

## بررسی تاثیر زمان نگهداری بر ترکیب شیمیایی، دمای خاتمه و مدت زمان استحاله یوتکتیک در چدن نشکن

علیرضا شیخ عبدالحسین

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد متالورژی و مواد - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

محمود نیلی احمد آبادی

استاد دانشکده مهندسی متالورژی و مواد - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۳/۵/۲۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۳/۴، تاریخ تصویب ۸۴/۱۰/۱۰)

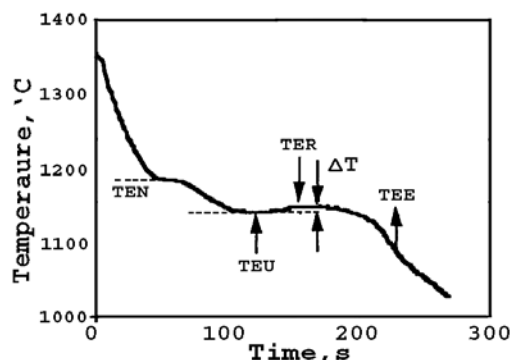
### چکیده

در این مقاله چگونگی تغییرات دمای خاتمه و مدت زمان انجام استحاله یوتکتیک در تلفیهای گوناگون از مواد جوانه زا و کروی کننده با رفتارهای متفاوت در برابر پدیده میرایی مورد بررسی قرار گرفت، برای این منظور از چهار ماده کروی کننده و پنج ماده جوانه زا به ترتیب به میزانهای ثابت ۲/۵ و ۰/۴ درصد وزنی استفاده شد. از مذابهایی که با تلفیهای مختلف از انواع مواد جوانه زا و کروی کننده فراوری شده بودند و تحت گاز خنثی نیتروژن در دمای ۱۳۲۰°C نگهداری می شدند، در زمانهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ نمونه برداری شد؛ برای هر یک از نمونه ها منحنی سرد شدن ترسیم گردید و ریزساختار آنها توسط تحلیلگر تصویری مورد بررسی قرار گرفت و ۲۰ نمونه از میان ۱۰۰ نمونه مورد اسپکترومتری نوری قرار گرفت. ملاحظه گردید زمانیکه مورفولوژی غالب گرافیتها بصورت کروی و یا ورقه ای شکل می باشد، با پیشرفت پدیده میرایی، دمای خاتمه، مدت زمان انجام و سینتتیک استحاله یوتکتیک به ترتیب کاهش، افزایش و کاهش می یابد و در شرایط حضور مجموعه ای از گرافیتهای کروی، فشرده و ورقه ای، نتایج عکس حالت فوق می باشد. میزان منیزیم، گوگرد و آلومینیم موجود در نمونه ها، با پیشروی میرایی تا زمانیکه اغلب گرافیتها بصورت کروی می باشند، کاهش می یابد ولی بعد از این زمان، میزان منیزیم و آلومینیم تغییر عمده ای نمی کند، در حالیکه میزان گوگرد موجود در سیستم اندکی افزایش پیدا می کند.

**واژه های کلیدی:** منحنی سرد شدن، دمای خاتمه استحاله یوتکتیک، مدت زمان استحاله یوتکتیک، میرایی، چدن نشکن

### مقدمه

تحلیل آنها می توان تا حدودی مراحل پیشروی پدیده میرایی را ردیابی نمود [۱۳-۱۷]. از هر منحنی سرد شدن می توان اطلاعات مختلفی را استخراج نمود، بعنوان مثال در شکل (۱) دماهای جوانه زنی<sup>۱</sup>، تحت تبرید<sup>۲</sup>، ریکالسنس<sup>۳</sup> و خاتمه استحاله یوتکتیک<sup>۴</sup> قابل ملاحظه می باشد [۱۸].



شکل ۱: نمونه ای از منحنیهای سرد شدن چدن نشکن، همراه با نقاط مشخصه آن [۱۸].

چدن نشکن آلیاژی با گرافیتهای کروی در زمینه آهنی است که دارای تلفیقی از قابلیت ریخته گری مطلوب چدنهای خاکستری و داکتیلیتی مناسب فولادها می باشد [۱]. یکی از مهمترین مسائل صنعتی در رابطه با تولید قطعاتی از جنس چدن نشکن، بی اثر شدن فرایند کروی کنندگی و جوانه زایی در اثر نگهداری مذاب می باشد، که این پدیده تحت نام میرایی شناخته می شود [۲]. با افزایش زمان نگهداری مذاب چدن نشکن، در اثر پدیده میرایی، ابتدا گرافیتهای کروی به فشرده و سپس به ورقه ای شکل تبدیل می گردند [۳، ۴].

بر اساس تئوریهای مختلف جوانه زنی گرافیت در چدن نشکن، رهیافتهای مختلفی برای تبیین مسئله میرایی در این آلیاژ مطرح شده است [۵-۱۲]. طبق نظر جمعی از محققین مهمترین نکته در چگونگی پیشروی پدیده میرایی، میزان حضور عناصری نظیر منیزیم و گوگرد می باشد [۱۲]. با بهره گیری از منحنیهای سرد شدن و

جدول ۱: ترکیب شیمیایی چدن مورد استفاده به عنوان شارژ اولیه.

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Sn	Fe
wt %	4-4.2	1-1.2	<0.4	<0.01	<0.01	<0.08	0.08	<0.04	Bal.

جدول ۲: ترکیب شیمیایی مواد کروی کننده مورد استفاده.

wt%	Si	Mg	REM	Ca	Al	Ba	Mn	Fe
BJ2	44-48	5-6	0.35-0.65	0.8-1.2	1<	-	-	Bal.
BJ3	44-48	5-6	0.7-1.0	1.4-1.8	1<	-	-	Bal.
BJ4	44-48	5-5.6	1.8-2.3	1.9-2.4	1<	-	-	Bal.
RMG	44-49	2-11	1.75-2.5	0.1-5.0	1.5<	0-2	0.6	Bal.

جدول ۳: ترکیب شیمیایی مواد جوانه زا مورد استفاده.

wt%	Si	Ba	Ca	Al	Ce	Sr	Fe
BI	72-78	2-3	1-2	1.5<	-	-	Bal.
RS	70-78	-	0.5-2.5	0.5-2.0	0.2-1.5	-	Bal.
ZI	70-76	-	0.75-1.25	0.75-1.25	0.75-1.25	-	Bal.
SS	46-50	-	0.1<	0.5<	-	0.6-1.0	Bal.
MOR	62-63	2.75-3.25	1<	-	-	-	Bal.

۱۳۲۰°C عملیات کروی کردن به روش ساندویچی درون پاتیل انجام پذیرفت و بلافاصله بعد از اتمام واکنش فروسیلیکومنیزیم با مذاب، مواد جوانه زا افزوده شد. میزان افزودن مواد کروی کننده و جوانه زا به ترتیب ۲/۵ و ۰/۴ درصد وزنی بود.

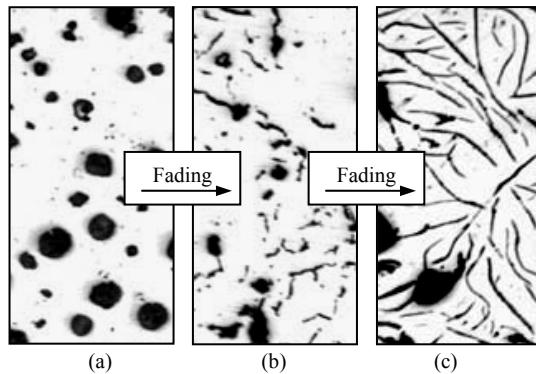
برای بررسی تاثیر زمان نگهداری مذاب بر روی پدیده میرایی، بعد از اینکه فرایند کروی کنندگی و جوانه زایی برای هر یک از تلفیقه‌های ۲۰ گانه از مواد کروی کننده و جوانه زا، اتمام یافت و اولین نمونه‌ها برای زمان صفر ریخته گری شدند، مذاب به درون کوره برگردانده و در دمای ۱۳۲۰°C نگهداری شد و سپس به فواصل زمانی پنج دقیقه ای از مذاب نمونه برداری شد. لازم به ذکر است که در تمامی موارد، مذاب تحت اتمسفر نیتروژن با خلوص ۹۹/۹۹ درصد و فشار مثبت ۱/۲ اتمسفر نگهداری شد. برای ترسیم منحنیهای سرد شدن از فنجانکهای با قطر داخلی، ارتفاع و ضخامت جداره به ترتیب ۷۵، ۹۰ و ۲۰ میلیمتر از جنس ماسه سیلیسی بعنوان قالب، ترموکوپل نوع K با غلاف کوارتزی و مبدل آنالوگ به دیجیتال هشت

هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی چگونگی تغییرات دمای استحاله یوتکتیک و طول مدت انجام این استحاله و همچنین رابطه آن با ترکیب شیمیایی بوده است.

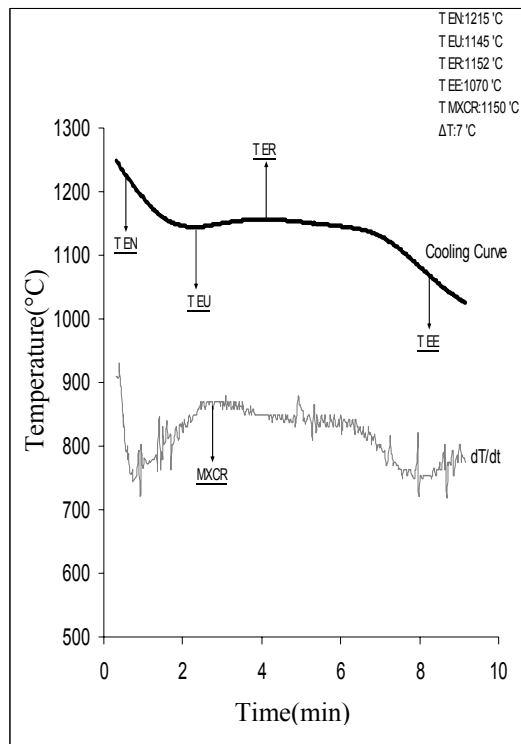
### روش تحقیق

ماده مورد استفاده برای تهیه مذاب اولیه، چدن سورل با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول (۱) بود. مواد کروی کننده<sup>۵</sup> استفاده شده شامل آلیاژهای مختلف فروسیلیکومنیزیم تحت نامهای اختصاری BJ2، BJ3، BJ4 و RMG و همچنین مواد جوانه زای<sup>۶</sup> استفاده شده عبارت بودند از آلیاژهای گوناگون فروسیلیسیم با نامهای اختصاری BI، SS، RS، ZI و MOR. ترکیب شیمیایی این مواد که محصولات Elkem بودند، در جدولهای (۲ و ۳) نشان داده شده است. عملیات ذوب مواد اولیه توسط کوره القایی با فرکانس متوسط در بوته گرافیتی با ظرفیت kg ۲۵ فولاد انجام شد. برای حذف تاثیر وجود احتمالی عناصر جوانه زا در شارژ اولیه ابتدا دمای ذوب تا حدود ۱۵۰۰°C بالا برده شد، پس از کاهش دمای ذوب تا

گرافیتها بصورت فشرده بوده اند.



شکل ۲: مراحل تبدیل مورفولوژی گرافیتها از کروی به فشرده و سپس ورقه ای برای مذاب کروی و جوانه زایی شده با مواد B.J3 و MOR؛ بدون اچ؛  $10\times$ : (a) قبل از نگهداری، (b) و (c) به ترتیب بعد از ۱۰ و ۲۰ دقیقه نگهداری در دمای  $1320^{\circ}\text{C}$ .



شکل ۳: منحنی سرد شدن مربوط به کروی کننده B.J3 و جوانه زای SS بعد از ۱۰ دقیقه نگهداری مذاب با بیش از ۹۰ درصد گرافیت فشرده.

از منحنیهای بدست آمده در این پژوهش دمای خاتمه استحاله یوتکتیک و همچنین مدت زمان انجام استحاله یوتکتیک استخراج گردید.

کاناله با آهنگ ثبت هشت دما در ثانیه استفاده بعمل آمد. لازم به ذکر است که در تمامی موارد نوک ترموکوپل درست در وسط محفظه قالب قرار داشت. در نهایت نمونه های بدست آمده، بعد از متالوگرافی مورد تحلیل تصویری قرار گرفتند. بر اساس اطلاعات آماری موجود در مورد فاکتور شکل انواع گرافیتها [۱۹]، متغیری تحت عنوان فاکتور برابند

شکل گرافیت<sup>۷</sup> تعریف شد، که بر اساس آن هر قدر این فاکتور به ۸۳ نزدیک تر باشد، میزان حضور گرافیتهای کروی بیشتر است و هر قدر این عدد به ۶۰ و ۴۰ نزدیک تر باشد، به ترتیب درصد گرافیتهای فشرده و ورقه ای بیشتر خواهد بود. فاکتور برآیند شکل گرافیت از طریق رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\text{OGSF} = \left[ \%SG*83 + \%CG*60 + \%FG*40 \right] / 100$$

(۱)

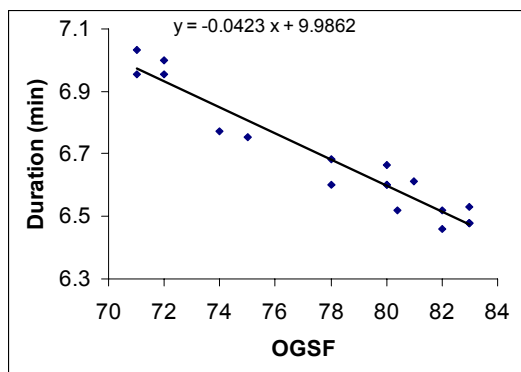
بطوریکه: %FG، %CG و %SG به ترتیب درصد گرافیتهای ورقه ای، فشرده و کروی شکل می باشد؛ بنا بر این برای تمامی موارد و شرایط مورد بررسی در آزمایشها، فاکتور برابند شکل گرافیت محاسبه گردید و اطلاعات در بازه های ۷۰-۸۳، ۵۰-۷۰ و ۴۰-۵۰ دسته بندی شد. از میان ۱۰۰ نمونه موجود که مربوط به تلفیقهای مختلف مواد کروی کننده و جوانه زا در زمانهای نگهداری مختلف بودند، ۲۰ مورد جهت انجام آزمایش اسپکترومتری نشری انتخاب گردید؛ نحوه انتخاب نمونه های مذکور به گونه ای بود که کل طول طیف تغییرات فاکتور برابند شکل گرافیت در بازه ۴۰-۸۳ پوشش داده شود.

## نتایج

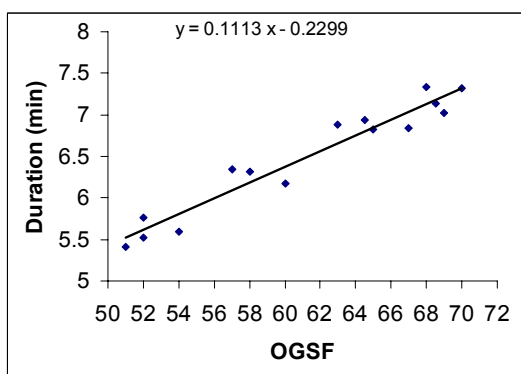
پدیده میرایی یا همان مراحل تبدیل مورفولوژی گرافیتها از کروی به فشرده و سپس ورقه ای در اثر نگهداری مذاب، برای نمونه کروی و جوانه زایی شده با مواد B.J3 و MOR بعنوان نمونه در شکل (۲) قابل ملاحظه می باشد.

در نمودار شکل (۳) نمونه ای از منحنی سرد شدن به همراه منحنی مشتق اول که مربوط به کروی کننده B.J3 و جوانه زای SS می باشد، آورده شده است. این منحنی بعد از ۱۰ دقیقه نگهداری مذاب در دمای  $1320^{\circ}\text{C}$  ترسیم شده است و در این شرایط بیش از ۹۰ درصد

است. همانطور که گفته شد با نگهداری مذاب، گرافیت‌های کروی ابتدا به فشرده و سپس به ورقه‌ای تبدیل می‌شوند و فاکتور برآیند شکل گرافیت در آنها از ۸۳ تا ۴۰ کاهش می‌یابد، لذا واضح است که کاهش فاکتور برآیند شکل گرافیت هم ارز با پیشروی پدیده میرایی می‌باشد. با مشخص بودن نقاط جوانه زنی و خاتمه استحاله یوتکتیک در منحنیهای سرد شدن، مدت زمان انجام این استحاله قابل محاسبه می‌باشد؛ بر همین اساس برای تمامی شرایط مورد آزمایش، مدت زمان انجام استحاله یوتکتیک مشخص گردید و چگونگی تغییرات آن بر حسب فاکتور برآیند شکل گرافیت در بازه‌های ۷۰-۸۳، ۵۰-۷۰ و ۴۰-۵۰ در اشکال (۷-۹) قابل ملاحظه می‌باشد.



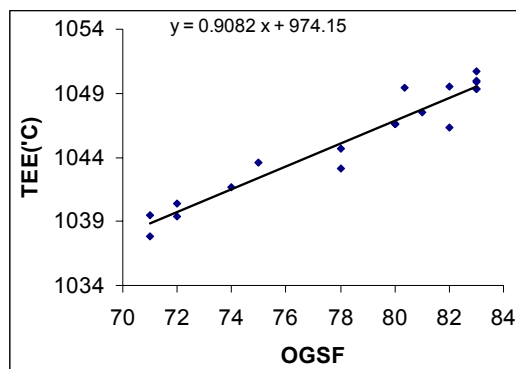
شکل ۷: تغییرات مدت زمان انجام استحاله یوتکتیک بر حسب فاکتور برآیند شکل گرافیت در بازه ۷۰-۸۳.



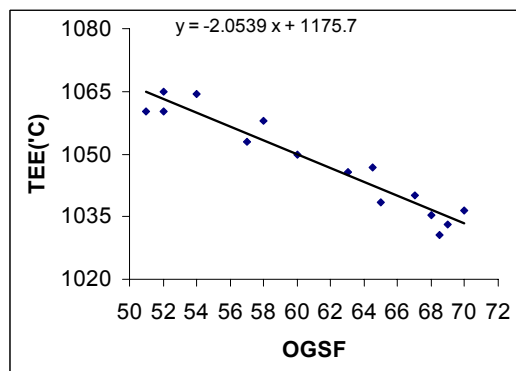
شکل ۸: تغییرات مدت زمان انجام استحاله یوتکتیک بر حسب فاکتور برآیند شکل گرافیت در بازه ۵۰-۷۰.

چگونگی تغییرات تعداد گرافیتها در بازه ۷۰-۸۳ بر حسب دمای خاتمه استحاله یوتکتیک و مدت زمان انجام این استحاله در شکلهای (۱۱ و ۱۰) مشاهده می‌گردد.

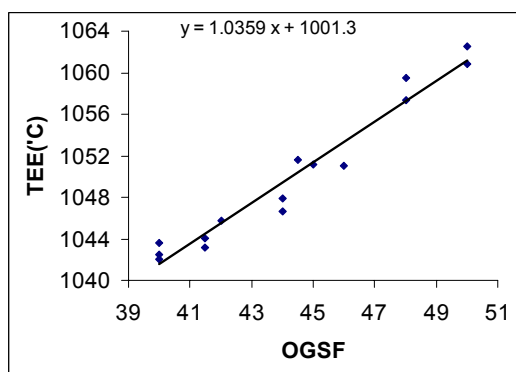
چگونگی تغییرات دمای خاتمه استحاله یوتکتیک نمونه‌ها بر حسب فاکتور برآیند شکل گرافیت در بازه‌های ۷۰-۸۳، ۵۰-۷۰ و ۴۰-۵۰ در شکلهای (۴-۶) ملاحظه می‌گردد.



شکل ۴: تغییرات دمای خاتمه استحاله یوتکتیک بر حسب فاکتور برآیند شکل گرافیت در بازه ۷۰-۸۳.



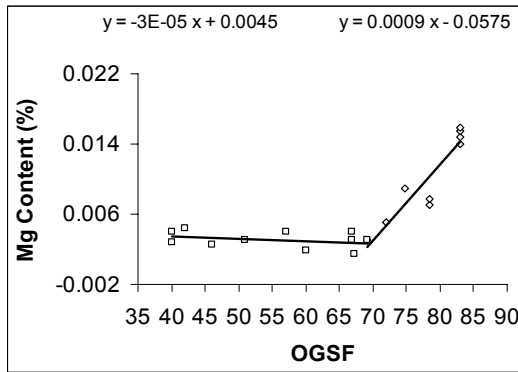
شکل ۵: تغییرات دمای خاتمه استحاله یوتکتیک بر حسب فاکتور برآیند شکل گرافیت در بازه ۵۰-۷۰.



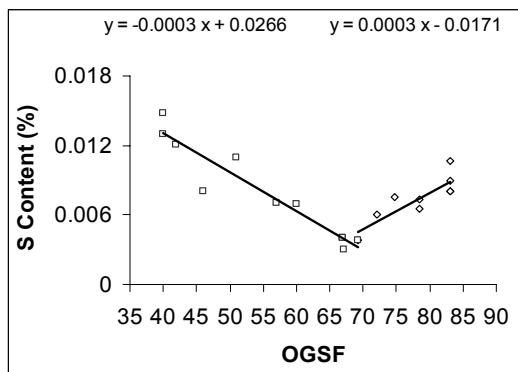
شکل ۶: تغییرات دمای خاتمه استحاله یوتکتیک بر حسب فاکتور برآیند شکل گرافیت در بازه ۴۰-۵۰.

لازم به ذکر است که علت تقسیم بندی اطلاعات در بازه‌های فوق، رفتار و روند متفاوت آنها در این بازه‌ها بوده

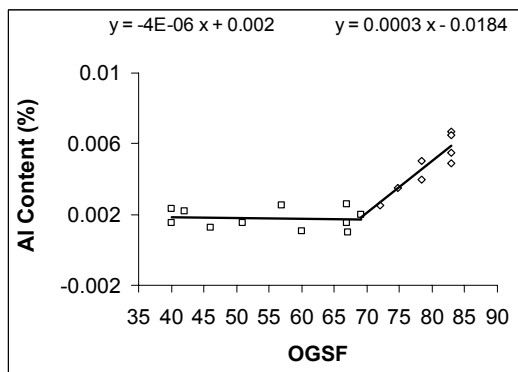
گوگرد و آلومینیم موجود در نمونه ها بر حسب فاکتور برآیند شکل گرافیت، بعنوان معیاری برای پیشروی پدیده میرایی، در شکلهای (۱۲-۱۴) ملاحظه می گردد و همچنین چگونگی تغییرات نسبت دو به دوی این عناصر نیز بر حسب فاکتور برآیند شکل گرافیت در شکلهای (۱۵-۱۷) نشان داده شده اند.



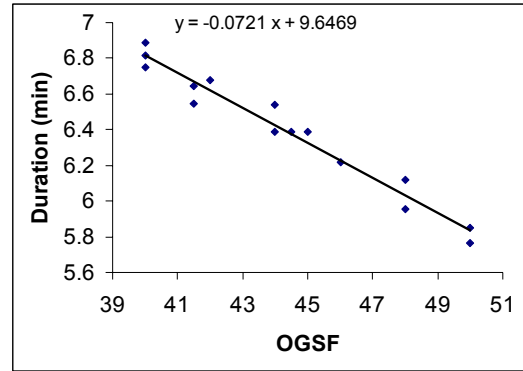
شکل ۱۲: تغییرات میزان منیزیم موجود در نمونه ها بر حسب تغییرات فاکتور برآیند شکل گرافیت.



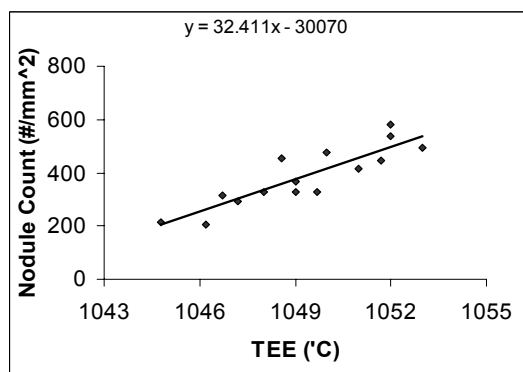
شکل ۱۳: تغییرات میزان گوگرد موجود در نمونه ها بر حسب تغییرات فاکتور برآیند شکل گرافیت.



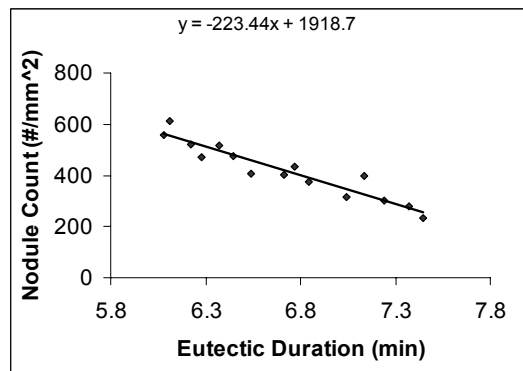
شکل ۱۴: تغییرات میزان آلومینیم موجود در نمونه ها بر حسب تغییرات فاکتور برآیند شکل گرافیت.



شکل ۹: تغییرات مدت زمان انجام استحاله یوتکتیک بر حسب فاکتور برآیند شکل گرافیت در بازه ۴۰-۵۰.



شکل ۱۰: تغییرات تعداد گرافیت‌های کروی بر حسب دمای خاتمه استحاله یوتکتیک.



شکل ۱۱: تغییرات تعداد گرافیت‌های کروی بر حسب مدت زمان انجام استحاله یوتکتیک.

لازم به ذکر است که روند این تغییرات در بازه ۴۰-۵۰ نیز مشابه حالت فوق می باشد.

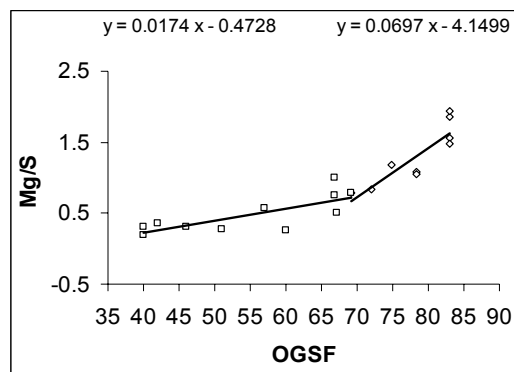
بر اساس نتایج حاصل از اسپکترومتری نشری نمونه ها، بجز عناصر منیزیم، گوگرد و آلومینیم، میزان سایر عناصر اندازه گیری شده در طول نگهداری مذاب تقریباً ثابت باقی می ماند. چگونگی تغییرات میزان منیزیم،

استحاله به ترتیب کاهش و افزایش می یابد که بر اساس شکل‌های (۱۱ و ۱۰) این امر معادل با کاهش تعداد گرافیتها می باشد. وقتی تعداد گرافیتها در واحد سطح کاهش می یابد و در نتیجه فاصله نفوذی میان آنها افزایش پیدا می کند، در پی آن انجام استحاله یوتکتیک مشکل تر شده و اتمام آن در دمای پایین تری محقق می گردد و مدت زمان انجام این استحاله نیز افزایش یافته و سینتیک آن کند می گردد.

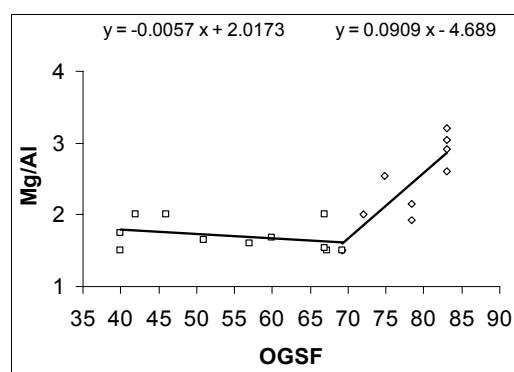
وقتی مورفولوژی غالب گرافیتها بصورت ورقه ای شکل می باشد و فاکتور برابند شکل گرافیت در بازه ۴۰-۵۰ تغییر می کند، با پیشرفت فرایند میرایی و کاهش فاکتور برابند شکل گرافیت، با روندی مشابه گرافیتهای کروی، تعداد گرافیتها در واحد سطح کاهش یافته و فاصله نفوذی میان آنها بیشتر شده و اتمام استحاله دشوارتر می گردد و لذا همانطور که در شکل‌های (۹ و ۶) ملاحظه می شود، دمای خاتمه استحاله یوتکتیک کاهش می یابد و مدت زمان انجام این استحاله افزایش پیدا می کند که این امر مبین کند شدن سینتیک استحاله یوتکتیک می باشد.

همانطور که در شکل‌های (۵ و ۸) مشاهده می شود، در صورت تغییر فاکتور برابند شکل گرافیت در بازه ۵۰-۷۰ که بیان کننده وجود تلفیقی از انواع مورفولوژیهای کروی، فشرده و ورقه ای شکل می باشد، با پیشروی فرایند میرایی و کاهش فاکتور برابند شکل گرافیت، دمای خاتمه استحاله یوتکتیک افزایش می یابد و مدت زمان انجام استحاله کاهش و لذا سینتک آن افزایش پیدا می کند. در این بازه از تغییرات فاکتور برابند شکل گرافیت، مورفولوژی گرافیتها از کروی به فشرده و سپس ورقه ای تبدیل می شود؛ نظر به اینکه در یک حجم واحد از گرافیت، نسبت سطح به حجم گرافیتها به ترتیب از کروی به فشرده و بعد ورقه ای افزایش یافته و بر همین مبنا فاصله نفوذی میان آنها کاهش می یابد و در واقع پدیده نفوذ تسهیل می گردد، لذا احتمال دارد که بتوان افزایش دمای خاتمه، کاهش طول مدت و افزایش سینتیک استحاله یوتکتیک را با کاهش فاکتور برابند شکل گرافیت، برهمین اساس توجیه نمود.

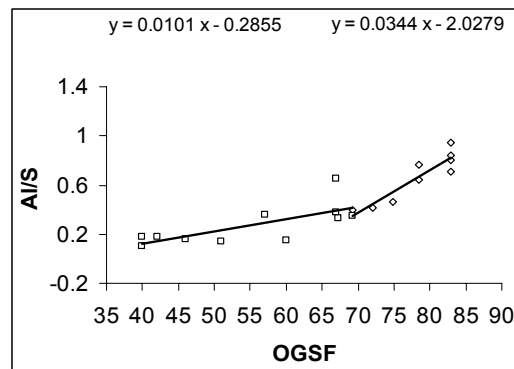
بطور خلاصه می توان گفت، زمانیکه مورفولوژی غالب گرافیتها بصورت کروی و یا ورقه ای شکل می باشد، کاهش سینتیک استحاله با پیشروی پدیده میرایی را می توان بر اساس کاهش تعداد گرافیتها توجیه نمود و



شکل ۱۵: تغییرات نسبت Mg/S در نمونه ها بر حسب تغییرات فاکتور برابند شکل گرافیت.



شکل ۱۶: تغییرات نسبت Mg/Al در نمونه ها بر حسب تغییرات فاکتور برابند شکل گرافیت.

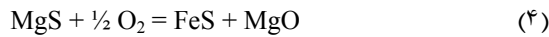
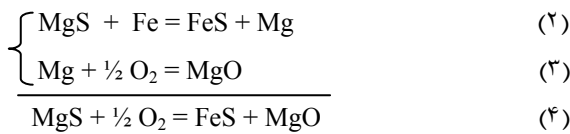


شکل ۱۷: تغییرات نسبت Al/S در نمونه ها بر حسب تغییرات فاکتور برابند شکل گرافیت.

## بحث

زمانیکه مورفولوژی غالب گرافیتها بصورت کروی می باشد و فاکتور برابند شکل گرافیت در بازه ۷۰-۸۳ تغییر می کند، همانطور که در شکل‌های (۷ و ۴) ملاحظه می گردد، با کاهش این فاکتور و پیشرفت پدیده میرایی، دمای خاتمه استحاله یوتکتیک و مدت زمان انجام این

خارجی برای ورود گوگرد به سیستم متصور نمی باشد، شاید بتوان تنها عامل وارد کننده گوگرد به مذاب را MgS در نظر گرفت. لذا بر این اساس خواهیم داشت:



بطوریکه اکسیژن می تواند از اکسیژن محلول در مذاب و یا اکسیژن موجود در اتمسفر ذوب تامین گردد و FeS به معنی گوگرد محلول در مذاب می باشد. با فرض اتفاق افتادن واکنش فوق می توان افزایش میزان گوگرد نمونه ها را توجیه نمود.

بر اساس روابط ترمودینامیکی  $\Delta G$  واکنش فوق محاسبه گردید و مقدار  $۳۲۸/۷ \times ۱۰^۶ \text{ J/mol}$  حاصل شد که موید انجام پذیر بودن واکنش فوق می باشد.

بر اساس مقایسه نتایج حاصله از منحنیهای سرد شدن و اسپکترومتری نشری می توان به این نکته رسید که روند تغییرات دمای خاتمه استحاله یوتکتیک و مدت زمان انجام این استحاله و همچنین روند تغییرات میزان منیزیم، گوگرد و آلومینیم موجود در نمونه ها، در حول و حوش فاکتور برآیند شکل گرافیت ۷۰ تغییر می کند و یا به عبارتی دیگر، زمانیکه فاکتور برآیند شکل گرافیت در مقادیری بیشتر و یا کمتر از ۷۰ می باشد، تغییر مورفولوژی فاز گرافیت توسط منحنیهای سرد شدن و اسپکترومتری نشری قابل ردیابی می باشد ولی زمانیکه فاکتور برآیند شکل گرافیت از حدود ۷۰ تا ۴۰ کاهش پیدا می کند، آهنگ تغییرات ترکیب شیمیایی دستخوش تغییرات عمده ای نمی گردد، در حالیکه فاکتور برآیند شکل گرافیت ۵۰ در اطلاعات حاصل از منحنیهای سرد شدن، بعنوان نقطه ای مرزی شناخته می شود که در دو طرف آن روند تغییرات دمای خاتمه و مدت زمان انجام استحاله یوتکتیک متفاوت می باشد؛ لذا می توان بسیار محتمل دانست که اولاً تبدیل مورفولوژی گرافیتها از کروی به فشرده در مقایسه با تبدیل فشرده به ورقه ای شکل، با تغییرات ترکیب شیمیایی بیشتری روبرو باشد و ثانیاً اینکه منحنیهای سرد شدن در مقایسه با اسپکترومتری نشری، وسیله مناسب تری برای پیش بینی مورفولوژی گرافیتها باشد.

زمانیکه مورفولوژی گرافیتها از کروی به فشرده و سپس ورقه ای در حالت تغییر است، افزایش سینتیک استحاله یوتکتیک با پیشرفت میرایی را می توان به افزایش نسبت سطح به حجم گرافیتها نسبت داد.

طبق شکلهای (۱۲-۱۴) ملاحظه می گردد میزان منیزیم، گوگرد و آلومینیم موجود در نمونه ها، با کاهش فاکتور برآیند شکل گرافیت تا مقادیری حدود ۷۰، کاهش می یابد؛ برای نمونه هایی با فاکتور برآیند شکل گرافیت کوچکتر از این مقدار، میزان منیزیم و آلومینیم موجود در نمونه ها با کاهش فاکتور برآیند شکل گرافیت تغییر چندانی نمی کند و به یک حالت پایدار می رسد در حالیکه میزان گوگرد افزایش پیدا می کند.

بر اساس شکلهای (۱۵-۱۷) مشاهده می گردد برای نمونه هایی با فاکتور برآیند شکل گرافیت بیش از حدود ۷۰، با کاهش این فاکتور، نسبتهای Mg/S، Mg/Al و Al/S کاهش می یابد و این بدین معنی می باشد که با کاهش فاکتور برآیند شکل گرافیت، میزان کاهش منیزیم از میزان کاهش آلومینیم و گوگرد نمونه ها و همچنین میزان کاهش آلومینیم از میزان کاهش گوگرد بیشتر می باشد. زمانیکه فاکتور برآیند شکل گرافیت کمتر از ۷۰ است، این روند برای نسبتهای Mg/S و Al/S حفظ می شود در حالیکه شیب این تغییرات کاهش پیدا می کند در صورتیکه نسبت Mg/Al به حالت نسبتاً پایداری می رسد. لازم به ذکر است که در این مبحث، فاکتور برآیند شکل گرافیت ۷۰ یک عدد ثابت و قطعی نمی باشد بلکه مشخص کننده نقطه ای مرزی می باشد که در دو طرف آن رفتار تغییرات میزان منیزیم، گوگرد و آلومینیم موجود در نمونه ها بر حسب فاکتور برآیند شکل گرافیت، با یکدیگر متفاوت می باشد.

تا زمانیکه فاکتور برآیند شکل گرافیت دارای مقادیری بیش از ۷۰ می باشد، با کاهش این فاکتور، میزان منیزیم، گوگرد و آلومینیم موجود در نمونه ها کاهش می یابد و می توان گفت این عناصر با ایجاد ترکیباتی نظیر MgS، MgO و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  وارد سرباره می شوند.

نکته جالب توجه افزایش میزان گوگرد با کاهش فاکتور برآیند شکل گرافیت از مقدار ۷۰ می باشد. از آنجاییکه با توجه شرایط نگهداری مذاب هیچ منبع

## نتیجه گیری

کروی به مورفولوژیهای فشرده و ورقه ای عامل تاثیر گذار نسبت سطح به حجم گرافیتها می باشد.

۴. با کاهش فاکتور برابند شکل گرافیت از ۸۳ تا حدود ۷۰ میزان منیزیم، گوگرد و آلومینیم موجود در نمونه ها کاهش می یابد و با کاهش این فاکتور از ۷۰ تا ۴۰ میزان منیزیم و آلومینیم تقریباً ثابت می ماند و میزان گوگرد کمی افزایش پیدا می کند.

۵. تبدیل مورفولوژی گرافیتها از کروی به فشرده در مقایسه با تبدیل فشرده به ورقه ای شکل، با تغییرات ترکیب شیمیایی بیشتری روبرو می باشد.

۱. زمانیکه مورفولوژی غالب فاز گرافیت بصورت کروی و یا ورقه ای شکل می باشد، با پیشرفت پدیده میرایی، دمای خاتمه و مدت زمان انجام استحاله یوتکتیک به ترتیب کاهش و افزایش می یابد و سینتیک این استحاله کند می گردد.

۲. زمانیکه تلفیقی از مورفولوژیهای کروی، فشرده و ورقه ای شکل در سیستم وجود دارد، با پیشرفت پدیده میرایی، دمای خاتمه، مدت زمان انجام و سینتیک استحاله یوتکتیک به ترتیب افزایش، کاهش و افزایش می یابد.

۳. در اطلاعات بدست آمده از منحنیهای سرد شدن، در شرایطی که مورفولوژی اغلب گرافیتها بصورت کروی و یا ورقه ای شکل بوده، عامل کنترل کننده تعداد گرافیتها بوده، در صورتیکه در ناحیه تبدیل مورفولوژی

## تشکر و قدرانی

بدین وسیله از همکاریهای صمیمانه اعضای محترم آزمایشگاه دگرگونیهای فازی دانشگاه تهران و همچنین از آقایان دکتر اسکالند و نووداستاد از شرکت Elkem سپاسگزاری می گردد.

## مراجع

- 1 - Labrecque, C. and Gange, M. (1998). "Review ductile iron: fifty years of continuous development." *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 37, PP. 343-378.
- 2 - Trudel, A. and Gange, M. (1997). "Review effect of composition and heat treatment parameters on the characteristics of austempered ductile irons." *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 36, PP. 289-298.
- 3 - Elliott, R. (1988). *Cast Iron Technology*. Butterworth's, London.
- 4 - Rickert, A. and Engler, S. (1985). "Solidification morphology of cast iron." *Physical Metallurgy of Cast Iron, Materials Research Society Symposia Proceedings*, New York, USA, PP. 165-174.
- 5 - Moore, A. (1973). "Some factors influencing inoculation and inoculant fade in flake and nodular graphite irons." *AFS Transactions*, Vol. 81, PP. 268-277.
- 6 - Lownie, H. W. (1963). "Barium inoculants resist fading." *Foundry*, Vol. 91, PP. 66-68.
- 7 - Radya, V. S. and Mikhailova, G. G. (1966). "Influence of barium alloy on the stability of the effect of inoculation." *Russian Castings Production*, Vol. 12, PP. 563-567.
- 8 - Rushworth, A. T. (1965). "The effect of holding time on various inoculants in flake and nodular graphite irons." *Modern Casting*, Vol. 47, PP. 124-133.
- 9 - Lux, B. (1969). "The Influence of barium content in ferrosilicon alloys on the fading of the inoculation effect in cast iron." *AFS Transactions*, Vol. 77, PP. 151-158.
- 10 - Janowak, J. F. and Loper, C. R. (1976). "Process effect on magnesium and nodularity fade in molten nodular Iron." *AFS Transactions*, Vol. 84, PP. 203-214.
- 11 - Dawson, J. V. (1966). "Stimulating effect of strontium on ferrosilicon and other silicon-containing inoculants." *Modern Casting*, Vol. 49, PP. 171-177.



- 12- Loper, C. R., Heine, R. W., Wang, C. C. and Janowski, L. (1976). "Fading of magnesium treatment in ductile cast iron." *AFS Transactions*, Vol. 80, PP. 203-214.
- 13 - Bradley, F. J., Bartelt, P. F., Fung, C. A. and Heine, R. W. (1990). "On the application of thermal analysis to the control of molten metal processing of ductile iron." *Physical Metallurgy of Cast Iron IV, Advanced Materials Research*, Vol. 3, PP. 485-493.
- 14 - Upadhya, K. G., Stefanescu, D. M., Lieu, K. and Yeager, D. P. (1989). "Computer-aided cooling curve analysis: principles and applications in metal casting." *AFS Transactions*, Vol. 97, PP. 61-66.
- 15 - Barlow, J. O. and Stefanescu, D. M. (1997). "Computer-aided cooling curve analysis revisited." *AFS Transactions*, Vol. 105, PP. 349-354.
- 16 - Chaudhari, M. D., Heine, R. W. and Loper, C. R. (1974). "Potential applications of cooling curves in ductile iron process control." *AFS Transactions*, Vol. 82, PP. 379-386.
- 17- Ryntz, E. F., Janowak, J. F., Hochstein, A.W. and Wargel, C. A. (1999). "Prediction of nodular iron microstructure using thermal analysis." *AFS Transactions*, Vol. 108, PP. 141-144.
- 18 - Stefanescu, D. M. (1985). "Solidification of flake, compacted/vermicular and spheroidal graphite cast irons as revealed by thermal analysis and directional solidification." *MRS Symposium Proceedings*, Elsevier Science Publishing Co., Wisconsin, USA, PP. 233-239.
- 19 - Vander Voort, G. F. (1984). *Metallography principles and practice*. McGraw-Hill, New York.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- Temperature of Eutectic Nucleation (TEN)
- 2- Temperature of Eutectic Undercooling (TEU)
- 3- Temperature of Eutectic Recalescence (TER)
- 4- Temperature of Eutectic Ending (TEE)
- 5- Nodularizer
- 6- Inoculant
- 7- Overall Graphite Shape Factor (OGSF)