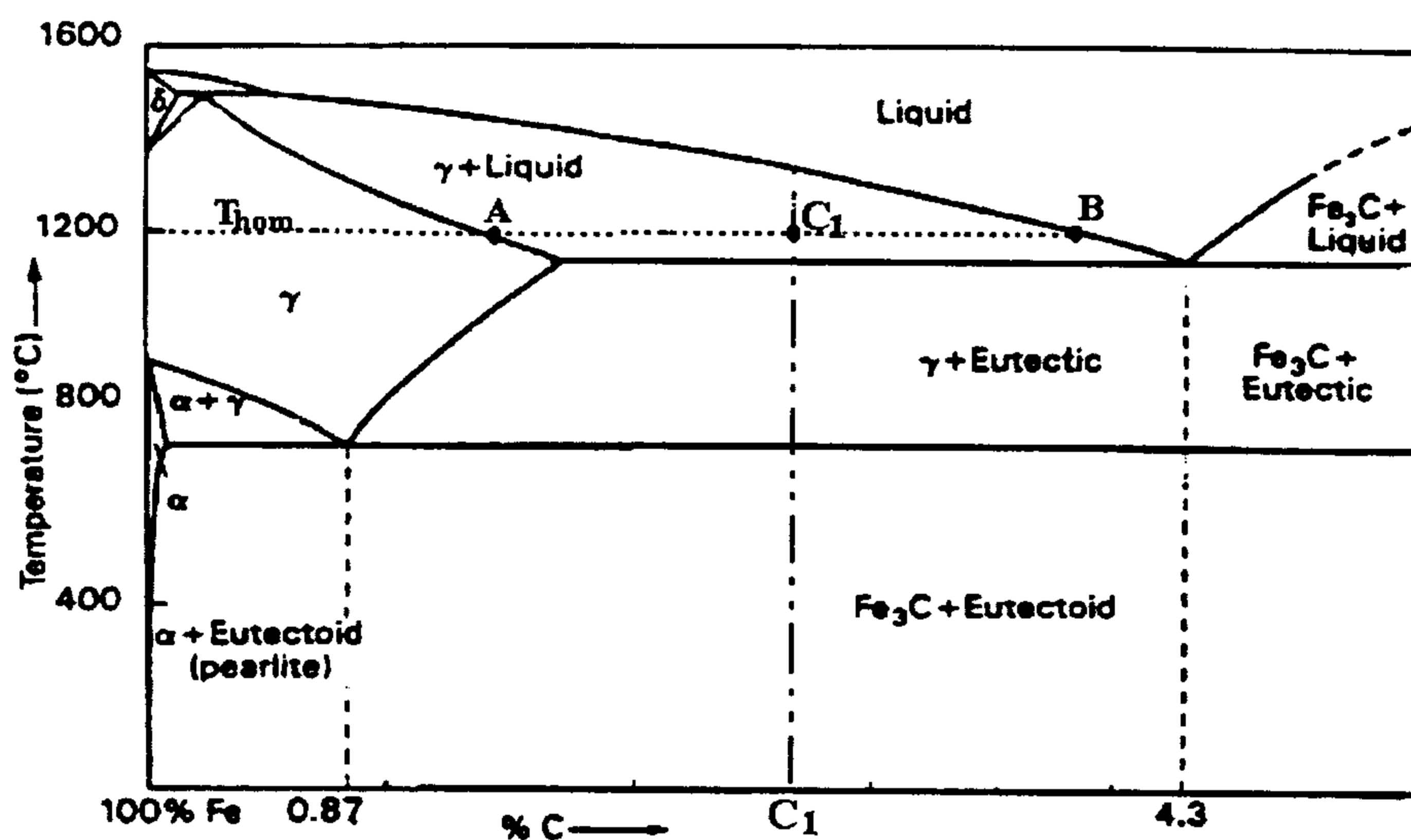
شکل ۹ : ریزساختار نمونه آستمپر شده بعد از عملیات همگن سازی (a) بزرگنمایی ۵۰X (b) بزرگنمایی ۵۰۰X .



شکل ۱۰: تاثیر عملیات حرارتی همگن سازی بر مساحت فاز گرافیت در زمینه، تعداد کره‌های گرافیتی در واحد سطح، کرویت گرافیتها و قطر متوسط کره‌های گرافیتی.



شکل ۱۱: پروفیل غلظتی عناصر آلیاژی منگنز و سیلیسیم در نمونه همگن شده بالای دمای یوتکتیک



شکل ۱۲: نمودار فازی Fe-C به همراه خط ایزوترم همگن سازی در منطقه دوفازی.

نتیجه گیری

۱- عملیات حرارتی همگن سازی چدنهای نشکن از طریق ذوب جزئی منجر به کاهش نسبت جدایش عنصر آلیاژی منگنز به میزان ۴۱٪ و کاهش نسبت جدایش عنصر آلیاژی سیلیسیم به میزان ۲۳٪ می شود.

۲- عملیات حرارتی همگن سازی چدنهای نشکن از طریق ذوب جزئی منجر به حذف تقریبی آستنیت باقیمانده ناپایدار در چدنهای نشکن آستمپر شده می شود.

۳- عملیات حرارتی همگن سازی از طریق ذوب جزئی تاثیر جزئی بر مورفولوژی گرافیتها دارد.

۴- عملیات حرارتی در بالای دمای یوتکتیک منجر به همگن شدن نمونه ها نشده بلکه جدایش عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن را نیز تشدید می کند.

فهرست علائم

S: جدایش

UAV: آستنیت باقیمانده ناپایدار

مراجع

- 1 - Porter, D.A. and Easterling, K. E. (1992). *Phase Transformations in Metals and Alloys*. Chapman and Hall Publication, London.
- 2 - Felemings, M. C.(1974). *Solidification Processing*. McGraw-Hill Publication, New York.
- 3 - Nili Ahmadabadi, M., Niyama, E. and Ohide, T. (1994). "Structural control of 1% Mn ADI aided by modeling of microsegregation." *AFS Transactions*, Vol. 59, PP. 269-278.
- 4 - Schissler, J. M., Liu, Y. C., Chobaut, J. P. and Brenot, P. (1991). "Upper bainitic heat treatment of manganese, Nickel and Copper Alloyed, S.G. Cast Iron." *Proc. 2ed Int. Conf. on Austempered Ductile Iron*, New York, USA, Vol. 2, PP. 424-435.
- 5 - Kovacs, B. (1991). "The effects of alloying elements and their segregation in ADI." *Proc. 2ed Int. Conf. on Austempered Ductile Iron*, New York, USA, Vol. 1, PP. 241-252.
- ۶- گلعدار، م. ع. "اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها و چدنها." چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۳۷۵).
- 7 - Owhadi, A., Hedjazi, J., Davami, P., Fazli, M. and Shabestari, J. M. (1997). "Microsegregation of manganese and silicon in high manganese ductile iron." *Materials Science and Technology*, Vol. 13, PP. 813-817.
- 8 - Lin, B. Y., Chen, E. T. and Lei, T. S. (1998). "The effect of segregation on the austemper transformation and toughness of ductile irons." *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 7, No. 3, PP. 407-419.
- 9 - Davis, J. R. (Edited), (1996). "ASM specialty handbook cast irons." *ASM International Publication*, New York, PP. 192-204.
- 10 - Dorazil, E. (1991). "High strength austempered ductile cast iron." *1st ed. Eills Horwood Publication*, London PP. 128-215.
- 11 - Jolley, G., Grad, L. M., Gilbert, G. N. J., Eng, C. and Mesh, G. (1967). "Segregation in nodular iron and its influence on mechanical properties." *The British Foundryman*, PP. 72-97.
- 12 - Lacaze, J., Boudot, A., Gerval, V., Oquab, D. and Santos, H. (1997). "The role of manganese and copper in the eutectoid transformation of spheroidal graphite cast iron." *Metallurgical and Materials Transaction A*, Vol. 28A, PP. 2015-2025.

- 13 - Purdy, G. R. and Kirkaldy, J. S. (1971). "Homogenization by diffusion." *Metallurgical Transactions*, Vol. 2, PP. 371-378.
- 14 - Purdy, G. R., Malakhov, D. V. and Guha, A. (2001). "Homogenization of multicomponent alloy via partial melting." *Journal of Phase Equilibria*, Vol. 22, No. 4, PP. 439-450.
- 15 - Cole, G. S. (1972). "Solidification of ductile iron." *AFS Transactions*, Vol. 48, PP. 385-348.
- 16 - Yeung, C. F., Zhao, H. and Lee, W. B. (1998). "The morphology of solidification of thin-section ductile iron castings." *Materials Characterization*, Vol. 40, PP. 201-203.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 – Processing Window

2 –Untransformed Austenite Volume