

بِسْمِ اللَّهِ

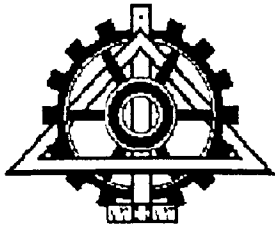
بِنَامِ خَدَاوَنَد

الرَّحْمَنُ

بِخَشَنَدَه

الرَّحِيمُ

و مَهْرَبَان



دانشگاه تهران
دانشکده فنی



۱۳۸۱ / ۹ / ۲۴ عملیات حرارتی همگن سازی چدنهای نشکن
از طریق ذوب جزئی و مدلینگ آن

رئیس هیئت مدیره
دانشگاه تهران

نگارش:

مسعود مصلائی پور یزدی

استاد راهنما: دکتر محمود نیلی احمد آبادی

استاد مشاور: دکتر جعفر راثی زاده

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مواد-گرایش شناسایی و انتخاب مواد

۴۲۵۹۸

آبان ۱۳۸۱

صفحه تصویب پایان نامه کارشناسی ارشد

موضوع:

عملیات حرارتی همگن سازی چدنهای نشکن از طریق ذوب جزئی و مدلینگ آن

توسط:

مسعود مصلائی پور یزدی

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته: متالورژی و مواد گرایش: شناسایی و انتخاب مواد فلزی

از این پایان نامه در تاریخ ۱۳۸۱/۸/۲۹ در مقابل

هیئت داوران دفاع بعمل آمده و مورد تصویب قرار گرفت.

محل امضاء



سرپرست کمیته تحصیلات تکمیلی دانشکده:

مدیر گروه آموزشی: دکتر فرشاد اخلاقی

سرپرست تحصیلات تکمیلی گروه: دکتر حمید رضا قاسمی منفرد راد

استاد راهنما: دکتر محمود نیلی احمدآبادی

استاد مشاور: دکتر جعفر راثی زاده

داور مدعو: دکتر شهرام خیراندیش

داور داخلی: دکتر فرشاد اخلاقی

تقدیم

تقدیم به پدر بزرگوارم که به من
پشتکار و تسلیم نشدن در برابر سختیها
را آموخت.

تقدیم به مادر بزرگوارم که به من یاد داد
خواستن، توانستن است.

تقدیم به خواهر عزیزم،
یگانه غمخوار من در دیار غربت.

چکیده

یکی از اهداف مهم در تولید چدنهای نشکن، تهیه چدن نشکن آستمپر شده با خواص مکانیکی بهینه می‌باشد. جدایش عناصر آلیاژی در حین انجماد مذاب چدنهای نشکن منجر به افت خواص مکانیکی و پایین آمدن کارایی عملیات حرارتی آستمپرینگ چدنهای نشکن می‌شود.

در این پژوهش به منظور تعیین جدایش عناصر آلیاژی در چدنهای نشکن ریختگی، نمونه‌هایی مکعبی شکل بریده شده از شمش چدن نشکن ریخته‌گری شده توسط کوره القایی با فرکانس متوسط، مورد آنالیز Spot-EDS قرار گرفتند. نتایج بدست آمده نشان داد عنصر آلیاژی سیلیسیم بعلت ضریب توزیع بزرگتر از یک در مجاورت کره‌های گرافیتی و عنصر آلیاژی منگنز بعلت ضریب توزیع کوچکتر از یک در مناطق بین کره‌های گرافیتی تجمع می‌یابد.

در ادامه به منظور همگن نمودن توزیع عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن، بر خلاف روشهای متداول (بعلت عدم کارآمد بودن در همگن سازی توزیع عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن) از عملیات حرارتی همگن سازی نمونه‌های چدن نشکن از طریق ذوب جزئی استفاده گردید. برای بررسی تاثیر عملیات حرارتی همگن سازی از طریق ذوب جزئی بر پروفیل غلظتی عناصر آلیاژی، نمونه‌ها بعد از عملیات حرارتی مورد آنالیز Spot-EDS و Line-EDS واقع شدند. نتایج حاصله از همگن شدن توزیع عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن حکایت داشت.

بررسیهای انجام شده در مورد تاثیر عملیات حرارتی همگن سازی از طریق ذوب جزئی بر عملیات حرارتی آستمپرینگ چدنهای نشکن نشان داد، میزان آستنیت باقی مانده ناپایدار در چدنهای همگن و آستمپر شده به حداقل مقدار ممکن رسیده است.

پیش‌بینی مدت زمان لازم برای همگن سازی چدنهای نشکن و پیش‌بینی نحوه تغییرات پروفیل غلظتی عناصر آلیاژی در حین همگن سازی چدنهای نشکن، از طریق مدلینگ عملیات حرارتی همگن سازی انجام شد. مقایسه مقادیر تجربی بدست آمده و پیش‌بینی شده توسط مدلینگ در مورد تغییرات غلظت عناصر آلیاژی در حین عملیات حرارتی همگن سازی چدنهای نشکن از طریق ذوب جزئی نشان داد مدلینگ انجام شده از دقت بالایی برخوردار است.

تقدیر و تشکر

به مصداق گفته گوهروار من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق
بر خود می‌دانم از تمام اساتید، کلیه دوستان و همه افرادی که در انجام این پژوهش صمیمانه مرا
یاری کرده‌اند، تشکر و قدردانی نمایم.

از جناب آقای دکتر محمود نیلی احمد آبادی
ریاست محترم دانشکده فنی و استاد راهنمای این پروژه
که یقیناً انجام این پروژه بدون راهنمایی و هدایت ایشان ممکن نبود، تقدیر و تشکر می‌نمایم.

از جناب آقای دکتر اخلاقی و جناب آقای دکتر خیراندیش
که زحمت بازخوانی این پایان‌نامه را متقبل شدند، کمال قدردانی را دارم.

از جناب آقای دکتر راثی‌زاده استاد مشاور این پروژه، جناب آقای دکتر قاسمی معاونت محترم
تحصیلات تکمیلی گروه و از جناب آقای دکتر کاشانی بزرگ سرپرست آزمایشگاه متالوگرافی پیشرفته
سپاسگزاری می‌نمایم.

مراتب قدردانی خود را از تمام دوستانی که در انجام این پروژه یاری‌رسان من بوده‌اند
بخصوص مهندسين :
یدالله اصغر نژاد، جعفر قربانی، فرزاد جانعلی‌نیا، حمید عزیزی، احسان فاضلی، رضا تقی‌آبادی،
اسدالله اسداللهی و دیگر دوستان اعلام می‌دانم.

از مسئولین محترم آزمایشگاه ذوب و ریخته‌گری بخصوص آقای محسنی سپاسگزارم.

از اعضای گروه تحقیقاتی دکتر نیلی،
بخصوص :

مهندس حسین نژاد، مهندس پورگنجی مهندس حسن شیرازی مهندس پهلوانی مهندس
شیخ‌عبدالحسین و . . . قدردانی می‌نمایم.

اجرکم عند الله

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	فصل اول، مقدمه
۴	فصل دوم، مروری بر منابع
۵	۲-۱- چدنهای نشکن
۶	۲-۲- انجماد چدنهای نشکن
۶	۲-۲-۱- انجماد چدنهای نشکن هیپویوتکتیک
۷	۲-۲-۲- انجماد یوتکتیکی در چدنهای نشکن
۸	۲-۳- عناصر آلیاژی در چدنهای نشکن
۱۰	۲-۳-۱- عنصر آلیاژی سیلیسیم
۱۲	۲-۳-۲- عنصر آلیاژی منگنز
۱۴	۲-۳-۳- مقایسه تأثیر عناصر آلیاژی منگنز و سیلیسیم در چدنهای نشکن
۱۴	۲-۴- جدایش عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن
۱۵	۲-۴-۱- تخمین شدت جدایش عناصر آلیاژی در زمینه چدنهای نشکن
۱۷	۲-۴-۲- تأثیر جدایش عناصر آلیاژی بر خواص ADI
۱۸	۲-۴-۳- تأثیر عوامل مؤثر بر جدایش عناصر آلیاژی در زمینه
۱۸	۲-۴-۳-۱- ترکیب شیمیایی
۱۹	۲-۴-۳-۲- شرایط ریخته گری و انجماد
۲۲	۲-۵- عملیات حرارتی آستمپرینگ چدنهای نشکن
۲۳	۲-۵-۱- عوامل مؤثر بر عملیات حرارتی آستمپرینگ چدنهای نشکن
۲۶	۲-۶- عملیات حرارتی همگن سازی
۲۸	۲-۶-۱- عملیات همگن سازی از طریق ذوب جزئی
۲۹	۲-۷- روشهای عددی حل معادله نفوذ
۳۲	فصل سوم، روش انجام آزمایش

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۳۳	۳-۱- تهیه و ساخت نمونه‌ها
۳۳	۳-۲- عملیات حرارتی همگن سازی نمونه‌ها
۳۴	۳-۳- متالوگرافی نمونه‌ها
۳۴	۳-۳-۱- آماده سازی سطحی نمونه‌ها
۳۴	۳-۳-۲- بررسی ریز ساختاری نمونه‌ها
۳۵	۳-۴- بررسی درصد فازها و مشخصه‌های کره‌های گرافیت
۳۵	۳-۵- آنالیز کمی نقطه‌ای و خطی نمونه‌ها
۳۶	۳-۶- محاسبه نسبت جدایش عناصر آلیاژی
۳۶	۳-۷- عملیات حرارتی آستمپرینگ نمونه‌ها
۳۷	۳-۸- پیش بینی زمان همگن سازی نمونه‌ها از طریق ذوب جزئی
۳۸	۳-۹- نام گذاری نمونه‌ها
۳۹	فصل چهارم، مدلینگ
۴۰	۴-۱- مقدمه
۴۱	۴-۲- فرضیه‌های مورد استفاده در مدل نمودن عملیات حرارتی همگن سازی چدنهای نشکن از طریق ذوب جزئی
۴۱	۴-۳- فرمول بندی معادلات حاکم بر سیستم
۴۱	۴-۳-۱- فرمول بندی معادلات تغییر غلظت عناصر آلیاژی در مذاب
۴۵	۴-۳-۲- فرمول بندی معادلات تغییر غلظت عناصر آلیاژی منگنز و سیلیسیم در فاز جامد
۴۹	۴-۴- بررسی بعدی معادله بدست آمده برای محاسبه غلظت عناصر آلیاژی در مذاب
۴۹	۴-۵- محاسبه گام زمانی و گام مکانی در المان بندی سیستم مورد بررسی
۵۰	۴-۶- بررسی مدلینگهای انجام شده
۵۰	۴-۶-۱- تعیین پروفیل غلظتی عناصر آلیاژی منگنز و سیلیسیم

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۵۴	۴-۶-۲- تعیین شرایط اولیه
۵۶	۴-۶-۳- مدلینگ عملیات حرارتی همگن سازی از طریق ذوب جزئی
۵۹	۴-۷- پیش‌بینی مدلینگ عملیات حرارتی همگن سازی
۷۳	فصل پنجم، نتایج و بحث
۷۴	۵-۱- جدایش عناصر آلیاژی منگنز و سیلیسیم در نمونه‌های ریختگی (Hit0)
۷۷	۵-۲- تاثیر فاکتورهای مختلف عملیات حرارتی همگن سازی از طریق ذوب جزئی بر کسر حجمی مذاب تشکیل شده
۷۷	۵-۲-۱- عملیات حرارتی همگن سازی نمونه‌ها در حوالی دمای یوتکتیک
۸۰	۵-۲-۲- عملیات حرارتی همگن سازی نمونه‌ها در بالای دمای یوتکتیک
۸۳	۵-۳- تاثیر عملیات حرارتی همگن سازی بر جدایش عناصر آلیاژی منگنز و سیلیسیم
۸۳	۵-۳-۱- عملیات حرارتی همگن سازی در حوالی دمای یوتکتیک
۸۶	۵-۳-۲- عملیات حرارتی همگن سازی بالای دمای یوتکتیک
۸۹	۵-۴- تاثیر عملیات حرارتی همگن سازی بر مورفولوژی و توزیع کره‌های گرافیتی
۹۲	۵-۵- تاثیر عملیات حرارتی همگن سازی بر میزان UAV در فرآیند آستمپرینگ نمونه‌ها
۹۴	۵-۶- مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدلینگ با مقادیر تجربی
۹۸	فصل ششم، نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۹۹	۶-۱- نتیجه‌گیری
۱۰۰	۶-۲- پیشنهادها
۱۰۱	فصل هفتم، مراجع و مآخذ
۱۰۲	۷-۱- منابع و مآخذ

فهرست جدولها

صفحه	عنوان جدول
۴	فصل دوم، مروری بر منابع
۵	جدول ۱-۲- محدوده ترکیب شیمیایی چدنهای نشکن
۳۲	فصل سوم، روش انجام آزمایش
۳۳	جدول ۱-۳- ترکیب شیمیایی شمش چدن نشکن مورد استفاده
۳۸	جدول ۲-۳- نامگذاری نمونه‌ها
۳۹	فصل چهارم، مدلینگ
۴۹	جدول ۱-۴- دیمانسیون اجزاء معادله
۵۳	جدول ۲-۴- پیش‌بینی پروفیل غلظتی عناصر آلیاژی
۵۹	جدول ۳-۴- نتایج محاسبه تاثیر عنصر آلیاژی منگنز بر دمای یوتکتیک
۶۱	جدول ۴-۴- نتایج محاسبه تاثیر مقدار منگنز بر کسر حجمی مذاب در حین عملیات حرارتی
۶۲	جدول ۵-۴- نتایج محاسبه زمان لازم و دمای همگن سازی حداکثر در نمونه‌های مختلف
۶۴	جدول ۶-۴- نتایج محاسبه پروفیل غلظتی منگنز در نمونه‌های حاوی درصد منگنز متفاوت پس از پنج ساعت عملیات حرارتی همگن سازی در حداکثر دمای ممکن برای همگن سازی
۶۵	جدول ۷-۴- نتایج محاسبه تاثیر دمای همگن سازی بر ترکیب شیمیایی حوضچه‌های مذاب تشکیل شده در مرحله اولیه عملیات حرارتی همگن سازی در نمونه حاوی یک درصد منگنز
۶۶	جدول ۸-۴- پیش‌بینی مدل ارائه شده در مورد تغییرات غلظت عناصر آلیاژی در نصف ناحیه بین کره‌های گرافیتی، در نمونه حاوی یک درصد منگنز
۶۸	جدول ۹-۴- نتایج محاسبه تغییرات غلظت عناصر آلیاژی در حین عملیات حرارتی همگن سازی نمونه حاوی یک درصد منگنز در دمای 1160°C به مدت پنج ساعت
۶۹	جدول ۱۰-۴- نتایج محاسبه تغییرات غلظت عناصر آلیاژی در حین عملیات حرارتی همگن سازی نمونه حاوی یک درصد منگنز در دمای 1150°C به مدت پنج ساعت
۷۱	جدول ۱۱-۴- تغییرات غلظت عنصر آلیاژی منگنز در همگن‌سازی نمونه یک درصد منگنز

نشریات و مقالات دکتر علی‌اکبر
 شهباز

صفحه

عنوان جدول

۷۲	فصل پنجم، نتایج و بحث
۷۳	جدول ۵-۱- نتایج حاصل از Spot-EDS نمونه Ht0
۷۶	جدول ۵-۲- درصد مذاب تشکیل شده در حین عملیات حرارتی همگن سازی
۷۹	جدول ۵-۳- تغییرات کسر حجمی مذاب برحسب زمان
۸۲	جدول ۵-۴- توزیع عناصر آلیاژی در نمونه های Ht0 و H2t300 و H3t300
۸۹	جدول ۵-۵- نتایج حاصل از بررسی کره های گرافیتی در نمونه های مختلف
۹۴	جدول ۵-۶- مقایسه پروفیل غلظتی پیش بینی شده توسط مدلینگ با نتایج تجربی مربوطه

فهرست شکلها

صفحه	عنوان شکل
۲	فصل دوم، مروری بر منابع
۶	شکل ۲-۱- نمایش ترسیمی شکل هندسی گرافیت کروی و تصویر SEM آن
۷	شکل ۲-۲- شماتیک انجماد یوتکتیکی چدنهای نشکن
۷	شکل ۲-۳- منحنی سرد شدن مذاب چدنهای نشکن
۸	شکل ۲-۴- توالی انجماد چدنهای نشکن
۹	شکل ۲-۵- جدول تناوبی به همراه عناصر آلیاژی مورد استفاده در چدنهای نشکن
۱۰	شکل ۲-۶- تاثیر Si بر دیاگرام تعادلی Fe-C
۱۱	شکل ۲-۷- تاثیر Si بر تعداد کره های گرافیتی در واحد سطح زمینه چدنهای نشکن
۱۲	شکل ۲-۸- ساختار مناطق بین سلولی در ADI
۱۳	شکل ۲-۹- اثر منگنز بر خواص مکانیکی ADI
۱۴	شکل ۲-۱۰- دیاگرام TTT آلیاژ Fe-C-Si/Fe-C-Mn
۱۵	شکل ۲-۱۱- شماتیک مناطق جدایش یافته در حین انجماد چدنهای نشکن
۱۶	شکل ۲-۱۲- توزیع عناصر آلیاژی در بین کره های گرافیتی در زمینه چدنهای نشکن
۱۷	شکل ۲-۱۳- تاثیر جدایش عناصر آلیاژی بر سینتیک استحاله آستمپرینگ
۱۹	شکل ۲-۱۴- تاثیر فاصله بین کره های گرافیتی بر جدایش عناصر آلیاژی
۲۱	شکل ۲-۱۵- تاثیر سرعت انجماد بر جدایش عناصر آلیاژی بین کره گرافیتی مجاور
۲۲	شکل ۲-۱۶- تغییرات ریز ساختار آستنیت در حین استحاله آستمپرینگ
۲۴	شکل ۲-۱۷- تاثیر دمای آستنیت کردن بر سختی پذیری چدنهای نشکن
۲۵	شکل ۲-۱۸- تاثیر دمای آستنیت کردن، دما و زمان آستمپرینگ بر آستنیت باقی مانده در ADI
۲۷	شکل ۲-۱۹- پروفیل غلظت عناصر آلیاژی منگنز و سیلیسیم در زمینه چدنهای نشکن
۲۸	شکل ۲-۲۰- پروفیل غلظتی جامد و مذاب در حین عملیات همگن سازی از طریق ذوب جزئی

۳۲	فصل سوم، روش انجام آزمایش
۳۵	شکل ۱-۳- موقعیتهای انجام آزمایش Spot-EDS
۳۷	شکل ۲-۳- سیکل عملیات حرارتی نمونه‌ها
۳۹	فصل چهارم، مدلینگ
۴۰	شکل ۱-۴- مناطق مذاب و جامد در حین عملیات حرارتی همگن سازی بین دو کره گرافیتی
۴۱	شکل ۲-۴- تغییرات غلظت عناصر آلیاژی منگنز و سیلیسیم در سیستم بر حسب زمان
۴۶	شکل ۳-۴- اعمال بلوک فرضی در مجاورت اولین مش فاز جامد
۴۸	شکل ۴-۴- در نظر گرفتن بلوک فرضی در مجاورت پنجمین مش
۵۲	شکل ۵-۴- فلوجارت تعیین پروفیل غلظت عناصر آلیاژی
۵۳	شکل ۶-۴- نحوه توزیع عناصر آلیاژی منگنز و سیلیسیم در نصف فاصله بین کره‌های گرافیتی
۵۵	شکل ۷-۴- فلوجارت تعیین شرایط اولیه سیستم
۵۸	شکل ۸-۴- فلوجارت عملیات حرارتی همگن سازی از طریق ذوب جزئی
۶۰	شکل ۹-۴- پیش‌بینی تغییرات دمای یوتکتیک در نواحی بین کره‌های گرافیتی
۶۲	شکل ۱۰-۴- تغییرات کسر حجمی حوضچه مذاب بر حسب دمای همگن سازی و محدوده دمایی ممکن برای عملیات حرارتی همگن سازی از طریق ذوب جزئی
۶۳	شکل ۱۱-۴- مقایسه زمان پیش‌بینی شده توسط مدلینگ برای کامل شدن عملیات حرارتی همگن سازی در نمونه‌های حاوی درصد مختلف منگنز
۶۴	شکل ۱۲-۴- نتایج محاسبه پروفیل غلظتی منگنز در نمونه‌های حاوی درصد منگنز متفاوت، همگن شده به مدت پنج ساعت در حداکثر دمای ممکن برای همگن سازی
۶۵	شکل ۱۳-۴- تاثیر دمای همگن سازی بر ترکیب شیمیایی حوضچه‌های مذاب تشکیل شده در مراحل اولیه عملیات حرارتی همگن سازی در نمونه حاوی یک درصد منگنز
۶۷	شکل ۱۴-۴- تغییرات غلظت عنصر آلیاژی منگنز در نصف ناحیه بین کره‌های گرافیتی حین عملیات حرارتی همگن سازی نمونه حاوی یک درصد منگنز

عنوان شکل

صفحه

- شکل ۴-۱۵- تغییرات غلظت عنصر آلیاژی سیلیسیم در نصف ناحیه بین کره‌های گرافیتی
حین عملیات حرارتی همگن سازی نمونه حاوی یک درصد منگنز ۶۷
- شکل ۴-۱۶- تغییرات غلظت عنصر آلیاژی منگنز در حین عملیات حرارتی همگن سازی
نمونه حاوی یک درصد منگنز در دمای 1160°C به مدت پنج ساعت ۶۹
- شکل ۴-۱۷- تغییرات غلظت عنصر آلیاژی سیلیسیم در حین عملیات حرارتی همگن سازی
نمونه حاوی یک درصد منگنز در دمای 1150°C به مدت پنج ساعت ۷۰
- شکل ۴-۱۸- تاثیر دمای عملیات حرارتی بر پروفیل غلظتی منگنز در نمونه حاوی یک درصد
منگنز پس از پنج ساعت عملیات همگن سازی ۷۰
- فصل پنجم، نتایج و بحث ۷۳
- شکل ۵-۱- نحوه جدایش عناصر آلیاژی در زمینه نمونه‌های Ht0 ۷۴
- شکل ۵-۲- مقایسه نحوه توزیع منگنز و سیلیسیم در مناطق سه گانه بین کره‌های گرافیتی ۷۴
- شکل ۵-۳- تصویر میکروسکوپی نمونه Ht0 ۷۶
- شکل ۵-۴- تغییرات درصد مذاب در حین عملیات حرارتی همگن سازی ۷۸
- شکل ۵-۵- تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های همگن شده در حوالی دمای یوتکتیک ۷۸
- شکل ۵-۶- تغییرات درصد مذاب در حین همگن سازی بالای دمای یوتکتیک بر حسب زمان ۸۰
- شکل ۵-۷- تصویر میکروسکوپی نمونه H4t60 ۸۱
- شکل ۵-۸- دیاگرام فازی Fe-C برای آلیاژی با درصدهای متفاوت کربن ۸۱
- شکل ۵-۹- دیاگرام فازی تعادلی و غیر تعادلی Fe-C ۸۲
- شکل ۵-۱۰- مقایسه توزیع عنصر آلیاژی منگنز در نمونه‌های Ht0 و H3t300 ۸۴
- شکل ۵-۱۱- مقایسه توزیع عنصر آلیاژی سیلیسیم در نمونه‌های Ht0 و H3t300 ۸۴
- شکل ۵-۱۲- مقایسه نسبت جدایش عناصر آلیاژی در نمونه‌های Ht0 و H2t300 ۸۶
- شکل ۵-۱۳- پروفیل غلظتی عنصر آلیاژی منگنز و سیلیسیم در نمونه H4t120 ۸۷
- شکل ۵-۱۴- پروفیل غلظتی عنصر آلیاژی منگنز و سیلیسیم در نمونه H4t300 ۸۸

صفحه

عنوان شکل

- ۸۹ شکل ۵-۱۵- دیاگرام فازی Fe-C به همراه خط ایزوترم همگن سازی در منطقه دوفازی
- ۹۰ شکل ۵-۱۶- تغییرات درصد کرویت گرافیتها بر حسب دمای همگن سازی
- ۹۰ شکل ۵-۱۷- تغییرات مورفولوژی گرافیتها بر حسب دمای همگن سازی
- ۹۱ شکل ۵-۱۸- مورفولوژی گرافیتها در زمینه نمونه‌ها
- ۹۲ شکل ۵-۱۹- ریزساختار نمونه Ht0A
- ۹۳ شکل ۵-۲۰- ریزساختار نمونه H3t300A
- ۹۶ شکل ۵-۲۱- مقایسه پروفیل غلظتی عناصر آلیاژی منگنز و سیلیسیم محاسبه شده توسط مدلینگ برای نمونه H3t300 با مقادیر تجربی مربوطه