به نام خدا

تاثیرکاربید سیلیسیم به عنوان جوانه زا بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی چدن داکتیل

به وسیله ی:

حسینعلی کشاورزی

پایان نامه

ارائه شده به معاونت تحصیلات تکمیلی به عنوان بخشی
از فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته ی:

مهندسی مواد-شناسایی، انتخاب و روش ساخت مواد فلزی

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی و تصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: **عالی**

امضاء اعضاء کمیته پایان نامه:

دکتر کمال جانقربان، استاد بخش مهندسی مواد (رئیس کمیته)....................................

دکتر ابوالقاسم دهقان، استادیار بخش مهندسی مواد (رئیس کمیته)....................................

دکتر عباسعلی نظربلند استادیار بخش مهندسی مواد..

دکتر محمدحسین پایدار استادیار بخش مهندسی مواد...

۸۰/۱۰/۹

دی ماه ۱۳۸۰

تقدیم به:

گل نرگس(عج)

و لاله های سرخ دانشکده مهندسی

٤٠٢٦٨

سپاسگزاری

اکنون که به یاری و توفیق خداوند این پژوهش به پایان رسید، لازم می دانم از اساتید عزیزم جناب آقای پروفسور کمال جانقربان و جناب آقای دکتر ابوالقاسم دهقان به خاطر کمکهای علمی و عملی ارزنده ایشان سپاسگزاری نمایم.

از راهنماییهای صمیمانه آقایان دکتر عباسعلی نظربلند و دکتر محمدحسین پایدار نیز تشکر می کنم. از جناب آقای مهندس گل پرور، کارشناس ارشد هنرستان فنی و حرفه ای سروش اصفهان، به خاطر مساعدتهای بی دریغ ایشان در انجام پاره ای از آزمایشات قدردانی می نمایم.

از مسئولین محترم آزمایشگاههای بخش مهندسی مواد، خانمها مهندس پایدار، مهندس محزون، قهرمانی و هم چنین آقایان منتصری، کتابچی وسلطانی تشکر می کنم.

در پایان از خانواده عزیزم به خصوص پدر ومادر مهربانم و از تمامی دوستانی که مرا در حین انجام این تحقیق یاری نمودند، قدردانی می نمایم.

چکیده

تأثیر کاربید سیلیسیم به عنوان جوانه زا بر روی ریز ساختار و خواص مکانیکی چدن داکتیل

به وسیله ی:

حسینعلی کشاورزی

در این تحقیق تأثیر کاربید سیلیسیم به عنوان جوانه زا بر روی ریز ساختار(میزان فریت و پرلیت، میزان کروی شدن و تعداد کره های گرافیت) و خواص مکانیکی چدن داکتیل بررسی گردید. برای تعیین جایگاه و مقایسه این ماده با مواد جوانه زای مورد استفاده در صنعت، آزمایشهای مشابهی با استفاده از فرو سیلیسیم نیز صورت گرفت.

پس از تهیه ذوب در کوره بوته ای، روش تک مرحله ای (one step treatment) جهت کروی کردن گرافیتها و انجام عملیات تلقیح مورد استفاده قرار گرفت.

از مطالعه و آزمایشاتی که بر اساس دو پارامتر حلالیت کامل و عدم میرایی در دما و زمان عملیات تلقیح تک مرحله ای صورت گرفت کاربید سیلیسیم با دانه بندی حدود ۲ میلیمتر استفاده گردید و سپس مقادیر ۰/۱ تا ۰/۵ درصد وزنی مذاب جهت تعیین مقدار بهینه آن به مذاب افزوده شد. فرو سیلیسیم ۷۵٪ نیز با دانه بندی ۵-۳ میلیمتر و به مقدار۰/۵٪ که در منابع جهت بدست آوردن بالاترین خواص مکانیکی توصیه می شود، مورد استفاده قرار گرفت.

آزمایشات به این صورت انجام گرفت که ابتدا مدل Y-block با ابعاد استاندارد جهت تهیه نمونه های آزمایش و مدل پله ای برای بررسی اثر سرعت سرد شدن بر روی عملکرد جوانه زای کاربید سیلیسیم ساخته شد.

نتایج حاصل نشان می دهد که افزودن کاربید سیلیسیم به میزان ۰/۳ درصد وزنی مذاب منجر به بدست آوردن بهترین ساختارو بیشترین چقرمگی و انعطاف پذیری همراه با استحکام تسلیم و کششی مناسبتری در مقایسه با فرو سیلیسیم ۷۵٪ می شود.

بررسی ساختار وسختی نمونه های پله ای نیز نشان می دهد که با کاهش سرعت سرد شدن نقش مواد جوانه زا در ایجاد کره های گرافیت با ساختار و تعداد مناسب به دلیل افزایش زمان انجماد ضعیف تر می شود.

فهرست مطالب

فهرست جداول

فهرست اشکال

فصل اول
مقدمه

چدنها ترکیبی سه تایی از آهن، کربن و سیلیسم هستند که در آنها عناصری نظیر منگنز، فسفر و گوگرد نیز وجود دارد علاوه بر آن فلزاتی مانند کرم، نیکل، مولیبدن، مس، منیزیم، سریم، لانتانیم و وانادیم در مقادیر کم یا زیاد هم می توانند در چدنها موجود باشند.

چدنها دسته بزرگی از آلیاژهای گروه فلزات آهنی را تشکیل می دهند. این دسته از آلیاژها دارای قابلیت ریخته گری عالی بوده و به سهولت ذوب می شوند و در حالت مذاب از سیالیت بالائی برخوردارند و به سبب خصوصیات خوب و در بعضی از موارد مشخصات منحصر به فرد، برای تولید انواع مختلف قطعات و محصولات مورد استفاده قرار می گیرند.

از نظر میزان مصرف این خانواده از آلیاژهای آهنی بعد از فولادهای ساده کارپذیر که در ساخت ورق، نبشی و... مصرف دارند مهمترین گروه از فلزات و آلیاژهای ریختگی را شامل می شوند.

تقسیم بندی چدنها بر اساس نوع ساختار میکروسکوپی آنها صورت می پذیرد. در حقیقت شکل کربن مبنای تقسیم بندی چدنها قرار گرفته است. بر این اساس پنج نوع چدن وجود دارد که عبارتند از:

چدن سفید، چدن مالبیل(چدن چکش خوار)، چدن خاکستری، چدن با گرافیت فشرده، چدن با گرافیت کروی(چدن نشکن)

خواص گروههای مختلف را می توان توسط افزودن عناصر آلیاژی و یا عملیات حرارتی بدون تغییر در طبقه بندی آنها بهسازی نمود. چدنهایی که بیشتر از ۳ درصد عناصر آلیاژی دارند تحت عنوان چدنهای مخصوص نظیرچدن سفید آلیاژی، چدن خاکستری آلیاژی یا چدن با

گرافیت کروی آلیاژی نام برده می شوند. اما چدنهائی که دارای مقادیر بسیار بالائی از عناصر آلیاژی هستند در خانواده جداگانه ای از چدنها قرار می گیرند.

همانطورکه گفته شد یکی از انواع چدن های ریختگی چدن داکتیل است که در دهۀ پنجاه میلادی کشف گردید. این نوع چدن را چدن با گرافیت کروی یا چدن نادولار(Nodular) یا چدن S.G می نامند.

تولید چدن با گرافیت کروی درجهان دارای سرعت رشد بسیار زیادی بوده و در میان فلزات ریختگی بعد از چدن خاکستری بیشترین مقدار تولید(حدود ۱۰ میلیون تن در سال) را به خود اختصاص می دهد. متداولترین روش تولید این نوع چدنها بر مبنای افزودن منیزیم خالص یا آلیاژهای حاوی منیزیم در پاتیل محتوی مذاب و یا ریختن آلیاژ منیزیم دار در ته پاتیل و بارریزی بر روی آن است. از آنجا که گرافیت در چدن داکتیل به شکل کروی ظاهر می شود آمیخته ای غیر عادی از خواص مختلف در این چدن بوجود می آید. نوع بخصوص انجماد که باعث پدید آمدن گرافیت کروی می شود با اضافه کردن مقدار بسیار کم ولی معین از عنصر منیزیم به چدن مذاب حاصل می شود. مذاب چدنی که مورد استفاده قرار می گیرد دارای ترکیبی مشابه چدن خاکستری است فقط میزان عناصر اضافی موجود در آن به اندازه لازم محدود شده است. متالورژی مسئله افزایش منیزیم به مذاب واقعاً پیچیده و بغرنج است زیرا منیزیم فلز بسیار فعالی است و در آن درجه حرارت که چدن به صورت مذاب است،تبخیر می شود. با توجه به موارد فوق به منظور کنترل دقیق فرآیند تولید چدن داکتیل روشهایی ابداع و توسعه یافته است.

بالا بودن میزان کربن و سیلسیم در چدن داکتیل باعث می شود که مزایای فرآیند ریخته گری و قابلیت ماشین کاری چدن خاکستری حفظ شود. اما کره های گرافیت تأثیر مختصری بر روی خواص فلزی اطراف خود دارند. چدن داکتیل مدول الاستیسیته بالائی داشته و استحکام تسلیم آن درمحدودۀ خیلی خوب(حدود ۳۰ Kg/mm^2) است و همانطورکه از نام آن برمی آید از قابلیت انعطاف خوبی(حدود ۱۸ درصد) برخوردار است. قطعات ریختگی مختلف درمحدودۀ وسیعی از نظر اندازه و طرح (قطعات بسیار ظریف و جدار نازک تا قطعاتی با

ضخامتهای خیلی زیاد) از چدن داکتیل ریخته گری می شوند[۱].یکی از مسائل مهم در متالورژی فلزات بهبود ساختار و در نتیجه خواص مکانیکی آنها است. در ارتباط با چدن داکتیل این عمل توسط تلقیح (Inoculation) صورت می پذیرد. هدف از تلقیح کنترل ساختار و خواص چدن توسط جوانه زنی ناهمگن گرافیت،کاهش تحت تبرید، افزایش تعداد کره های گرافیت و کاهش اندازه سلولهای یوتکتیک در حین انجماد می باشد[۲]. مواد جوانه زا موادی است که به مذاب چدن بدین منظور اضافه می شوند. مواد جوانه زای معمول درصنعت برپایه گرافیت یا فروسیلیسیم یا کلسیم سیلیساید می باشد. هم اکنون بیشترین مواد جوانه زای مصرفی درجهان فروسیلیسیم های حاوی مقادیر کم و کنترل شده کلسیم، آلومینیم، زیرکونیم، استرانسیم و تیتانیوم می باشد. از خواص فیزیکی و شیمیایی و قابلیتهای تئوری سیلیکون کاربايد(SiC) در مراجع استنباط می شود که در کنار فروسیلیسیم این ماده نیز بتواند به عنوان جوانه زا با خواص خوبی در خانواده چدنهای داکتیل به کار رود. هدف از این تحقیق اولاً بررسی دقیق مبانی تئوری جوانه زایی گرافیت توسط مواد جوانه زا و ثانیاً تعیین روشهای عملی استفاده از کاربیدسیلیسیم به عنوان جوانه زای اصلی مذاب و تعیین تأثیر آن روی ریز ساختار و خواص مکانیکی چدنهای داکتیل می باشد.

نتایج حاصل نشان می دهد که افزودن کاربید سیلیسیم با روش تک مرحله ای (One step treatment)، به میزان۰/۳درصد وزنی مذاب و با دانه بندی در حدود ۲ میلیمتر منجر به بدست آوردن بیشترین میزان فریت و در نتیجه چقرمگی وازدیاد طول نسبی بالا همراه با استحکام تسلیم و کششی مناسب می شود.

لازم به ذکر است که بر اساس نتایج حاصل کاربید سیلیسیم در مقایسه با فروسیلیسیم دارای عملکرد بهتری می باشد.پس از بررسی ساختار وسختی نمونه های پله ای نیز مشاهده شد که با کاهش سزعت سرد شدن مواد جوانه زا در ایجاد کره های گرافیت با ساختار وتعداد مناسب به دلیل افزایش زمان انجماد و در نتیجه میرایی آنها، تأثیر کمتری خواهند داشت.

فصل دوم
تاریخچه و تئوری

۱-۲-تاریخچه جوانه زنی در چدنهای داکتیل

در زمان جنگ جهانی اول خانواده هایی از چدن های با استحکام بالا وجود داشت که پس از آن، جنگ جهانی دوم موجب بزرگترین ابداع در زمینه متالورژی چدن در این قرن شد. ساخت چدن داکتیل توسط عملیات کروی کردن گرافیتها به وسیله آلیاژهای منیزیم برای اولین بارتوسط شرکت بین المللی نیکل(International Nickel)[۳] و عملیات کروی کردن گرافیتها به وسیله آلیاژهای سریم توسط مورو(Morrogh) و ویلیامز(Williams) در کنگره مشهور AFS در فیلادلفیا(Philadelphia)[۳] و در سال ۱۹۴۸ مطرح شد . چون منیزیم و سریم پایدار کننده های کاربید هستند و تولید کنندگان چدن داکتیل نیاز به عمل تلقیح داشتند، بنابراین تلقیح نیز مرحله دیگری در بهبود کیفیت چدن داکتیل به شمار می رفت و در این راستا فرو سیلسیم سریعاً به عنوان یک محصول جهانی برای استفاده در این چدن معرفی شد.

دهه ۱۹۴۰ زمان یافتن بهترین روش برای اضافه کردن مواد جوانه زا به مذاب چدن خاکستری بود و این مطلب خیلی سریع کشف شد که مؤثرترین روش، اضافه کردن مواد جوانه زا هنگام جاری شدن مذاب به داخل پاتیل می باشد و بدین منظور دستگاههای ساده ای نیز ساخته شد.پیشرفت های دهه ۱۹۵۰ بر خلاف دهه ۱۹۴۰ آنچنان قابل توجه نبود هر چند اصلاحات بیشتری برای تئوری های تلقیح پیشنهاد شد که به عنوان مثال می توان از کارهای هوروم(Hurum)[۳] در سال ۱۹۵۲ نام برد . مهمترین پیشنهاد برای جوانه زاهای جدید استفاده از باریم در آلیاژهای پایه Si توسط کسلر(Kessler) در سال ۱۹۵۶ بود[۳].

در دهه ۱۹۶۰،بیتلز(Beatles)[۳] با مورد توجه قرار دادن فاز ثانویه در جوانه زاهای مرکب موجب تحول عظیمی در امر تلقیح شد . جوانه زاهای تجاری محتوی باریم توسط شرکت وانادیم(Vanadium) و بارانو(Baranov)[۳] توسعه یافت و فرو سیلیسیم های محتوی استرانسیم توسط شرکتهای BCTRA وآنیون کاربراید(Union Carbide) بعد از کار داوسون(Dawson)، کلارک(Clark) و کلان(Mc.Cluhan) تهیه شد[۳].

هم چنین جوانه زاهای سدیم دار پیشنهاد و توسط شرکت وانادیم(V anadium) ساخته شد، جوانه زاهای مخلوط (Mixed) که دارای کنترل و تاثیر خوبی روی گرافیت بودند توسط شرکت فوسکو(Foseco) ارائه شدند[۳].

مسئله میرایی مواد تلقیحی یعنی از بین رفتن خاصیت جوانه زایی مواد تلقیح شده در اثر گذشت زمان نیز بیشتر مورد بررسی قرار گرفته و تأیید شده بود فلزاتی که کمتر از ۱۰ دقیقه بعد از تلقیح ریخته شوند دچار مشکل میرایی مواد جوانه زا نمی شوند . به عنوان مثال بزرگترین مزیتی که برای آلیاژهای باریم دار ادعا می شد مقاومت عالی نسبت به میرایی بود .

در اواسط دهه ۱۹۶۰ مسئله میرایی به روشهای مختلفی مهار شد و تلقیح فلزات مستقیما در داخل قالب صورت گرفت. در این حالت مشکلی در رابطه با میرایی وجود نداشت . بررسی های دل(Dell)، کریست(Crist)، تراگر(Trager)، هال(Hall) و باکروس(Bakkerus)[۳] اثبات کرد که می توان مواد جوانه زا را به شکلهای مختلفی مانند پودر، کلوخه، قرص (گلوله) و یا ورقه ای به مذاب اضافه نمود .

کرسی(Karsay)[۳] روشهای متفاوتی به کار برد که از آن جمله اضافه کردن مواد جوانه زا در ناودانی پاتیل توسط لوله ای به مذاب بود. در طول دهه ۱۹۷۰ و بعد از آن ملاحظات حاشیه ای منجر به مکانیزه و اتوماتیک کردن صنعت ریخته گری و هم چنین باعث اصلاحات زیادی در روشهای تلقیح در قالب(In- mould) شده است.این امر هم اکنون موجب عملیات کامل چدن داکتیل در قالب به دنبال آزمایشات موفقیت آمیز مور(Moor)، کسلر(Kessler) و دانکز(Dunks) شده است[۳].

دو روش تلقیح اخیر که می توان از آنها نام برد یکی فرآیند CQ است که سیمی با هسته جوانه زا در پایین لوله راهگاه قرار داده می شود و دیگری تلقیح کننده در جریان B CTRA می باشد که یک دستگاه کنترل، اضافه کننده مواد جوانه زا هنگام جریان مذاب به داخل قالب است[۳].

از دهه ۱۹۷۰ تا کنون جوانه زاهای جدید دیگری ارائه نشده است اما توسعه روشهای علمی و کاربرد دستگاههای مدرن از قبیل میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning electron microscope)و آنالیز کننده های میکروپروب(Microprobe analyser) موجب فهم بیشتر جوانه زنی و فر آیند رشد در چدن و مکانیزم تلقیح شده است. این اطلاعات در اثر تحقیقات جاکوبز(Jacobs)، لوکس(Lux)، هیتاچینگ(Hitching)، بیتز(Bates)[۳] و بسیاری دیگر از محققین در راه پیشرفت و توسعه جوانه زاها و روشهای جدید برای آینده حاصل شده است[۳].

روشهای تلقیح در قالب(In-mould) و تلقیح، در جریان انتقال مذاب از کوره به پاتیل (In-stream)، قابلیت توسعه بیشتری را دارند و کشف انواع جدید چدن از جمله با گرافیت فشرده زمینه های جدیدی را برای تحقیق در زمینه تلقیح فراهم می کند. در طول این مدت صنعت چدن تغییرات بزرگی در زمینه روشهای ساخت و درک دقیق مبانی متالورژیکی آن داشته است و از لحاظ تکنولوژیکی روند فعال و رو به رشدی را طی می کند که تلقیح نیز دارای نقش اساسی در ادامه پیشرفت صنعت چدن دارا می باشد[۳].

۲-۲-کربور سیلیسیم

۱-۲-۲-معرفی

کربور سیلسیم از طریق روشهای آزمایشگاهی در حدود ۱۶۰ سال پیش تهیه شد و شاید به جرات بتوان گفت که این ماده جزء ترکیبات کمیاب ویا حتی نادر در طبیعت به شمار می رود. در سال ۱۹۰۵ شخصی به نام مویزان(Moissan)[۴] در جریان آنالیز شیمیایی یک شهاب سنگ وجود کربور سیلسیم را در آن گزارش داد اما بعد از آن تاریخ هیچگاه گزارشی مبنی بر مشاهده کربور سیلسیم به صورت مقادیر بزرگ در طبیعت ارائه نشده است.

اولین شخصی که به اهمیت SiC در مصارف برش و سایش مواد پی برد آچسون(Achson)[۴]در سال ۱۸۹۲ بود که با ابداع روش مقرون به صرفه و اقتصادی توانست گامی بزرگ در جهت ساخت این مواد با ارزش بر دارد . در این روش که با نام خود این شخص مشهور شد کربور سیلیسیم را از طریق احیاء مستقیم ماسه سیلیسی (سیلیکا) تولید می کنند. این عمل در مجاورت گرافیت و یا کربن در یک کوره الکتریکی مقاومتی انجام می گیرد که این روش هنوز نیز برای تولید این ماده به کار می رود.

مهمترین صنایعی که از این ماده استفاده می کنند عبارتند از :

۱ـ صنایع متالورژی و ریخته گری به منظور افزایش درصد عناصر سیلسیم،کربن،جوانه زایی و اکسیژن زدایی در مذاب که چیزی در حدود ۴۵ درصد از کربور سیلسیم تولید شده در جهان در جهت مصارف متالورژیکی به کار می رود.

۲ـ صنایع سایش و برش جهت ساخت انواع چرخ ها، سنگهای سایشی و برشی، تولید کاغذ سنباده، سیمهای برشی و پوشش ساینده ها که مقدار مصرف در این مورد حدود ۳۵ درصد از کربور سیلسیم تولید شده در جهان می باشد.

۳ـ صنایع تهیه مواد دیرگداز برای ساخت مواد دیرگداز عالی و المنت های کوره های مقاومتی و نیز تولید بوته های ذوب از جنس کاربید سیلیسیم که حدود ۲۰ درصد از تولید کل کربور سیلیسیم را به خود اختصاص می دهد . از دیگر مصارف این ماده به کاربردهای تولید مصالح

ساختمانی برای ایجاد سطوح غیر لغزنده ، محافظت از فرسایش معابر پر تردد مثل فرودگاهها و ترمینالهای مسافربری و همچنین استفاده در ساخت کامپوزیتها نام برد[۴].

۲-۲-۲-خواص فیزیکی کربور سیلیسیم

خواص فیزیکی کربور سیلیسیم به نوع ، درجه خلوص و روش تهیه آن بستگی دارد. نتایجی که در مورد کربورهای تجارتی و یا پلی کریستال بدست می آید نباید با نوع تک کریستال این ماده مقایسه شود. جدول(۱ـ۲) برخی از خصوصیات این ماده در شرایط کاملا خالص و فشرده را نشان می دهد.

جدول(۱-۲):خواص فیزیکی کاربید سیلیسیم[۵]

Property	Value		Reference
mol wt	40.10		
decomposition temp[a], °C			
α-form	2825 ± 40		7
β-form	2985		
sp gr, g/cm^3 at 20°C			
β-form	3.210		
6H polytype[b]	3.211 (3.208)		
commercial	3.1		
refractive index			
β-form	2.48		8
α-form	ϵ	ω	4
4H[b]	2.712	2.659	
6H	2.69	2.647	
15R	2.687	2.650	
free energy of formation, $\Delta G°$, kJ/mol[c]			9
α-form	504.1		
β-form	506.2		
heat of formation, $\Delta H^°_{298}$, kJ/mol[c]			10
α-form	−25.73 ± 0.63		
β-form	−28.03 ± 2		
thermal conductivity[d], W/(m·K)			11
commercial, high density	4.60		
80% density refractory	24.3		
emissivity			1[illegible]–16
spectral (3–5 μm)	0.8		
total (0–1600°C)	0.8		
coefficient of thermal expansion[e], per °C			16–22
25–200°C	2.97×10^{-6}		
25–600°C	4.27×10^{-6}		
700–1500°C	6.08×10^{-6}		
elasticity			
Young's modulus, GPa[f]			23–24
α-form, hot-pressed	480		
α-form, sintered	410		25
β-form, sintered	410		23–24
shear modulus, GPa[f]			
reaction-bonded	167.3		26
α-form, sintered	177		27
β-form, sintered	140–190		23
sublimed	19		28

[a] The decomposition products are Si, Si_2C, Si_2, SiC, and Si_3.
[b] H = hexagonal, R = rhombohedral.
[c] To convert J to cal, divide by 4.184.
[d] To convert W/(m·K) to cal/(s·m·°C) divide by 4.184. Figure 1 shows the relation of thermal conductivity vs temperature.
[e] Sintered α-form.
[f] To convert GPa to psi, multiply by 145,000.

نوع تجارتی کربور سیلسیم درجه خلوصی در حدود ۹۹/۵-۹۰ درصد دارد. کربور سیلیسیم با رنگ سبز روشن از خالص ترین انواع آن است و حدود ۹۹/۸ درصد کربید سیلسیم دارد و اگر درجه خلوص آن به ۹۹/۵ درصد برسد رنگ آن به سبز تیره تغییر می یابد و در ۹۹ درصد کاملا سیاه می شود. از پودر با خلوص بیشتر از ۹۸ درصد برای کاربردهای سایشی و نسوز و از انواع بسیار خالص آن در ساخت سرامیک های تقویت شده و المانهای حرارتی استفاده می شود. کربور سیلسیم که برای مصارف متالورژی استفاده می شود تقریبا دارای ۹۲ درصد کربور سیلسیم و نوعا ۴ درصد کربن می باشد و ترکیب شیمیایی آن شامل ۳۲ درصد کربن و ۶۴ درصد سیلسیم است و باقیمانده آن عمدتا $CaO, Fe_2O_3, Al_2O_3, SiO_2$ می باشد[۵].

۳-۲-۲-ساختار کریستالی کربور سیلیسیم

کربور سیلیسیم میتواند به اشکال مکعبی، شش وجهی و یا رامبو هدرال تهیه شود. هر کدام از این ساختارها در محدوده دمایی وسیعی میتوانند تشکیل شوند و پایدار بمانند . ساختار مکعبی این ماده را β وساختارهای شش وجهی و رامبو هدرال آن را α می نامند . در فرم α از این ترکیب نزدیک به هجده نوع شش وجهی و درحدود بیست و سه نوع رامبو هدرال شناخته شده است. اما ساختار مکعبی فاز β ساختمانی شبیه به الماس دارد . واحد ساختمانی تشکیل دهنده کربور سیلسیم یک تترا هدرال از اتمهای کربن و سیلسیم می باشد که بر اساس نحوه چیده شدن این تترا هدرال ها در کنار یکدیگر ساختارهای مکعبی، رامبو هدرال و یا شش وجهی می تواند ایجاد شود.

در دمای پایینβ-SiC با ساختار مکعبی و دانسیته تئوری ۳/۲۱ گرم بر سانتی متر مکعب پایدار بوده که در دمای ۲۴۰۰-۲۱۰۰ درجه سانتیگراد این ساختاربه α-S Ic شش وجهی تبدیل می شود که دارای دانسیته ای در حدود همان نوع β است و در دماهای بالاترα-SiC بدون ایجاد فاز مایع به C و Si تجزیه می گردد[۵].

۴-۲-۲-خواص شیمیایی کربور سیلیسیم

کربور سیلیسیم می تواند با بسیاری از ترکیبات در دماهای بالا واکنش شیمیایی دهد ولی آنچه در اینجا مورد نظر است خواص شیمیایی کربور سیلیسیم در مذاب آهن می باشد. کربور سیلیسیم یک احیاء کننده قوی است که از لحاظ ترمودینامیکی بین دماهای ۱۴۵۰ تا ۱۵۴۰ درجه سانتیگراد در داخل چدن مذاب به سرعت حل می شود و عناصر سیلسیم و کربن را به صورت آزاد وارد آن می کند . عناصر کربن و سیلسیم در حالت اتمی و آزاد احیاءکننده هایی شدیدا فعالی بوده و به سرعت به اکسید آهن حمله می کنند که نتیجه آن فعل و انفعال زیر است:

$$Fe_2O_3 + SiC = 2Fe + SiO_2 + CO$$

کربن و سیلیسیم موجود در کربور سیلیسیم که به مصرف احیاء اکسید آهن نمی رسند به ترکیب شیمیایی چدن اضافه می شود [۶]. همچنین هنگام افزودن این ماده به آهن مذاب یک واکنش گرمازای شدید اتفاق می افتد که باعث ایجاد یک مذاب داغ میشود که نتیجه این پدیده بالا بردن سیالیت مذاب و اکسید زدایی آن خواهد بود. کربور سیلیسیم در مذاب اولیه چدن نشکن، چدن و سر باره آن را احیاء کرده و لذا مذاب را آماده بهره وری حداکثر از مواد کروی کننده افزودنی می کند [۵]. هنگام افزودن منیزیم، اکسیژن موجود در مذاب چدن ابتدا با منیزیم وارد واکنش شده و مقدار زیادی از آن را از بین می برد و لذا اگر قبل از ازدیاد منیزیم، اکسیژن موجود در مذاب توسط کربور سیلیسیم حذف و یا تقلیل داده شود راندمان و بازیابی منیزیم در تشکیل گرافیت های کروی بیشتر خواهد شد. این امر موجب صرفه جویی در مصرف عنصر گران قیمت منیزیم و سایر افزودنی ها به چدن نشکن می شود [۷] . با استفاده از کربور سیلیسیم میتوان به یکنواختی بیشتری در خواص چدن و قطعه ریختگی حاصل و همچنین یکنواختی توزیع گرافیت رسید که موجب تسهیل در ماشین کاری آن خواهد شد[۸و۹] . الگوی انجماد قطعات چدنی با استفاده از کربور سیلیسیم نزدیک به انجماد پوسته

ای است و بنابراین یک لایه منجمد شده سخت در پوسته خارجی تشکیل می شود و وقتی که در داخل قطعات، انجماد یوتکتیکی زیر انجام شود این لایه مانع تورم ناشی از انبساط می گردد:

فاز گرافیت + فاز آلفا ← مذاب

انجماد قطعات چدنی با استفاده از فرو سیلیس نزدیک به انجماد خمیری است لذا لایه خارجی ضعیف بوده و نمی تواند تحمل انبساط ناشی از انجماد یوتکتیکی را بکند و لذا موجب تورم غیر قابل قبول قطعه می گردد . دانسیته قطعات چدنی با استفاده از فرو سیلیس کمتر از قطعات با استفاده از کربور سیلیسیم می باشد . میزان انقباضات میکروسکوپی در قطعات جوانه زایی شده با فرو سیلیسیم، زیاد و تیغه های گرافیت در آنها درشت تر می باشد.

بنابراین اگر کربور سیلیسیم به مذاب چدن اضافه شود تورم قالب کاهش یافته و قطعات متراکم تری تولید می شود و از آنجا که انقباض در منطقه گرم متمرکز خواهد شد تغذیه گذاری ساده تر و راندمان تغذیه ها افزایش خواهد یافت.

در مورد جوانه زایی گرافیت درچدن ها باید دانست که هرچه میرایی ماده حاوی سیلیسیم طولانی تر باشد آن ماده در جوانه زایی و تلقیح موفق تر خواهد بود لذا با توجه به اینکه درجه حرارت تجزیه کربور سیلیسیم نسبت به عناصر اولیه آن به مراتب بالا بوده(حدود ۲۸۳۰ درجه سانتی گراد) و مقاومت بالایی نیز به اکسیداسیون دارد پس برای افزودن مقدار جوانه ها و ریز شدن دانه های گرافیت و توزیع بهتر این فاز در زمینه چدن ها و در نتیجه افزایش خواص مکانیکی چدن ها عملکرد بسیار خوبی داشته باشد [۶].

۳-۲- تلقیح (Inoculation)

۱-۳-۲- تعریف

منظور از تلقیح اضافه کردن موادی به مذاب جهت جوانه زنی یا ایجاد مناطق مناسب برای جوانه زنی گرافیت می باشد. وجود این مراکز باعث می شود که گرافیت در حین انجماد مذاب به راحتی در این محل ها رسوب کند .بدون یک جوانه زنی مناسب احتمال بوجود آمدن فاز کاربید در قطعات ریختگی افزایش می یابد[۱۰].

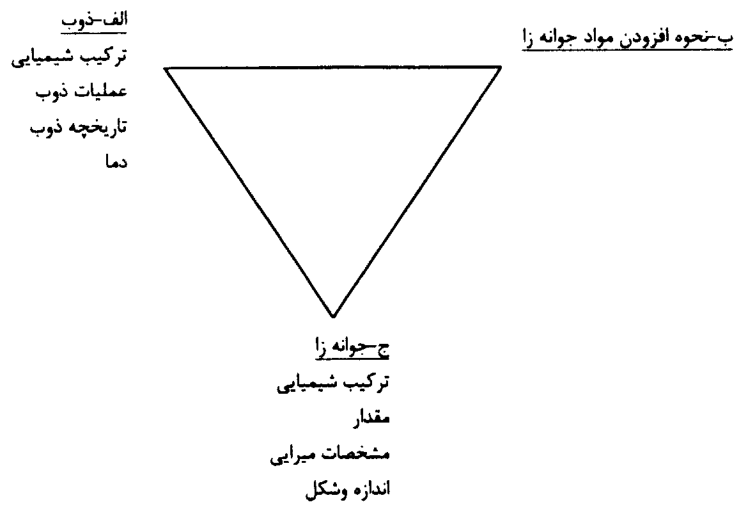
حضور مواد جوانه زا در مذاب منجر به جوانه زنی و رشد گرافیت بدون نیاز به تحت تبرید زیاد زیر دمای ذوب می شود. این مسئله به این علت رخ می دهد که فلزات جوانه زایی شده در دمایی بالاتر از حالت عدم استفاده از مواد جوانه زا منجمد می شوند. بنابراین انجماد کامل قبل از رسیدن به دمای جوانه زنی کاربید کامل می شود.

عدم وجود یک جوانه زنی صحیح باعث می شود که گرافیت هایی که از تجزیه کاربید به وجود می آید نا منظم بوده و دارای شکل کروی نباشد و شکلی شبیه گرافیت در چدن مالیبل داشته باشد . وجود مواد تلقیحی باعث می شود که مراکز جوانه زنی زیاد شود و شکل گرافیت ها منظم باشد.

بطور کلی مناسب بودن درجه جوانه زنی در چدن داکتیل باعث می شود که تعداد گرافیت ها زیادتر، اندازه کوچکتر و از نظر شکل یکنواخت و همگی کروی باشند. تعداد زیادتر کره های گرافیت موجب کاهش فاصله نفوذ کربن و در نتیجه کاهش احتمال تشکیل کاربید می شود. اگر بطور دقیق یک نمونه چدن نشکن می خواهیم باید مواد تلقیحی را در درجه اول اهمیت قرار دهیم به بیان دیگر مواد تلقیحی کلید کنترل ساختمان در چدن داکتیل می باشد . اگر چنین کنترلی بر روی ساختار بدست آید یک قطعه با خواص مکانیکی مناسب حاصل می شود. این خواص شامل حد تسلیم،استحکام کششی،چکش خواری و خواص ضربه می باشد . این بهبودی در مقاطع نازک (زیر ۰/۵ اینچ) بیشتر احساس می شود[۱۱].

۲-۳-۲- متغیرهای مؤثر بر عملکرد عملیات تلقیح:

باید توجه داشت که عملکرد عملیات تلقیح فقط به نــوع جوانــه زای مــورد مصــرف بســتگی ندارد بلکه به همان اندازه نیز تابع ترکیب شیمیایی، کیفیت مذاب چدن و روش تلقیح نــیز مــی باشد. شکل(۱-۲) به طور شماتیک این مسئله را نشان می دهد.



شکل(۱-۲): متغیر های مؤثر بر عملیات تلقیح[۱۲]

به طور کلی سازگاری مواد شارژ شده، روش ذوب، عملیات متالورژیکی، دما و کنترل فرآینـد بسیار مهم است.بطوریکه می توان با تغییر یکی از این فاکتورها وثابت نگه داشتن بقیه، تأثیر آن متغیر را روی عملیات تلقیح بررسی کرد. برای این کار در نظـر گرفتـن مـواد و روشـهای ثـابت ریخته گری برای بدست آوردن نتایج یکسان الزامی است.

۱-۲-۳-۲- کیفیت و مشخصات ذوب

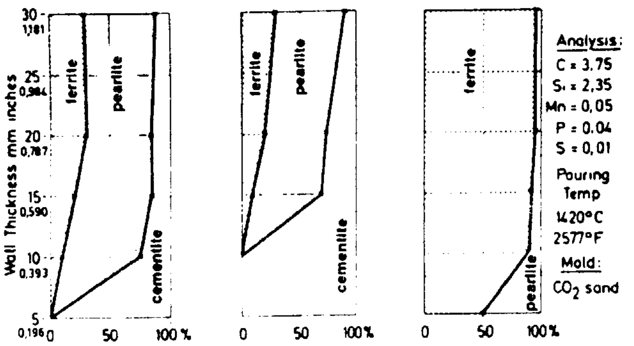
فاکتورهای زیادی روی عملکرد یک ذوب معین نسبت بـه عملیـات تلقیـح تـأثیرمی گـذارد. عموماً ترکیب شیمیایی حاصل از نوع و درصد مواد جدید بکار رفته درشارژ دارای اهمیت زیـادی است. اما عملیات ذوب(نوع کوره) و تاریخچه ذوب (به عنوان مثال مقدار فـوق گـداز و سـرعت سرد کردن بعد از ریختن مذاب) هم بسیار مهم است.

یکی از اهداف مهم عملیات تلقیح جبران تـأثیرات زیـان آور تغیـیر ترکیـب شـیمیایی روی ساختار و خواص چدن های داکتیل می باشد. عملیات تلقیح بسیار سودمند است چون قادر بـه ایجاد قطعات یکنواخت با ساختار و خواص مطلوب است. به عنوان مثال به خاطر بازیـابی کـم و غیر منتظرهٔ منیزیم و هم چنین میرائی کره های اولیه، قطعـه ریختگـی ممکـن اسـت مناسـب نباشد. اما با یک عملیات تلقیح مؤثر می توان بسیاری از این اشکالات را رفع نمود[۱۲].

۲-۲-۳-۲-ترکیب شیمیایی مواد جوانه زا

همانطور که قبلاً گفته شد طبق نظر بسیاری از محققیـن ترکیبـات پایـه سیلیسـیم خـالص تأثیری در جوانه زایی نداشته و تأثیر آنها بخاطر عناصری مثل Ba , Ni , Mn , Sr , Al , Ca و می باشد. لذا ضروری است به منظوراجتناب از تأثیرات مضر این عنـاصر مقـدار آنـها را کنـترل شود. باید متذکر شد که این عناصر قابلیت ترکیب بالایی با اکسـیژن داشـته و در نتیجـه تـأثیر جوانه زنی خود را بعد از اکسید شدن از دست می دهند[۱۲].

شکل(۲-۲) تأثیر تلقیح روی ساختار ریختگی قطعات چدن داکتیل را نشان می دهد. بعد از تلقیح در پای لوله راهگاه مذاب در قالب ماسه ای با اشکال یکسان ودر دمـای مسـاوی ریختـه شده است که می توان به اختلاف عملکرد ســه نـوع جوانـه زای تجـاری بـا ترکیـب شـیمیایی متفاوت پی برد.



شکل(۲-۲): تأثیر سه نوع جوانه زا بر روی ریز ساختار چدن داکتیل[۱۲]

۳-۲-۳-۲- مقدار جوانه زا

برای رسیدن به بازدهی ماکزیمم، مقدار جوانه زا بایستی در حد بهینه انتخاب شـود. مقـادیر کمتر یا بیشتر دارای تأثیر کمی می باشند. بسته به نوع جوانه زای به کـار رفتـه و روش اضافـه کردن، مقادیر پیشنهادی بین ۰/۰۴ تا ۰/۸ درصد می تواند متغیر باشد. البته باید توجـه داشـت که ترکیب شیمیایی اولیه مذاب باید طوری تنظیم شود که بعد از اضافه کـردن مـواد جوانـه زا ترکیب مورد نظر بدست آید[۱۲].

۴-۲-۳-۲-میرایی(Fading)

درهنگام تلقیح، و یا بلافاصله بعد از آن، چدن در حالت فوق تلقیح است امـا در اثـر گذشـت زمان مواد جوانه زای اضافه شده، خاصیت خود را از دست داده و یا به اصطلاح مـیرا مـی شـود. مشخصات میرایی جوانه زا، فاکتور مهمی در خاصیت تلقیح آن است[۱۲].

۵-۲-۳-۲- اندازه جوانه زا

جوانه زاهای تجاری مورد مصرف معمولاً بصورت دانه های ریـز بـه منظـور انحـلال سـریع و یکنواخت تهیه می شود. بطور کلی اندازه مـواد جوانـه زا در زمـان انحـلال و مـیرائی آن تـأثیر مستقیم دارد و برای روشهای مختلف تلقیح یکسان نمی باشد[۱۲].

۶-۲-۳-۲-روش تلقیح

تا کنون روشهایی که برای تلقیح به کار می روند به شرح زیر است:

- اضافه کردن مواد جوانه زا بصورت دانه های ریـز و بعـد از عملیـات کـامل منـیزیم در هنگـام ریختن مذاب به داخل قالب.
- انجام عملیات کروی کردن گرافیتها با ۲:۳ مذاب و سپس اضافه کردن مواد جوانه زا به همـراه ۱/۳ باقیماندهٔ مذاب به داخل پاتیل.
- تلقیح دو یا سه مرحله ای توسط اضافه کردن مقادیری از جوانه زا در هر بار.

- ریختن مواد جوانه زا روی مذاب پس ازسرباره گیری یا روشStiring-in .

- ترکیب عملیات تلقیح و عملیات Mg به روشهای مختلف.

- تلقیح پاتیلی لحظه ای که میله های جامد از مواد جوانه زا در قسمت مقابل لوچه پـاتیل قـرار گرفته و توسط بخار، مذاب شده و وارد پاتیل می شود.

- قرار دادن دانه های ریز و یا قرصهای مواد جوانه زا در سیستم راهگاهی قالب.

- غوطه ور سازی جوانه زا در مذاب به کمک یک محفظه فرو برنده.

- تزریق جوانه زا به داخل پاتیل همراه با یک گاز بی اثر.

- تزریق مداوم جوانه زا به داخل جریان مذاب در حین تخلیه کوره به پاتیل.

- افزودن جوانه زا در پاتیل و ریختن مذاب بر روی آن.

- پاشیدن پودرجوانه زا به دیواره های راهگاه بار ریز.

بدیهی است تمام روشهای فوق الذکـر در حـالت هـای معیـن و خـاصی بـه کـار مـی رود و تشخیص استفاده هر کدام از این تکنیکها وابستگی به مواردی از قبیل نوع مواد جوانه زا، اندازه آن و ... دارد البته بعضی از این روشها دارای کاربردهای محدودتری هستند[۱۲].

۴-۲: جوانه زنی همگن و نا همگن

تشکیل جوانه را می توان تشکیل یک فازجدید در یک محل مشخص که از محیط اطرافــش جدا شده است، تعریف کرد. در جریان انجماد جوانه های جامد در فــاز مــذاب تشــکیل شــده و آنقدر رشد می کنند تا تمام حجم مذاب به شکل جامد درآید.

۱-۴-۲: جوانه زنی همگن

منظوز از جوانه زنی همگن تشکیل یک فاز از به هم پیوستن اجــزاء فــاز دیگــر بــدون تغیــیر ترکیب و بدون تأثیر از ناخالصیها و سطوح خارجی می باشد. ذرات ناخالصی و ســطوح خــارجی در تئوری جوانه زنی ناهمگن مورد توجه قرار می گیرند.

با در نظرگرفتن تغییرات انرژی آزاد، هنگامی کــه یــک نطفــه کــروی جــامد در یــک مــذاب یکنواخت پدید می آید و هم چنین انجام محاسبات لازم، شعاع بحرانی(حداقل شعاع لازم جهت پایدار ماندن جوانهٔ ایجاد شده) و تغیــیر انــرژی آزاد بحرانــی جــهت جوانــه زنــی همگــن طبــق معادلات(۱-۲) و (۲-۲) بدست می آید.

$$r^* = \frac{۲\gamma_{lc} \cdot T_m}{L_m \cdot \Delta T} \qquad \text{معادله(۱-۲)}$$

$$\Delta G^* = \frac{۱۶\pi\, \gamma_{lc}^{۳} \cdot T_m^{۲}}{۳\,(L_m \cdot \Delta T)^{۲}} \qquad \text{معادله(۲-۲)}$$

γLC: انرژی آزاد سطحی مایع و کریستال جوانه

Tm : دمای ذوب تعادلی

Lm: گرمای نهان ذوب

ΔT تحت تبرید

به همین ترتیب شدت جوانه زنی همگن از معادله(۳-۲) محاسبه می شود.

$$I = \frac{NkT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta G_A}{kT}\right) . \exp\left[-\frac{16\pi\gamma_{lc}^{3}\, T_m^{2}}{3\,(L_m.\Delta T)^{2}kT}\right]$$ معادله(۳-۲)

N: تعداد کل اتمها

h :ثابت پلانک

K :ثابت بولتزمن

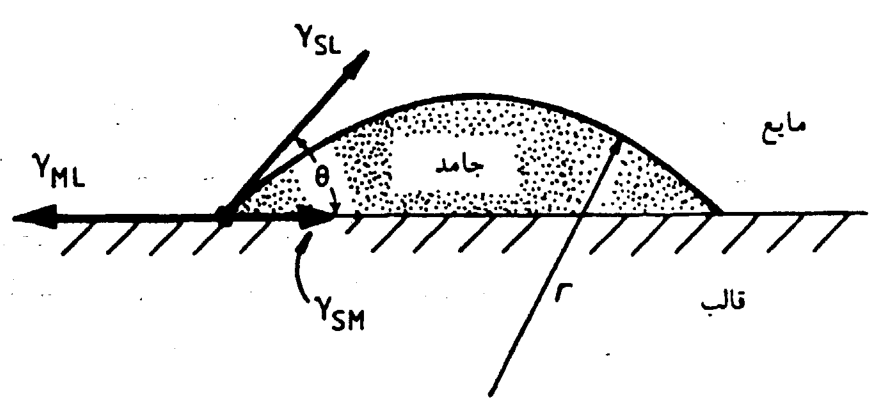
ΔGA : انرژی اکتیواسیون لازم برای نفوذ اتمها از مرز بین دو فاز

T:دمای مذاب

۲-۴-۲: جوانه زنی نا همگن

در عمل بیشتر پدیده های جوانه زنی در چدن داکتیل در مذابهایی رخ می دهد که مقدار تحت تبرید آنها تا حد زیادی کمتر از مقدار پیش بینی شده در تئوریهای جوانه زنی همگن است.

محققین به منظور مدل کردن جوانه زنی ناهمگن حالت ساده ای که در آن کلاهک کروی جامد بر روی پایه مسطح تشکیل می شود پیشنهاد کرده اند که یک عامل مهم در آن زاویه تماس θ است شکل(۳-۲).



شکل(۳-۲): کلاهک کروی ایجاد شده روی یک پایه مسطح[۱۳]

در این حالت نیز شعاع بحرانی لازم و هم چنین تغییرات انرژی آزاد بحرانی با در نظر گرفتن جنبه های ترمودینامیکی و انجام محاسبات لازم به ترتیب از معادلات(۱-۲) و (۴-۲) حاصل می شود.

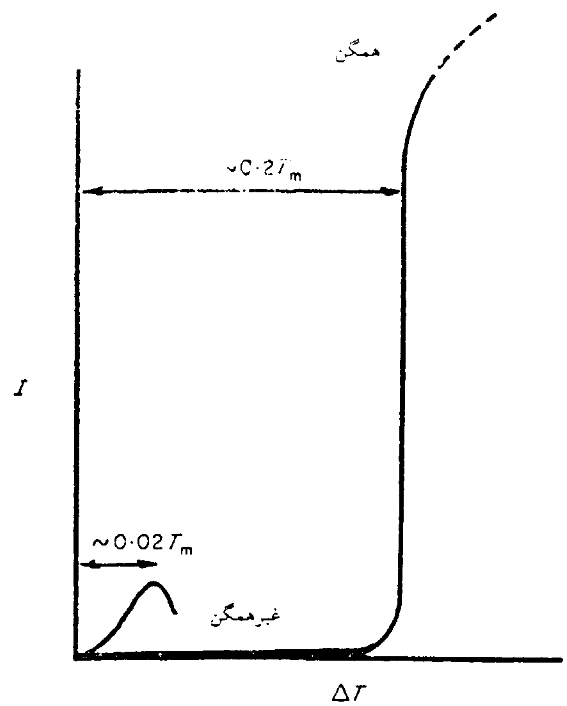
$$\Delta G^{*} = \frac{4\pi\gamma_{lc}^{3}\,(2 - 3\cos\theta + \cos^{3}\theta)}{3\Delta G_{V}^{2}} \qquad \text{معادله(۴-۲)}$$

این مقدار تغییر انرژی آزاد با مقداری که برای جوانه زنی همگن بدست می آید به اندازه عبارت $\frac{1}{4}(2 - 3\cos\theta + \cos^{3}\theta)$ تفاوت دارد. برای $\theta = 180$ تغییر انرژی آزاد بحرانی لازم برابر همان مقداری است که جوانه زنی همگن لازم داشت.

اما برای تمام موارد دیگر که در آن $180 > \theta > 0$ است جوانه زنی ناهمگن از نظر انرژی، فرآیند مطلوبتری است.برای سیستم هایی که در آن زاویه تماس کوچک است مقدار انرژی برای جوانه زنی نیز کوچکتر بوده و همین می تواند مقدار تحت تبرید کم که در عمل مشاهده می شود را توجیه کند.

به هر حال این موضوع مشخص است که تغییر انرژی برای جوانه زنی ناهمگن(ΔG^{*}) بسیار کمتر از مقداری است که برای تشکیل جوانه همگن لازم است و مانند قبل می توان معادله ای برای سرعت تشکیل جوانه مشابه معادله جوانه زنی همگن به دست آورد. مقدار کمتر(ΔG^{*})باعث سرعت بیشتر تشکیل جوانه در تحت تبریدهای پائین تر و عبور نامحسوس تر(شیب کمتر) از سرعتهای پایین به سرعتهای بالا می شود. به علاوه چون فرآیند جوانه زنی ناهمگن بستگی به وجود محلهای مناسب دارد می توان نتیجه گرفت که سرعت جوانه زنی از یک ماکزیمم عبور می کند و یک کاهش در تحت تبریدهای بالاتر نشان می دهد. این امر در اثر گسترش جانبی هسته ها در عرض زمینه و در نتیجه کاهش سطح قابل دسترس برای جوانه ها می باشد و مانند جوانه زنی همگن، نفوذ در مذاب عامل محدود کننده ای نیست که سرعت

جوانه زنی درتحت تبریدهای زیاد را کاهش می دهد. شکل(۴-۲) بـه صـورت شـماتیک تفـاوت نسبی بین دو نوع جوانه زنی همگن و نا همگن را نشان می دهد[۱۳].



شکل(۴-۲): سرعت نسبی جوانه زنی با کاهش دما برای

جوانه زنی همگن و ناهمگن[۱۳]

۵-۲- ماهیت ناخالصی های (Inclusions) غیر فلزی

ناخالصی های غیر فلزی با ترکیب شیمیایی متغیر در زمینه چدن و در مراکز کره های گرافیت توسط تعدادی از محققین مشاهده شده است و مکانیزمهایی که برای جوانه زنی گرافیت توسط آنها اراءه شده بر اساس تشکیل این هسته های فلزی در مذاب چدن نشکن می باش. بنا براین بررسی دقیق انواع وچگونگی تشکیل این هسته ها قبل از بررسی مکانیزمهای جوانه زنی ضروری است. جدول(۲-۲) خلاصه ای از ترکیبات عناصر فازهای مختلف که در ناخالصی ها وجود دارد را نشان می دهد.

جدول(۲-۲): ترکیبات و فازهای موجود در نا خا لصی ها[۱۴]

Phase	Reference
MgS	30, 35, 36, 37, 38, 39
CaS	30, 35, 36
SrS	36
CeS	37
LaS	37
MgO	38, 39, 40, 41, 42
SiO_2	38, 41, 42, 43
$MgO\cdot SiO_2$	38, 42
$2MgO\cdot SiO_2$	38, 39, 42
$(Mg, Al)_3O_4$	44
$(Mg, Al)SiO_3$	44
$(Mg, Ca, Al)SiO_3$	44
Fe_2O_3	40, 42
Fe_2SiO_4	45
Mg-Al-Si-Ti-O	36
CeO_2	40
$MgSiN_2$	35
Mg_3N_2	46
Mg_3P_2	46

در جدول تناوبی عناصر گروهIIA ، منیزیم، کلسیم، استرانسیم و باریم درتولید چدن خاصیت مهمی دارند، چون همهٔ آنها تشکیل دهنده های اکسیدها و سولفیدها می باشند. دراین قسمت واکنشهای ممکن بین این عناصر و گوگرد، اکسیژن، کربن مورد بحث قرارمی گیرد.

۱-۵-۲- سولفیدها

سولفیدهای خالص عناصر گروهIIA دارای شبکه کریستالی FCC و از نوع ساختار NaCl می باشند. هم چنین همهٔ آنها پارامتر شبکه یکسان و نقطه ذوب بالایی دارنـد. در مذابـهای چـدن، این سولفیدها درمیان بسیاری از ترکیبات غیر فلزی پـایدار دیگـر وجـود دارنـد. بدیـهی اسـت سولفیدها زودتـر از اکسـیدها در مـذاب چـدن تشـکیل مـی شـوند و ایـن نتـایج بـا تحقیقـات جاکوبز(Jacobs) بسیار نزدیک است[۱۴]. او دریافت که ناخالصی ها شامل هسته سـولفید مـی باشند که با پوسته ای از اکسیدها احاطه شـده انـد. مشـاهدات مشـابهی در چـدن خاکسـتری صورت گرفته که نشان می دهد سولفور یک عنصر اساسی به منظور عملیات تلقیـح موفـق مـی باشد. جدول(۳-۲) خلاصه ای از ساختار کریستالی، نقطه ذوب و انرژی آزاد اسـتاندارد تشـکیل سولفیدهای گروهIIA را نشان می دهد.

جدول(۳-۲):خواص فیزیکی سولفید های گروه IIA [۱۴]

Phase	Space Group	Crystal System	Lattice Parameter (Å)	T_M (°C)	ΔG_f* (kJ/mol)
MgS	Fm3m	cubic	5.191	2000	−232
CaS	Fm3m	cubic	5.696	2450	−380
SrS	Fm3m	cubic	6.020	2000	−370
BaS	Fm3m	cubic	6.386	2227	−356

*Standard free energy of formation at 1327 °C (1600 K).

۲-۵-۲-کاربیدها

کاربیدهای BaC_2 ، SrC_2 ، CaC_2 نیز دارای ساختار کریستالی از نـوع NaCl و هـم چنیـن پارامترهای شبکه مشابه می باشند. پیشنهاد می شود کاربیدها در چدن مذاب نیمه پـایدار مـی باشند اما دقیقاً مشخص نیست که واقعاً این فازها در چدن داکتیل تشکیل شوند. در حقیقت تـا کنون کاربیدها عملاً مشاهده نشده اند اگر چه آنها از نقطه نظر تئـوری منـاطق مناسـبی بـرای جوانه زنی گرافیت به شمار می روند. جالب توجه است که منیزیم نمی تواند ترکیباتی از قبیـل کاربید منیزیم(MgC_2)را تشکیل دهد. این مسئله نشان می دهد کـه چـرا منـیزیم فقـط بـرای

کروی کردن مذاب به کارمی رود و به عنوان جوانــه زا اســتفاده نمــی شــود[۱۴]. جــدول(۴-۲) خلاصه ای از ساختار کریستالی، نقطه ذوب و انرژی آزاد استاندارد تشکیل کاربیدهای گروهIIA را نشان می دهد.

جدول(۴-۲):خواص فیزیکی کاربیدهای گروه IIA [۱۴]

Phase	Space Group	Crystal System	Lattice Parameter (Å)	T_M (°C)	ΔG_f[a] (kJ/mol)
MgC_2	—	—	—	—	—
CaC_2	Fm3m	cubic	5.86	2300	−106
SrC_2	Fm3m	cubic	6.24	—	−93
BaC_2	Fm3m	cubic	6.56	—	−96

[a]Standard free energy of formation at 1327 °C (1600 K).

۳-۵-۲-اکسیدها

عناصر گروهIIA می توانند اکسیدهای پایدار نیز در مذاب چدن تشکیل دهند.به همین دلیل مواد کروی کننده و جوانه زاهایی که دارای این عناصر باشند، می تواننــد اکســیدزداهای خوبــی بــرای مــذاب چــدن بــه شــمار رونــد[۱۴]. جــدول (۵-۲) شــامل اطلاعــاتی دربــاره ســاختار کریستالی،نقطه ذوب و انرژی آزاد استاندارد تشکیل اکسیدهای خالص می باشد.

جدول(۵-۲):خواص فیزیکی اکسیدهای گروهIIA [۱۴]

Phase	Space Group	Crystal System	Lattice Parameter (Å)	T_M (°C)	ΔG_f[a] (kJ/mol)
MgO	Fm3m	cubic	4.215	2832	−401
CaO	Fm3m	cubic	4.811	2927	−466
SrO	Fm3m	cubic	5.140	2665	−428
BaO	Fm3m	cubic	5.539	2013	−395

[a]Standard free energy of formation at 1327 °C (1600 K).

۶-۲- مکانیزم های جوانه زنی گرافیت

مکانیزم جوانه زنی گرافیت در چدنهای داکتیل بسیار پیچیده است بطوریکه تا کنون جزئیات آن به طور دقیق مشخص نشده است . اینکه جوانه گرافیت چگونه توسط تلقیح تشکیل می شود یکی از مهمترین مسائل برای متالورژیست ها بوده و اختلاف نظرهایی نیز در این زمینه وجود دارد.

عموماً جوانه زاهای چدن بر پایه فرو سیلسیم یا سیلیساید کلسیم است چون سیلیسیم و آلیاژهای فرو سیلیسیم خالص به تنهایی برای جوانه زایی غیر مؤثر هستند توان جوانه زایی آنها وابسته به حضور عناصر جزئی از قبیل Ti , Sr , Ba , Zr , Al , Ca در آلیاژها می باشد. لازم به ذکر است که در حال حاضر نقش این عناصر جزئی نیز به طور کامل مشخص نیست[۱۴]. در این قسمت شرایط تشکیل گرافیت در چدن داکتیل در اثر عمل کروی کردن و تلقیح بیان می شود. به ویژه تئوریهای موجود برای جوانه زنی کره های گرافیت در این نوع چدن به منظور فهم دقیق موضوع دقیقا بررسی خواهد شد.

۱-۶-۲-تئوری گرافیت

این تئوری ها بر پایه این فرض بودند که جوانه زنی گرافیت از ذرات دیگر گرافیت موجود در مذاب صورت می گیرد. ایچ(Each)[۱۵] این ایده را برای جوانه زاهای پایه Si توسعه داد. وی این مسئله را ارائه کرد که تاثیر آنها به واسطه تشکیل مناطق غنی از سیلیسیم در اطراف ذرات حل شده در داخل مذاب میباشد به طوری که قابلیت حلالیت کربن به اندازه کافی در آن مناطق پایین بوده و منجر به رسوب گرافیت می شود.

بعد از آن فیست(Feest) [۱۴] نشان داد که این فرض درستی نیست چون زمان انحلال فرو سیلیسیم در مذاب چدن فقط در حدود چند ثانیه است و همچنین گرافیت تمایل به تشکیل در فصل مشترک ذرات حل شده و مایع دارد. بنابراین آنها مدل ایچ(E ach) را با این پیشنهاد اصلاح کردند که دانه های کریستالی گرافیت تا دمای یوتکتیک درمذاب حفظ می شود،

مشروط به اینکه مقادیر Ba و Sr موجود در مذاب برای جلوگیری از انحلال مجدد گرافیــت هـا به اندازه کافی باشد.

۲-۶-۲-تئوری کاربید سیلیسیم

وانی(Wany) وفردریکسون(Fredriksson)[۱۴] در هنگام انحــلال فـرو سیلیســیم مشـاهده کردند که کریستالهای کاربید سیلیسیم و ذرات گرافیت، درمذاب و در نزدیکی ذرات حل شــده فرو سیلیسیم تشکیل می شوند. آنها همچنین مشاهده کردند که این ذرات گذرا به آسانی بعــد از عملیات تلقیح حل می شوند و هیچ گونه ذرات سولفیدی یا اکسیدی نیز مشاهده نکردند.

براساس مشاهدات آزمایشگاهی، یک تئوری ارائه شد و محاسباتی به منظــور تشـریح جوانـه زنی گرافیت و مکانیزم میرائی آن صـورت گرفـت . یـک فـرض مـهم در مـدل وانــی(Wany) و فردریکسون(Fredriksson) توزیع غیر یکنواخت(فوق اشباع موضعی) C و Si در مذاب بعــد از انحلال SiC می باشد که نیروی محرکه لازم برای جوانه زنی همگن گرافیت را مـهیا مـی کنـد. اثر میرائی نیز توسط همگن بودن ذوب نسبت به سیلسیم و کربن به واســطه تلاطـم و نفـوذ در مذاب تعیین می شود[۱۴].

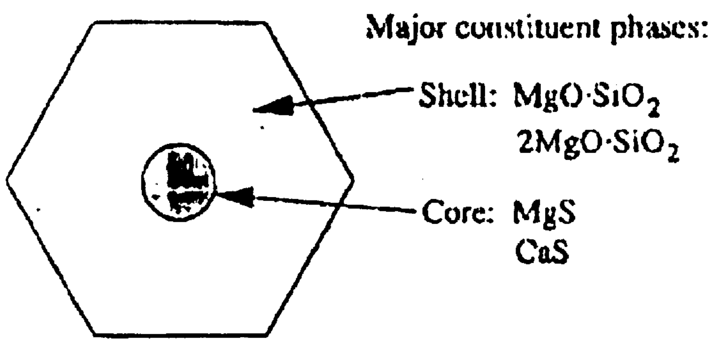
۳-۶-۲- تئوری کاربید شبه نمک (Salt like Carbide)

لوکس(Lux)[۱۴] هر دو حالت جوانه زنی همگن و غیر همگن را برای ماهیت جوانه گرافیت مورد ملاحظه قرار داد و نتیجه گرفت که عناصر کلسیم، استرانســیم و بـاریم،کاربیدهـای شـبه نمک(Salt like) مانند کــاربید کلســیم(CaC_2) در مـذاب چـدن تشـکیل مـی دهنـد و انتقـال رونشستی (Epitaxial) مستقیم از شبکه کاربید کلسیم(CaC_2) به شبکه گرافیـت بـدون تغیـیر زیادی در ابعاد شبکه میسر می باشد.در این چنین شرایطی انرژی فصل مشترک بین جوانه هــا و جوانه زا برای تسهیل نمودن جوانه زنی زیاد گرافیت در هنگام انجمــاد بـه انـدازه کـافی کـم خواهد بود.

۴-۶-۲- تئوری سولفید-اکسید

در عملیات کروی کردن چدن داکتیل با منیزیم، ناخالصی های ریز(Micro inclusion) که بعد از عملیات تشکیل می شوند عمدتاً دارای کلسیم،سولفور،سیلیسیم و اکسیژن هستند. این ناخالصیها محصولات واکنش اولیه در عملیات منیزیم می باشند. ناخالصی ها دارای هسته سولفیدی و پوسته سیلیکاتی در سطح بیرونی بوده که هسته سولفیدی شامل M gS و CaS است. در صورتیکه پوسته خارجی شامل سیلیکاتهای مرکب منیزیم مانندMg_2SiO_4 و$MgSiO_3$ می باشد. این فازها به عنوان مناطق جوانه زنی برای گرافیت عمل نخواهند کرد زیرا مانع انرژی فصل مشترک گرافیت-جوانه بسیار زیاد است. بعد از تلقیح با فرو سیلسیم محتوی کلسیم فازهای سیلیکاتی شش وجهی(Hexagonal Silicate) از نوع $CaSiO_3$ و $CaAl_2Si_2O_8$ بر روی سطح ناخالصی ها ی سولفیدی - اکسیدی موجود که در طول کروی کردن تشکیل شده است ایجاد خواهد شد و سپس این سیلیکاتهای کلسیم به عنوان مناطق بسیار مناسب برای جوانه زنی گرافیت در طول انجماد عمل خواهند کرد و این به خاطر ساختار کریستالی شش وجهی آنها است که به نحو خوبی با کریستال گرافیت جفت (match) می شود.(یعنی انرژی فصل مشترک کمی دارد)[۱۶] .

شکل(۵-۲) یک نوع از ناخالصی های ریز در چدن داکتیل را نشان می دهد که بعد از عملیات کروی کردن تشکیل می شود.



شکل(۵-۲): هسته سولفیدی- اکسیدی در چدن داکتیل[۱۶]

پوسته سطحی شامل سیلیکاتهای کلسیم شش وجهی است که در طول اضافه کردن مواد جوانه زا تشکیل می شود در صورتی که خود ذره محصول عملیات کروی کردن است بنا بر این عمل تلقیح تعداد ذرات جوانه(nuclie) را در مذاب افزایش نمی دهد بلکه سطح ذرات موجود از عملیات کروی کردن را اصلاح می کند.

این امر، اهمیت پیوند بین عملیات منیزیم و تلقیح را توصیف می کند و نشان می دهد که اساس و مبنای تلقیح مؤثر چدن داکتیل عمل کروی کردن می باشد. هم چنین دانسیته کره های حاصل به طور مؤثری به خاطر اصلاح سطح جوانه ها تغییر خواهد کرد.

زمانی که تلقیح توسط جوانه زای فرو سیلیسیم محتوی باریم و استرانسیم صورت می گیرد، سیلیکاتهای شش وجهی همانند سیلیکاتهای کلسیم (مثل $BaAl_2Si_2O_8$, $BaSiO_3$, $SrAl_2Si_2O_8$, $SrSiO_3$) تشکیل خواهد شد.

۵-۶-۲- جوانه زنی گرافیت در مذابهای دارای خلوص بالا

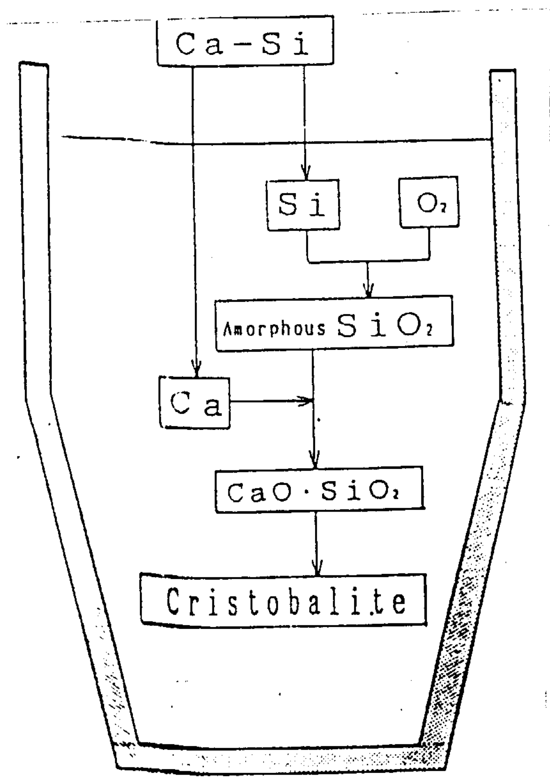
جوانه زنی غیر همگن گرافیت بر روی ذرات خارجی در مذابهای محتوی مقدار کم S و O نیز گزارش شده است. (به ترتیب کمتر از ۰/۲PPm و ۷PPm).

دینداو(Dhindaw)و ورهوان(Verhoeven) آلیاژهای Fe-C-Si و با خلوص بالا که در محیط خلأ ذوب و از چدن تصفیه شده منطقه أی با خلوص بسیار بالا تهیه شده بودند را مورد مطالعه قرار دادند[۱۴]. آنها از آزمایشات SEM و با استفاده از آنالیزهای X-ray دریافتند که اتمهای ناخالصی به هیچ عنوان در مرکز کره های گرافیت آشکار نمی شود که نشان می دهد جوانه زنی گرافیت در اثر ناخالصی های سولفیدی نبوده است. هر چند جوانه زاهای تجاری-Ca-Si-Al دار به طور مؤثری تعداد کره ها را در چدن تصفیه شده منطقه أی با خلوص بسیار بالا از حدود صفر تا حداکثر ۲۶ mm^{-2} افزایش می دهد. بنابراین آنها نتیجه گرفتند که تأثیر عمده جوانه زای کلسیم با پایه فرو سیلیسیم در چدنها تسهیل جوانه زنی غیر همگن گرافیت بوسیله تشکیل کاربید نیمه پایدار Cac_2 است در حالی که مواد کروی کننده به عنوان عاملی برای اکسید و سولفور زدایی مذاب برای افزایش مورفولوژی رشد کره های گرافیت می باشد.

بایستی متذکر شد تعداد کره های ماکزیمم (در حدود $26\ mm^{-2}$) که توسط دینداو(Dhindaw) و ورهواون(Verhoeven)گزارش شد در مقایسه با آنچه در چدن داکتیل تجاری مشاهده شده است بسیار کمتر بوده به طوری که دانسیته تعداد کره ها از ۳۰۰ تا $400 mm^{-2}$ نیز تجاوز می کند در نتیجه بررسی آنها در مواردی که احتمال جوانه زنی گرافیت روی ناخالصی های غیر فلزی را مستثنی می کند ،قطعی نیست.

۶-۶-۲-تئوری کریستوبالیت

تعدادی از محققین پیشنهاد می کنند کریستوبالیت که از استحاله SiO_2 توسط واکنش کاتالیزوری کلسیم یا دیگر عناصر ایجاد می شود، می تواند به عنوان جوانه زای گرافیت عمل کند. آنها هم چنین نشان دادند که کریستوبالیت از لحاظ ترمودینامیکی می تواند در مذاب چدن پایدار باشد. لازم به ذکر است جوانه زاهایی که استحاله کریستوبالیت را بیشتر تسریع می بخشند دارای قابلیت جوانه زایی بیشتری نسبت به بقیه هستند[۱۷].

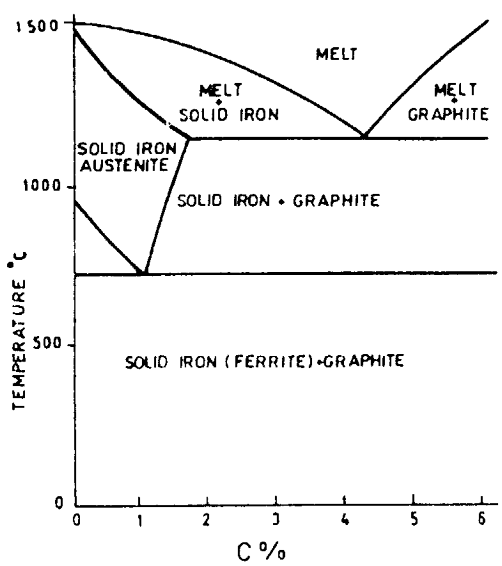


شکل(۶-۲): مدل شماتیکی جوانه زنی کریستوبالیت[۱۷]

۷-۲- انجماد چدن نشکن

به منظور درک بهتر پدیده جوانه زنی در چدن داکتیل، لازم است که نحوه انجماد آن نیز مورد بررسی قرار گیرد.

انجماد چدن نشکن یک استحاله یوتکتیکی می باشد. شکل(۷-۲) استحاله مذاب به جامد یا تحول در حال انجماد را نشان می دهد.



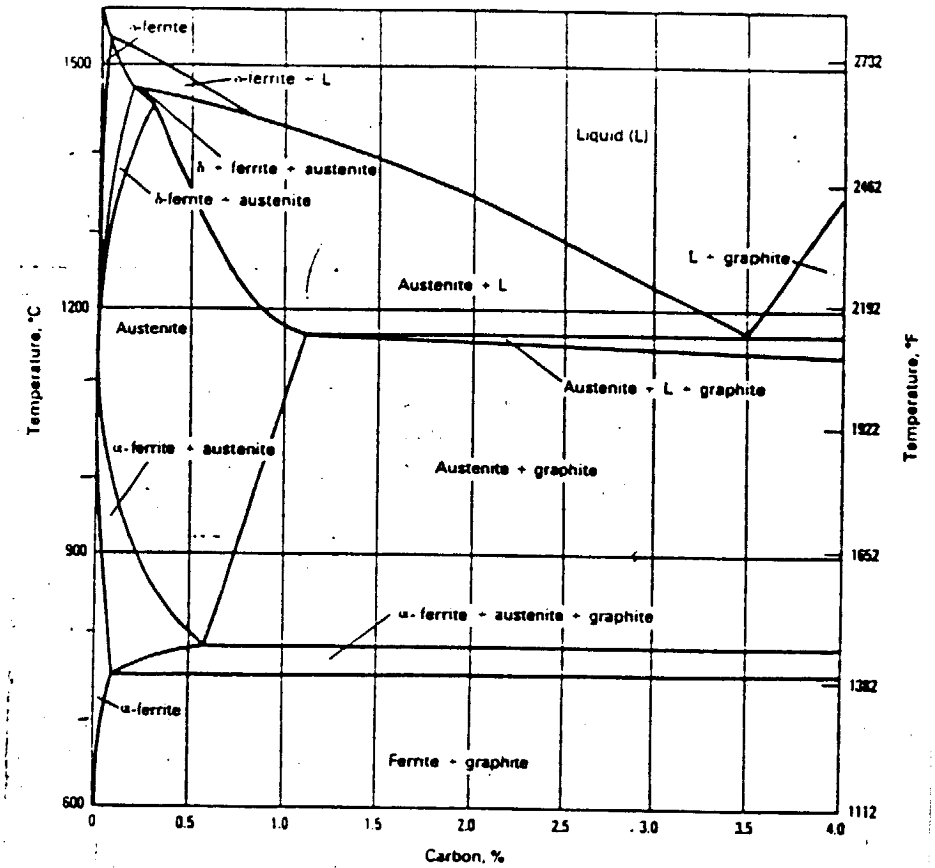
شکل(۷-۲):نمودار تعادلی آهن-گرافیت[۱۸]

از نظر کاربردی، قسمت مهم این شکل نقطه ای است که دارای ۴/۳٪ می باشد. همانطور که میدانیم این نقطه را نقطه یوتکتیک می نامند. به آلیاژهای آهن-کربن که ۴/۳٪ کربن داشته باشند آلیاژ یوتکتیک و به آلیاژهایی که کمتر و یا بیشتر از این مقدار کربن داشته باشند به ترتیب هیپویوتکتیک و هایپر یوتکتیک گفته می شود.

در آلیاژهای آهن-کربن-سیلسیم، نقطه یوتکتیک توسط میزان کربن معادل مشخص می شود که ازمعادله(۵-۲) زیر محاسبه می شود.

$$CE = C\% + \frac{1}{3} Si\% \quad \text{معادله(۵-۲)}$$

بطوریکه تأثیر سیلیسیم در کاهش میزان کربن یوتکتیک می باشد.اگر کربن معادل کمتر از ۴/۳٪ باشد آلیاژ را هیپویوتکتیک و اگر بیشتر باشد، آنراهیپریوتکتیک می نامند[۱۸].
شکل(۸-۲) دیاگرام آهن-کربن با ۲/۵ درصد سیلیسیم را نشان میدهد.



شکل(۸-۲): دیاگرام آهن-کربن-سیلیسیم[۱]

۱-۷-۲- انجماد یوتکتیکی

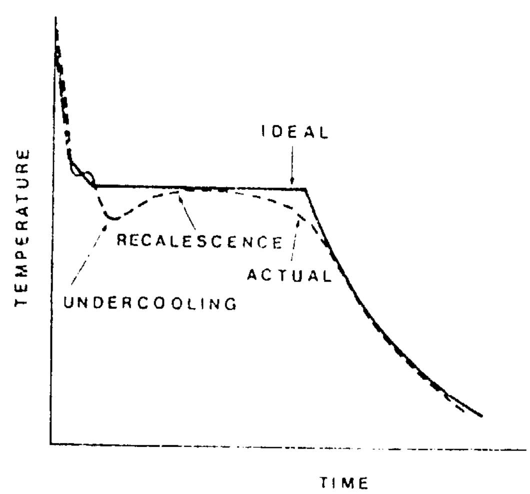
در حین انجماد یوتکتیک چدن نشکن، پس از جوانه زنی کره های گرافیت پوسته ای از آستنیت پیرامون گرافیت کروی تشکیل می شود. و در نتیجه، فقط فاز آستنیت با مذاب در تماس خواهد بود. هر واحد گرافیت کروی و پوسته آستنیت دور آن را می توان یک هسته در نظر گرفت که کربن باید به داخل این هسته نفوذ کند تا رشد گرافیت کروی کامل شود. با شروع انجماد، هسته سازی گرافیت کروی به اتمام می رسد و بنابراین تعداد گرافیتهای کروی در مرحله اول انجماد تعیین می شود. بررسی های صورت گرفته نشان میدهند که با رسیدن به

حداکثر تحت انجماد یوتکتیک عمل جوانه زنی متوقف شده و از این لحظه به بعد رشد جوانه ها را خواهیم داشت.تعداد و میزان کروی شدن گرافیتها بر روی خواص چدن نشکن تأثیر بسزایی دارد. وقتی تعداد هسته ها یا پوسته های آستنیت کم باشد، مناطق برای نفوذ کردن به داخل پوسته آستنیت کمتر شده، و در نتیجه تعداد گرافیتهای کروی کاهش می یابد.

بدلیل وضعیت پیچیده انجماد، به ندرت پیش می آید که انجماد از نقطه یوتکتیک شروع شود و انجماد در چدن نشکن یا از نوع هیپویو تکتیکی و یا هیپریوتکتیکی می باشد.

اگر بخواهیم وضعیتهای استحاله طبق شکل(۷-۲) انجام گیرد، لازم است که انجماد تعادلی باشد، یعنی سرعت سرد شدن بسیار کم باشد. لازم به ذکر است که در شرایط ریخته گری چنین تعادلی بندرت بوجود می اید. زیرا در شروع ذوب ریزی، قالب سرد می باشد و انجماد از حالت تعادل خارج می شود.

تمام شکلهای مختلف انجماد یوتکتیکی را می توان با منحنی سرد شدن(Cooling Curve) بررسی نمود. این نوع منحنی در شکل(۹-۲) نشان داده شده است.



شکل(۹-۲):منحنی انجماد ایده آل چدن نشکن[۱۸]

اگر سیستم فقط دارای دو جزء آهن و کربن باشد، سرعت انجماد با خواص حرارتی آلیاژ (ذوب) تعیین می شود. وقتی که یک فاز دیگری مانند آستنیت با گرافیت یا کاربید آهن، در این سیستم تشکیل شود سرعت انجماد کاهش می یابد. بعلت اینکه استحاله با انتقال حرارت

همراه است، نهایتاً وقتی فاز جامدی داخل مذاب تشکیل شود، مقدار گرمای آزاد شده از یک فاز مساوی خواهد بود با مقدار گرمای جذب شده توسط فاز دیگر. بنابراین در صورتیکه فازمذاب از بین برود انجماد می تواند ادامه داشته باشد.

با استفاده از منحنی انجماد و خارج شدن این منحنی از وضعیت ایده آل اطلاعات زیادی در مورد نحوهٔ انجماد چدن نشکن بدست می آید. اولین قسمتی که منحنی انجماد از شرایط ایده آل خارج شده است، منطقه تمرکز حرارت را نشان می دهد. مادون انجماد باعث بوجود آمدن این تمرکز حرارت می شود. وقتی دمای مذاب از نقطه تعادل پائین تر می رود، برای شروع انجماد فاز اول جامد، یک نیرویی بوجود می آید که در مورد چدن نشکن هیپویوتکتیکی فاز جامد، آستنیت و در چدن نشکن هایپر یوتکتیکی فاز جامد کربن می باشد. پس از شروع انجماد فاز اول جامد، سرعت انجماد افزایش می یابد و با ادامه انجماد، آلیاژ به دمای یوتکتیک می رسد. چون فاز دوم جامد با تأخیر بوجود می آید، مادون انجماد ثانوی رخ می دهد. حال با رسوب کریستالهای آستنیت و گرافیت، بعلت آزاد شدن انرژی(انرژی ناشی از استحاله)دما افزایش می یابد. افزایش دما بستگی به نسبت میان سرعت سرد شدن و حرارت آزاد شده در نتیجه استحاله فاز جامد دارد و می تواند در حد دمای تعادل یوتکتیکی و یا پائین تر از آن باشد. این چنین انجمادی خارج از منحنی ایده آل صورت بگیرد و در قطعاتی با ضخامت ۱۲mmیا پائین تر از آن مشاهده می شود.

در قطعات با ضخامت ۵۰mm و یا بالاتر،نحوه انجماد به وضع ایده آل نزدیکتر می شود.

۲-۷-۲- انجماد هیپویوتکتیکی

انجماد هیپویوتکتیکی با رسوب آستنیت جامد بشکل شاخه ای (دندریتی) شروع می شود و پس از آن در دمای یوتکتیک، همانگونه که گفته شد آستنیت و گرافیت بصورت هسته های کروی تشکیل می شود و با نفوذ کربن به داخل این پوسته ها، رسوبی از گرافیت بصورت کروی حاصل می گردد. پوسته آستنیت که داخل آن گرافیت رسوب می کند یک هسته یوتکتیک

نامیده می شود. میزان نفوذ کربن داخل پوسته کروی آستینت یکسان نمی باشد و در منـــاطقی که نفوذ کربن صورت نگرفته است، پوسته کروی آستنیت، عاری از گرافیت می باشد.

۳-۷-۲- انجماد هیپریوتکتیکی

نحوه انجماد چدن نشکن هیپریوتکتیکی نظیر انجماد چدن نشکن هیپویوتکتیکی می باشـد. با این تفاوت که در انجماد هیپریوتکتیکی اولین فاز جامدی که تشکیل می شود، گرافیت اسـت که شکل آن کروی می باشد. وقتی که دمای مذاب به پائین تر از دمـــای یوتکتیـک مـی رسـد، انجماد فاز جامد آستنیت با گرافیت شروع شده و ادامه انجماد، همـانند فرآینـدی است کـه در چدن نشکن هیپویوتکتیکی رخ می دهد[۱۸].

۸-۲- عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی چدن داکتیل

۱-۸-۲- ترکیب شیمیایی

مقادیر کربن، سیلیسیم، کربن معادل، فسفر، گوگرد، منگنز و منیزیم باقیمانده در مذاب می تواند تأثیرات مهمی روی ایجاد یا از بین بردن کاربید، شکل و پخش گرافیت یا کاربید و ساختار زمینه در چدن های داکتیل غیر آلیاژی داشته باشد لذا ضروری است نقش دقیق هر کدام از این عناصر بطور دقیق مورد بررسی قرار گیرد.

کربن معادل (Carbon Equivalent) CE: دو عنصر کربن و سیلیسیم نیز در کنار جوانه زا ها اثر قوی در ایجاد ساختار عاری از کاربید دارند. کربن و سیلیسیم عناصر اصلی در تعیین مقدار کربن معادل می باشند. کربن معادل نقش تعیین کننده ای روی خواص مختلف چدن نشکن دارد. تعداد گرافیت ها در واحد سطح علاوه بر جوانه زا به مقدار کربن معادل نیز بستگی دارد. و هر چه کربن معادل بالاتر رود تعداد گرافیت ها در واحد سطح افزایش می یابد. ولی اگر مقدار کربن معادل بیش از حدود۴/۵۵٪ بالا رود باعث بوجود آمدن گرافیت های شناور و پوک می گردد. چون گرافیت دارای وزن حجمی کمی می باشد و در نتیجه وقتی درصد کربن معادل بالا باشد باعث می شود که گرافیت ها در فاصله ذوب ریزی و انجماد بالای سطح مذاب تجمع کرده و به این ترتیب جدایش گرافیتی پیش می آید.میزان کربن معادل بر حسب ضخامت قطعه ریختگی مشخص می شود.

کربن: اصولاً مقدار کربن درچدنهای نشکن می تواند بین ۳تا ۴ درصد متغیر باشد ولی عمدتاً مقدار آن را ۳/۴ تا ۳/۸ درصد در نظر می گیرند. درچدنهای نشکن قسمت اعظم کربن بصورت گرافیت های کروی در ساختار میکروسکوپی ظاهر می شود و تا حدود ۹٪ حجم را اشغال می کند. چگونگی تأثیر کربن بستگی زیادی به وجود مقدار عناصر دیگر، بخصوص عناصر کربن و سیلیسیم دارد. به همین جهت این پارامتر تحت عنوان کربن معادل تعریف شده است که تحت تأثیر مشترک کلیه عناصر موجود به خصوص عناصر کربن و سیلسیم می باشد. افزایش کربن نیز تا مقدار بهینه می تواند باعث افزایش کره های گرافیت شود. هم چنین کربن به دلیل

افزایش حجم باعث کاهش انقباضات حاصل از انجماد، افزایش سیالیت و بهبود قابلیت ریخته گری می گردد و افزایش بیش از اندازه کربن باعث ایجاد گرافیت های شناور می شود[۱۸].

سیلیسیم: سیلیسیم عنصری است که تأثیر بسیار زیادی در ساختار و خواص مکانیکی چدنهای نشکن داشته و کنترل آن به منظور دستیابی به ساختارهای مطلوب الزامی است. بطور معمول میزان سیلیسیم در چدنهای نشکن ۱/۸ تا ۲/۸ درصد بوده و با افزایش آن اولاً احتمال تشکیل کاربیدهای یوتکتیک کاهش یافته و ثانیاً در تعیین ساختار زمینه مؤثر می باشد، بطوری که ساختار پرلیت به سمت فریت متمایل می گردد.

البته مقدار فریت و پرلیت به حضور یا عدم حضور عناصر دیگر، مواد جوانه زا و مقدار آنها نیز بستگی دارد. افزایش سیلیسیم موجب افزایش تعداد گرافیت های کروی و کاهش اندازه هسته های یوتکتیک در چدنهای نشکن خواهد شد. سیلیسیم فریت را مستحکم و سخت می نماید و با افزایش بالاتر از حد ذکر شده(۲/۸٪) سختی افزایش و درصد ازدیاد طول نسبی کاهش یافته و احتمال تبدیل شکست نرم به ترد را افزایش می دهد.

منگنز: منگنز به منظور افزایش استحکام فریت اضافه می شود ولی در عمل، منگنز تمایل به جدا شدن در مرز دانه ها را دارد و باعث ایجاد پرلیت در آن منطقه می شود. در این پروژه منگنز از عناصری است که در حد جزئی و ناخواسته بوده و می توان از اثرات آن صرفنظر کرد.

منیزیم: مقدار منیزیم نیز باید در حد مناسبی انتخاب شود در غیر اینصورت با وجود منیزیم باقیماندهٔ زیاد درمذاب می تواند باعث تشکیل کاربید شود. منیزیم کافی جهت بدست آوردن ساختار کروی و افزایش مقدار کره ها و ساختارزمینه مناسب ضروری است[۱۸].

فسفر: فسفر تأثیر قوی روی استحکام فریت دارد ولی به دلیل اثرات مضر این عنصر میزان آن درتولید چدن نشکن نباید بالاتر از ۰/۰۵٪ باشد. چنانچه میزان این عنصر از حد فوق تجاوز نماید باعث اثر پدیده جدایش درمنطقه مرزبین دانه ها و تشکیل فاز استدیت (یوتکتیک آهن و فسفید آهن(Fe_3C) می گردد. جدایش فسفر در منطقه مرز بین دانه ها در قطعات ریختگی ضخیم کاملاً مشهود است. از نقطه نظر ساختاری، افزایش مقدار فسفر، زیاد شدن میزان پرلیت در حالت ریختگی را نیز در پی دارد. ار لحاظ خواص مکانیکی نیز علاوه بر تأثیر مضر فسفر بر

روی مقاومت به ضربه می توان گفت که افزایش میزان فسفر سبب افزایش استحکام کششی و سختی و کاهش میزان ازدیاد طول نسبی و نتیجتاً ترد شدن قطعه می گردد.

گوگرد: با اینکه گوگرد از عناصری نیست که به مذاب افزوده شود و جزء عناصر ناخواسته در مذاب می باشد. اما تأثیر زیادی روی تعداد کره های گرافیت و ریز ساختار چدنهای داکتیل دارد.

تأثیر مقادیر کم سولفور در کاهش مقادیر کاربیدها و افزایش تعداد کره های گرافیت و در نتیجه بهبود ریزساختار به دلیل نقش مهم این عنصر در عمل جوانه زنی است.

همانطور قبلا گفته شدسولفیدها به عنوان جوانه برای تشکیل کره های گرافیت عمل می کنند. مقادیر زیادی از این سولفیدها می تواند توسط اضافه کردن منیزیم کافی به مذاب، به صورت ذرات سولفید منیزیم برای جوانه زنی کره های گرافیت تشکیل شوند. اگرچه این جنبه از گوگرد مورد مطالعه قرار گرفته است ولی اطلاعاتی در رابطه با مقداربهینه گوگرد یا نسبت گوگرد و منیزیم وجود ندارد.

عناصر دیگر از جمله آلومینیم، کلسیم و بیسموت و...توسط مواد کروی کننده، جوانه زا یا شمش چدن نیز وارد مذاب می شوند که می توانند تأثیرات مثبت یا منفی روی ساختار و خواص مکانیکی چدن داشته باشند[۱۹].

۲-۸-۲- ساختار گرافیت

مقدار و شکل گرافیتها (Nodule Count, Nodularity) در چدن نشکن در حین انجماد تعیین می شود و با عملیات حرارتی تغییر نمی کند. با افزایش تعداد کره های گرافیت، کره های ریز با مورفولوژی بسیار نزدیک به حالت کروی تشکیل می شود. تمام خواص مکانیکی این نوع چدنها بستگی به شکل و تعداد کره های گرافیت دارد. با افزایش تعداد و میزان کروی بودن، خواص مکانیکی چدن افزایش می یابد و با افزایش گرافیتهای غیر کروی خواص مربوط به استحکام و انعطاف پذیری بخصوص استحکام کششی و خستگی افت پیدا می کند. این امر به این دلیل است که با کم شدن تعداد کره های گرافیت اولاً میزان کروی شدن آنها کاهش

می یابد که در نقاط نوک تیز و زاویه دار منجر به ایجاد تمرکز تنش می شود. ثانیاً شرایط لازم جهت ایجاد فاز پرلیت به دلیل افزایش فاصله نفوذ کربن از محلول آستنیت به سمت کره های گرافیت در هنگام استحاله یوتکتوئید مهیا می گردد. هم چنین در صورت عدم وجود و مراکز جوانه زنی لازم، تشکیل کاربید در حین انجماد نیز صورت می پذیرد[۱۸].

۳-۸-۲- ساختار زمینه

ساختار زمینه فاکتور اصلی در تعیین انواع مختلف چدن نشکن است. چدن نشکن غیر آلیاژی ریختگی دارای مقادیر مختلف فریت و پرلیت می باشد. استحکام کششی، استحکام تسلیم و سختی با افزایش مقدار پرلیت افزایش می یابد. خواص ضربه و انعطاف پذیری با مقدار فریت و پرلیت موجود در قطعه تعیین می شود بطوریکه با کاهش مقدار پرلیت مقاومت به ضربه و انعطاف پذیری افزایش می یابد.

دلیل این امر ذاتی هر کدام از فازها می باشد. به این صورت که فریت در مقایسه با پرلیت و کاربید دارای استحکام کششی و تسلیم کمتر و در مقابل شروع و اشاعه ترک مقاومتر بوده و در نتیجه منجربه افزایش چقرمگی می شود.

۴-۸-۲- سرعت سرد شدن

سرعت سرد شدن نیز که تابع عوامل سطح مقطع قطعه، دمای بار ریزی، جنس و ضخامت قالب و هم چنین ترکیب شیمیایی مذاب می باشد در هنگام انجماد و استحاله یوتکتوئید می تواند تأثیر قابل ملاحظه ای روی ریز ساختار و در نتیجه خواص مکانیکی چدن داکتیل داشته باشد. رابطه تقریبی بین سرعت انجماد و تعداد کره های گرافیت به صورت معادله (۶-۲) بدست آمده است[۲۰].

$$\text{تعداد کره} = A\Delta t^{-m} \qquad \text{معادله(۶-۲)}$$

به طوری که Δt زمان انجماد بر حسب ثانیه و A و m ثابت هستند. با کـاهش زمـان انجمـاد تعداد کره های گرافیت به طور مؤثری افزایش می یابد. مقادیر A و m در حالت جوانه زنـی در پاتیل برابر با m=-0.3675 و A=712 و در حالت جوانه زنـی در قـالب A=2035 و m=-0.4190 بدست آمده اند.

به همین صورت ارتباط تقریبی بین درصد پرلیت و تعداد کره های گرافیت را در سـرعتهای سرد شدن مختلف می توان از معادله (۷-۲) بدست آورد[۲۰].

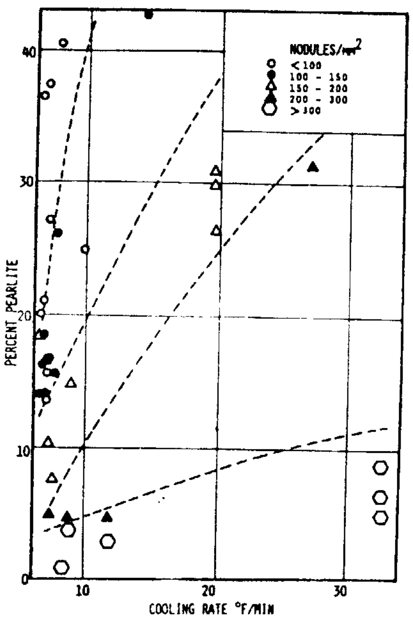
$$\text{درصد پرلیت} = K(\text{تعداد کره ها})^{-n} \qquad \text{معادله(۷-۲)}$$

K و n مقادیر ثابتی هستند که به سرعت سرد شدن در محدودهٔ دمایی یوتکتوئید بسـتگی دارد. مقادیر K و n در جدول(۶-۲) نشان داده شده است.

جدول(۶-۲): تغییرات ثوابت K و سرعت سرد شدن یا سطح مقطع[۲۰]

	SECTION SIZE			
	¼" (0.635 cm)	½" (1.27 cm)	1" (2.54 cm)	1½" (3.81 cm)
K	637,300	102,500	5329	5404
n	1.966	1.790	1.212	1.242
cooling rate	11.7-19.5F/min (6.50-10.83C/min)	7.54-8.78F/min (4.18-4.88C/min)	6.48-7.06F/min (3.60-3.92C/min)	6.43-6.88F/min (3.57-3.82C/min)

درصد پرلیت را می توان برحسب سرعت سرد شدن یوتکتوئید بـرای تعـداد نادولـهای ثـابت رسم نمود که این مطلب در شکل(۱۰-۲) آمده است.



شکل(۱۰-۲): تأثیر سرعت سرد شدن در هنگام استحاله یوتکتوئید روی درصد پرلیت[۲۰]

افزایش سرعت سرد شدن باعث افزایش درصد پرلیت می شود گرچه در زمینه هایی با تعداد کزه های زیاد سرعت افزایش پرلیت با افزایش سرعت سرد شدن تغییر جزئی می کند.

شکل(۱۰-۲) نشان می دهد که وقتی تعداد کره های گرافیت افزایش می یابد وابستگی درصد پرلیت به سرعت سرد شدن از حساسیت کمتری بر خوردار است.

برای ایجاد زمینه فریتی در حین سرد شدن در یک قطعه بایستی کربن از زمینه به سطح گرافیت نفوذ کند سرعت دیفوزیون کربن و زمان لازم برای دیفوزیون تعیین کننده درصد نسبی پرلیت و فریت در ساختار زمینه است. وقتی کره های گرافیتی کم باشند، بصورت پراکنده در زمینه تقسیم می شوند و فاصله ای که کربن باید نفوذ کند زیاد است و زمینه چدن برای سرد شدن در منطقه یوتکتوئید بسیار حساس است ولی در صورتی که درصد کره ها زیاد باشد فاصله نفوذ کربن کوتاه می شود و سرعت سرد شدن بسیار زیاد لازم است تا از شکل گیری زمینه فریتی جلوگیری کند و درصد پرلیت در زمینه اینگونه چدنها کم است، بنابراین وقتی درصد کره ها کم باشد مقدار پرلیت نسبت به تغییر تعداد کره ها حساس می گردد.

برای درک بهتر موضوع باید آن را به فاصله ای که کربن نفوذ می کند ربط دهیم. برای این کار می توان فاصله نفوذ کربن یا فاصله دو توده گرافیت از یکدیگر را بعنوان معیار قرار داد. اگر این فاصله را به λ نمایش دهیم می توان از معادله(۸-۲) را بدست آورد.

$$\lambda = (\frac{2N}{3f})r^{\frac{\,}{2}} - \frac{\pi r}{2} \qquad \text{معادله(۸-۲)}$$

f : نسبت حجمی گرافیت

r : شعاع گرافیت ها

دیده می شود که با کاهش r و افزایش f ، مقدار λ کاهش می یابد که مؤید مطالب فوق است[۲۰].

فصل سوم
روش تحقیق

۱-۳- مواد مورد نیاز

۱-۱-۳- شمش چدن

آزمایشات این تحقیق با استفاده از شمشهای چدن با ترکیب شیمیایی تقریبا ثابت و در محدوده ترکیب معمول برای چدن های داکتیل به صورتی که در جدول(۱-۳) آمده،صورت گرفت.

جدول(۱-۳):ترکیب شیمیایی شمش مصرفی(درصد)

Fe	P	S	Mn	Si	C
باقیمانده	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۱	۲/۳	۳/۵

نکته مورد توجه اینکه این نوع شمش دارای گوگرد و فسفر بسیارکمی می باشد.

۲-۱-۳- کربور سیلسیم

کربور سیلسیم آلمانی با خلوص ۹۳٪ و با آنالیز شیمیایی مطابق جدول(۲-۳) برای جوانه زایی مورد استفاده قرار گرفت.

جدول(۲-۳):ترکیب شیمیایی کاربید سیلسیم(درصد)

SiC	C_{free}	Si_{free}	Al	Ca	Mg	Ti	S
۹۳/۴	۲/۹	۰/۳	۰/۲۲	۰/۳۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳

۳-۱-۳- فروسیلسیم

فروسیلیسیم با خلوص ۷۵٪ که برای جوانه زایی چدن استفاده شد دارای ترکیب شیمیایی زیر می باشد.

جدول(۳-۳):ترکیب شیمیایی فروسیلیسیم(درصد)

Si	Al	Ca	Mg	Fe
۷۶/۱۵	۰/۷۳	۰/۸۴	۰/۲۵	۲۱/۲

۳-۱-۴- فرو سیلیکو منیزیم

آلیاژ حاوی منیزیم نیز با ترکیب شیمیایی مطابق با جدول (۳-۴) به منظوراستفاده در عملیات کروی کردن تهیه گردید.

جدول(۳-۴):ترکیب شیمیایی فروسیلیکومنیزیم

Fe	Si	Mg
٪۵۱	٪۴۱	٪۸

۳-۱-۵- مواد قالبگیری

جهت قالبگیری نمونه ها از ماسه سیلیسی به همراه چسب سیلیکات سدیم و گاز دی اکسید کربن استفاده شد.

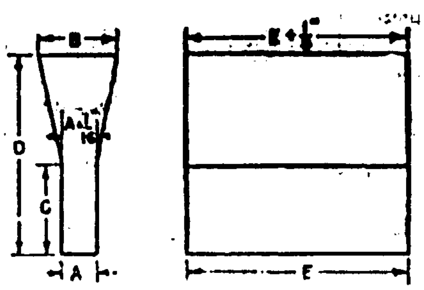
۲-۳- تجهیزات و ابزار مورد استفاده

در این بخش تجهیزات مورد استفاده به ترتیب استفاده از آنها معرفی می شوند.

۱-۲-۳- ابزار مورد نیاز برای قالبگیری

۱-درجه : قالبگیری در درجه های معمولی و به ابعاد مورد نیاز صورت گرفت.

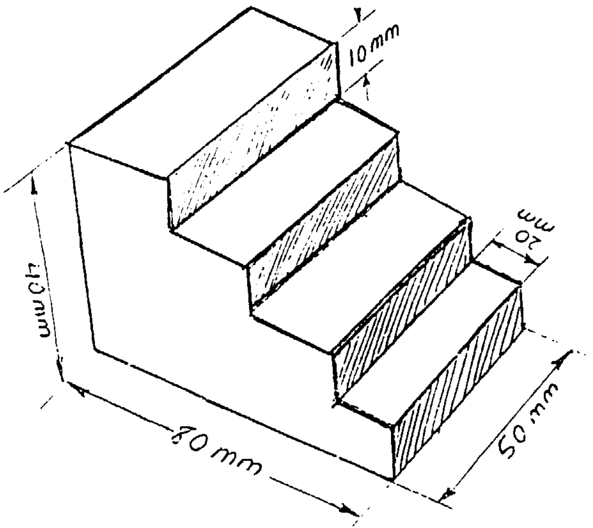
۲-مدل : به منظور انجام این تحقیق از دو نوع مدل استفاده گردید. مدل نوع اول برای تهیه نمونه های کشش و ضربه طبق استاندارد ASTM A536-84 (standard specification for ductile iron casting) ساخته شد[۲۱]. این نمونه ها که Y-block نام دارد به صورت شکل (۱-۳) می باشد.



Dimensions	"Y" Block Size: For Castings of Thickness Less Than ½ in. (13 mm)		For Castings of Thickness ½ in. (13 mm) to 1½ in. (38 mm)		For Castings of Thickness of 1½ in. (38 mm) and Over	
	in.	mm	in.	mm	in.	mm
A	½	13	1	25	3	75
B	1⅝	40	2⅛	54	5	125
C	2	50	3	75	4	100
D	4	100	6	150	8	200
E	7 approx	175 approx	7 approx	175 approx	7 approx	175 approx

شکل(۱-۳): شکل و ابعاد Y-block [۲۱]

هم چنین مدل نوع دوم جهت بررسی اثر سرعت سرد شدن بر اساس مطالعات تئوری و کارهای انجام شده قبلی مطابق با شکل(۲-۳) تهیه گردید.



شکل(۲-۳):شکل وابعاد مدل پله ای[۲۲]

وسایل و مواد دیگرعبارتند ازکوبه ، قاشقک ، خط کش ، کپسول گاز ، پودر جدایش و...

۳-۲-۲- ابزار مرحله ذوب

بوته گرافیتی ، کوره زمینی ، انبر ، دستکش ، ماسک ، کمچه حمل بوته و...

۳-۲-۳- ابزار تهیه نمونه

دستگاه برش دیسکی (از نوع دیسکهای سرامیکی) ، اره دستی ، دستگاه تراش و صفحه تراش و ابزار آلات مربوطه،دستگاه فرز،دستگاه سنگ دیواری،تجهیزات متالوگرافی،کولیس با دقت دو صدم میلی متر،ترازوی دقیق با دقت صدم گرم دراین آزمایشات به شکلی گسترده مورد استفاده قرار گرفتند.

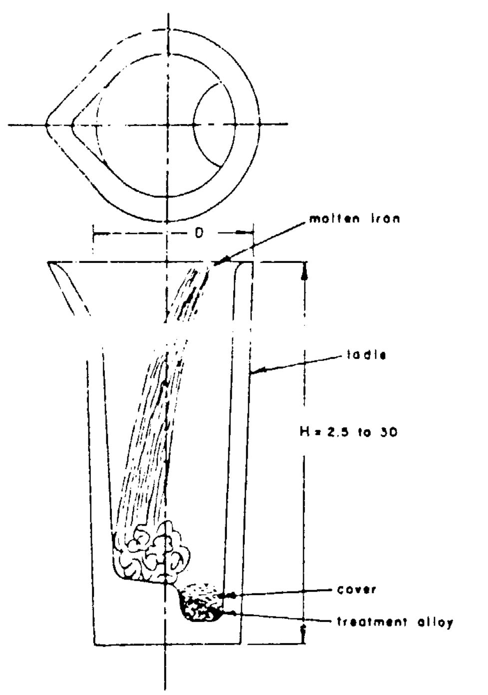
۴-۲-۳- ابزار آزمایش

دستگاه کشش یونیورسال Instron ،دستگاه ضربه،دستگاه سختی سنجی،کوانتومتر، میکروسکوپ نوری،میکروسکوپ الکترونی SEM و پیرومتر از جمله ابزار آزمایش بودند.

۳-۳- چگونگی انجام آزمایشها

۱-۳-۳- تعیین روش کروی کردن مذاب

قدم اول برای انجام آزمایشات تعیین روشی مناسب برای عملیات کروی کردن مذاب بود که با توجه به امکانات موجود روش ساندویچی جهت این کار انتخاب گردید. بدین ترتیب که پس از تهیه مذاب توسط کوره زمینی و با درجه حرارتی در حدود ۱۴۸۰ درجه سانتیگراد، بوته گرافیتی حاوی مذاب از کوره خارج و در پاتیلی که مواد کروی کننده همراه با پوشش نازکی از ماسه در کف آن قرار داشت واژگون می شد. شکل(۳-۳) نمایی از روش مورد استفاده را نشان می دهد.



شکل(۳-۳): پاتیل مورد استفاده جهت انجام عملیات کروی کردن و تلقیح[۱۱]

۲-۳-۳- تعیین نحوه افزودن مواد جوانه زا

با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی کاربید سیلیسیم، برای تعیین بهترین نحوه افزودن کاربید سیلیسیم به مذاب روشهای مختلفی که در فصل ۲ ارائه شد مورد بررسی دقیق و آزمایش قرار گرفت.در ذیل تمام روشهای به کار رفته در این تحقیق همراه با دلایل موفقیت یا عدم موفقیت آنها بیان می گردد. بدیهی است در این مرحله به منظور اطمینان کامل از حل شدن، کاربید سیلیسیم با دانه بندی بسیار ریز انتخاب گردید.

روش اول: بعد از عملیات کروی کردن، مواد جوانه زا در ته پاتیل دیگری قرار گرفته و مذاب روی آن ریخته شد. بعد از ریختن مذاب مشاهده شد مواد جوانه زا بدون هیچگونه حل شدن به کف پاتیل جوش خورده و در نتیجه عمل جوانه زایی انجام نشد.

روش دوم: پس از کامل شدن عملیات کروی کردن و بلافاصله قبل از ریختن در درون قالب کاربید سیلیسیم به روی مذاب ریخته شد که به دلیل عدم تر شوندگی مناسب، دانه های کاربید سیلیسیم در مذاب حل نشده و این روش نیز جوابگو نبود.

روش سوم: در این روش نیز پس از اتمام عملیات کروی شدن، مذاب به درون پاتیل دیگری منتقل شد و همزمان با انتقال مذاب، SiC نیزبه آن افزوده می شد. این روش نیز به دلیل عدم ترشوندگی و بالتبع عدم حل شدن SiC روش موفقی نبود.

روش چهارم: در این حالت مخلوط کردن مواد کروی کننده و جوانه زا به صورت های مختلف از قبیل مخلوط کردن کامل آنها و یا ریختن مواد جوانه زا روی مواد کروی کننده صورت گرفت که این عمل باعث می شد مواد کروی کننده به خوبی عمل نکرده و عملیات کروی کردن دچار اشکال شود.

با توجه به چهار روش ناموفق قبل به این نتیجه رسیدیم که دو مسئله مهم باید در نظر گرفته شود.نخست باید روشی انتخاب شود که دما و زمان لازم برای انحلال S iC را تأمین کند و سپس در آن روش SiC به خوبی توسط مذاب تر شود.

برای رسیدن به این هدف روش تک مرحله ای one step treatment مورد استفاده قرار گرفت[۲۳] به این صورت که با استفاده از روش ساندویچی برای کروی کردن مذاب ابتدا آلیاژ

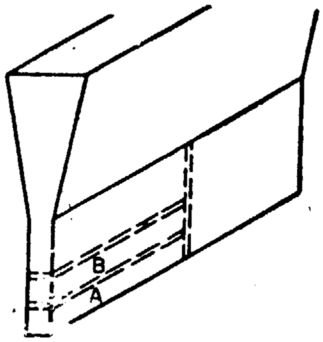
کروی کننده در کف پاتیل قرار داده شد سپس با لایه نازکتری از ماسه نسبت به حالات قبل سطح آن را پوشانده و مواد جوانه زا را روی پوشش ماسه ای گذاشته شد.

در هنگام انجام واکنش FeSiMg با مذاب، SiC نیز به خوبی به داخل مذاب پراکنده شده وچون دما و زمان هم به اندازه کافی بود عمل انحلال SiC به راحتی صورت گرفت.

۳-۳-۳- تهیه نمونه و انجام آزمایش کشش

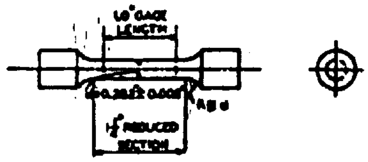
نمونه های کشش برای تعیین استحکام تسلیم، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول نسبی به کار برده شد.

برای تهیه نمونه های کشش ابتدا قطعات Y-block به صورت شکل(۴-۳) و بر اساس استاندارد برش داده شدند.



شکل(۴-۳): نحوه برشY-block برای تهیه نمونه کشش[۲۱]

پس از برش و تهیه نمونه های اولیه برطبق استاندارد ASTM-A536 نمونه های نهایی به صورت شکل(۵-۳) توسط ماشینکاری ساخته شد.



Metric Equivalents

in.	mm	in.	mm
0.005	0.13	1.0	25.4
0.007	0.18	1¼	31.8
0.252	6.40	1.4	35.6
0.357	9.07	1¾	44.4

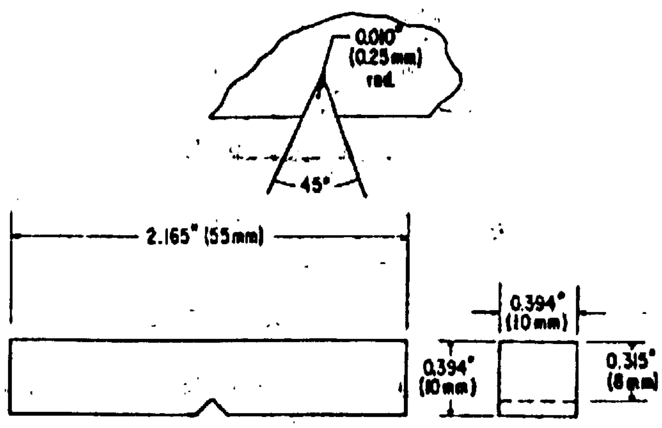
شکل(۵-۳): شکل وابعاد نمونه های کشش[۲۱]

در نهایت آزمایش کشش توسط دستگاه کشش Instron و در دمای محیط صورت گرفت.

۴-۳-۳- تهیه نمونه و انجام آزمایش ضربه

نمونه های ضربه برای تعیین تافنس و خواص ضربه پذیری تهیه شد.

نمونـــه هـــای نـــهایی ضربـــه مطـــا بـــق بـــا اســـتاندارد ASTM-A327-72 (Standard methods of impact testing of cast iron) به وسیله صفحه تراش تهیـه گردیـد. شکل(۶-۳). شیار این نمونه ها به وسیله دستگاه فرز و با زاویه ۴۵ درجه طبق استاندارد ایجـاد شد.نمونه های ضربه نیز از قطعات Y-block تهیه گردید.



Note—Permissible variations shall be as follows:

Adjacent sides shall be at	90° ± 10 min
Cross section dimensions	±0.001 in. (0.03 mm)
Length of specimen	±0, −0.100 in. (2.54 mm)
Angle of notch	±1°
Radius of notch	±0.001 in. (0.03 mm)
Dimension to bottom of notch	±0.001 in. (0.03 mm)

شکل(۶-۳):شکل وابعاد نمونه های ضربه[۲۴]

آزمایش ضربه نیز با روش Charpy وبا دستگاه ضربه، در دمای محیط انجام شد.

۵-۳-۳-آزمایش سختی سنجی

آزمایشات سختی سنجی توسط دستگاه سختی سنج و با ساچمه ۲/۵ و بار ۱۸۷/۵ بر اساس واحد برینل انجام پذیرفت.

۶-۳-۳-تهیه نمونه و انجام آزمایش متالوگرافی

نمونه های متالوگرافی جهت تعیین تعداد کره ها در واحد سطح ، میزان کروی شدن و محاسبه درصدهای فریت وپرلیت تهیه گردید.

این نمونه ها به شکل استوانه ای و با ابعاد تقریبی ۱۰ میلی متر قطر و ۲۰ میلی متر ارتفاع توسط ماشینکاری تهیه شدند

در این آزمایشها ریز ساختار کلیه نمونه ها مورد بررسی قرار گرفت.برای انجام این آزمایشات پس از سنباده زنی و پولیش، نمونه ها با محلول نایتال ۲ درصد به مدت ۳۵ ثانیه اچ شدند.

۷-۳-۳-آزمایش آنالیز کوانتومتری

به دلیل اینکه دستگاه کوانتو متر قادر به شناسایی عنصر کربن آزاد نمی باشد لذا جهت تهیه فاز کاملاً کاربیدی (Fe3C) قالب مسی ساخته شد و نمونه هایی به ابعاد ۲ سانتی متر و قطر یک سانتی متر ارتفاع جهت آنالیز کوانتو متری تهیه شدند.

۸-۳-۳-آزمایش آنالیز SEM

به منظور شناسایی ماهیت ذراتی که گرافیت بر روی آنها جوانه می زند مرکز کره های گرافیت که توسط Sic و Fesiجوانه زائی شده بودند توسط میکروسکوپ الکترونی SEM آنالیز و عکسبرداری شدند. آنالیز میکروپروب برای شناسایی ترکیب شیمیایی آنها صورت گرفت.

فصل چهارم
نتایج و بحث

۱-۴- مقدمه

یکی از اهداف مهم در متالورژی فلزات یافتن روشها و موادی جهت بهبود کیفیت و خواص مکانیکی فلزات می باشد و در این راستا اولین قدم شناخت دقیق عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی ماده مورد نظر است.

همانطور که در فصل۲ گفته شد عوامل مؤثر بر خواص چدن نشکن عبارت از ترکیب شیمیایی، ساختار گرافیت(Nodularity) وتعداد کره های گرافیت(Nodule count)،ساختار زمینه وسرعت سرد کردن می باشد.

لازم به ذکر است که هر کدام از این عوامل نیز می توانند روی همدیگر تأثیر زیادی داشته باشند به عنوان مثال در اثر تغییر ترکیب شیمیایی ساختارو تعداد کره های گرافیت،ساختار زمینه و سرعت سرد شدن نیز تغییر می کند. هم چنین ساختار و تعداد کره های گرافیت می تواند روی ساختارزمینه اثر گذار باشد و بالاخره اینکه سرعت سرد شدن نیز اثرات بسیارزیادی روی ساختار زمینه، ساختار و تعداد کره های گرافیت دارد.

با توجه به مطالب فوق می بینیم که در عمل شرایط پیچیده ای تعیین کنندهٔ خواص چدن داکتیل است. قبلاً گفته شد که کلید کنترل این متغیرها ودر نتیجه خواص چدن،عمل تلقیح یا جوانه زائی می باشد. برای رسیدن به این هدف و هم چنین تعیین مقدار بهینه SiC به عنوان جوانه زا، ترکیب شیمیایی مذاب و سرعت سرد کردن راثابت نگه داشته و اثرات مقادیرمختلف SiC را روی ساختار، تعداد کره ها و ساختار زمینه و خواص بررسی نمودیم. ترکیب شیمیایی توسط کنترل دقیق و آنالیز مذاب و سرعت سرد کردن نیز با در نظر گرفتن

دمای بارریزی ثابت، و هم چنین استفاده از مدلهای یکسان و قالبهای با جنس و ابعـاد یکسـان، ثابت نگه داشته شدند. قطعات نیز تا رسیدن به دمای محیط در قالب مـانده و سـپس از ماسـه خارج شدند. در قسمت بعدی این تحقیق و پس از تعیین مقدار بهینه جوانه زا، اثر سرعت سـرد شدن بر روی ساختار و خـواص مکـانیکی از قبیـل سـختی نـیز در حضـور جوانـه زای کـاربید سیلسیم با استفاده از مدل پله ای مورد بررسی قرار گرفت.

امروزه جوانه زاهای پایه سیلیسیم زیادی درصنعت مورد استفاده قرار میگیرند. بنابراین برای تعیین جایگاه SiC دربین جوانه زاها آزمایشات مشابهی نیز برای اپتیمـوم مقـدار فروسیلیسـیم ۷۵٪ (۰/۵٪)که بیشترین مصرف ر ادر صنعت داراست صورت گرفت.

۲-۴- ترکیب شیمیایی

همانطورکه قبلاً گفته شد به دلیل عدم شناسایی کربن آزاد توسط دستگاه کوانتومتر نمونه های سرد شده در قالب مسی برای ایجاد فاز کاملاً کاربیدی در زمینهٔ چدن تهیه شدند و پس از آن آنالیز روی آنها صورت گرفت. جدول(۱-۴) آنالیز ذوبها را همراه با نوع و مقدار جوانه زای مصرفی نشان می دهد.

جدول(۱-۴): آنالیز شیمیایی نمونه های آزمایش

	بدون جوانه زا	٪۰/۱SiC	٪۰/۲SiC	٪۰/۳SiC	٪۰/۴SiC	٪۰/۵SiC	٪۰/۵FeSi
%C	۳/۴	۳/۵	۳/۵	۳/۶	۳/۶	۳/۶	۳/۵
%Si	۲/۷	۲/۷	۲/۸	۲/۷	۲/۸	۲/۷	۲/۸
%P	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
%S	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲
%Mn	۰/۱	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱	۰/۱	۰/۱۵	۰/۱
%Mg	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۹
%CE	۴/۳	۴/۴	۴/۴۳	۴/۵	۴/۵۳	۴/۵	۴/۴۳

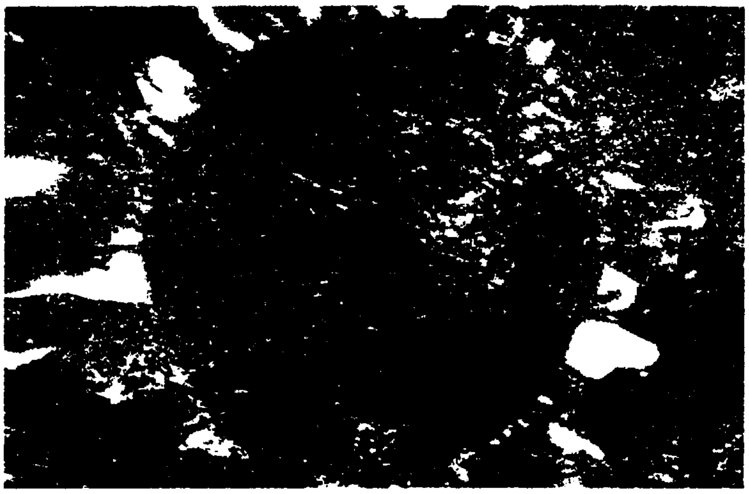
کربن معادل طبق رابطه $CE = C + \frac{1}{3}Si$ محاسبه شده که در این تحقیق بین ۴/۳و ۴/۵قرار دارد.

مقادیر سولفور و فسفر نیز به دلیل تأثیرات مضر آنها روی میزان کروی شدن و تعداد کره های گرافیت و هم چنین ساختار و زمینه چدن در حد پائینی قرار دارد. عنصر منگنز از عناصر جزئی است که معمولاً همراه با شمش چدن وارد مذاب می شود و مقدار آن در حدود ٪۰/۱ است. عنصر Mg نیز به همراه آلیاژ کروی کننده وارد مذاب می شود و مقدار باقی مانده آن باید در حد کمی باشد در غیر این صورت تأثیرات مضری روی خواص چدن خواهد داشت.

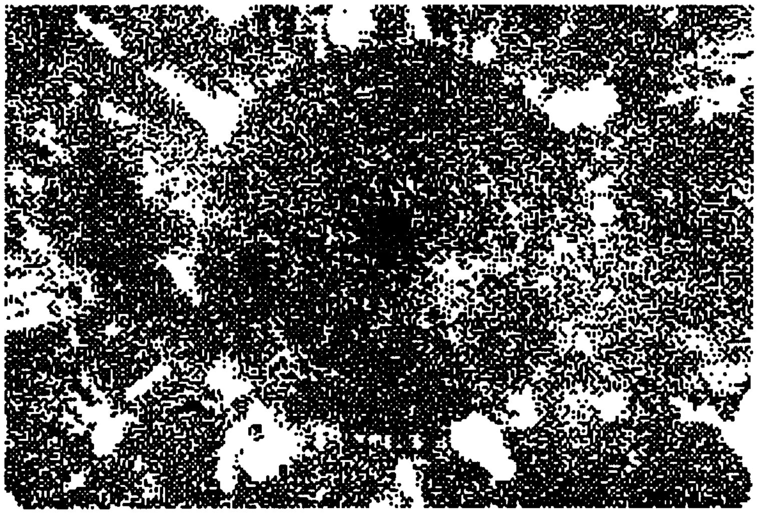
۳-۴- شناسایی هسته های جوانه زا

به منظور شناسایی ماهیت ذراتی که گرافیت بر روی آنها جوانه می زنند مرکز کره های گرافیت که توسط Sic و Fesi جوانه زائی شده بودند، توسط میکروسکوپ الکترونی SEM آنالیز شدند. آنالیز میکروپروب برای شناسایی ترکیب شیمیایی آنها صورت گرفت. تصاویر ۱-۴ و ۲-۴ کره های گرافیتی که توسط SiC جوانه زائی شده اند را در بزرگنمایی ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ نشان می دهد.

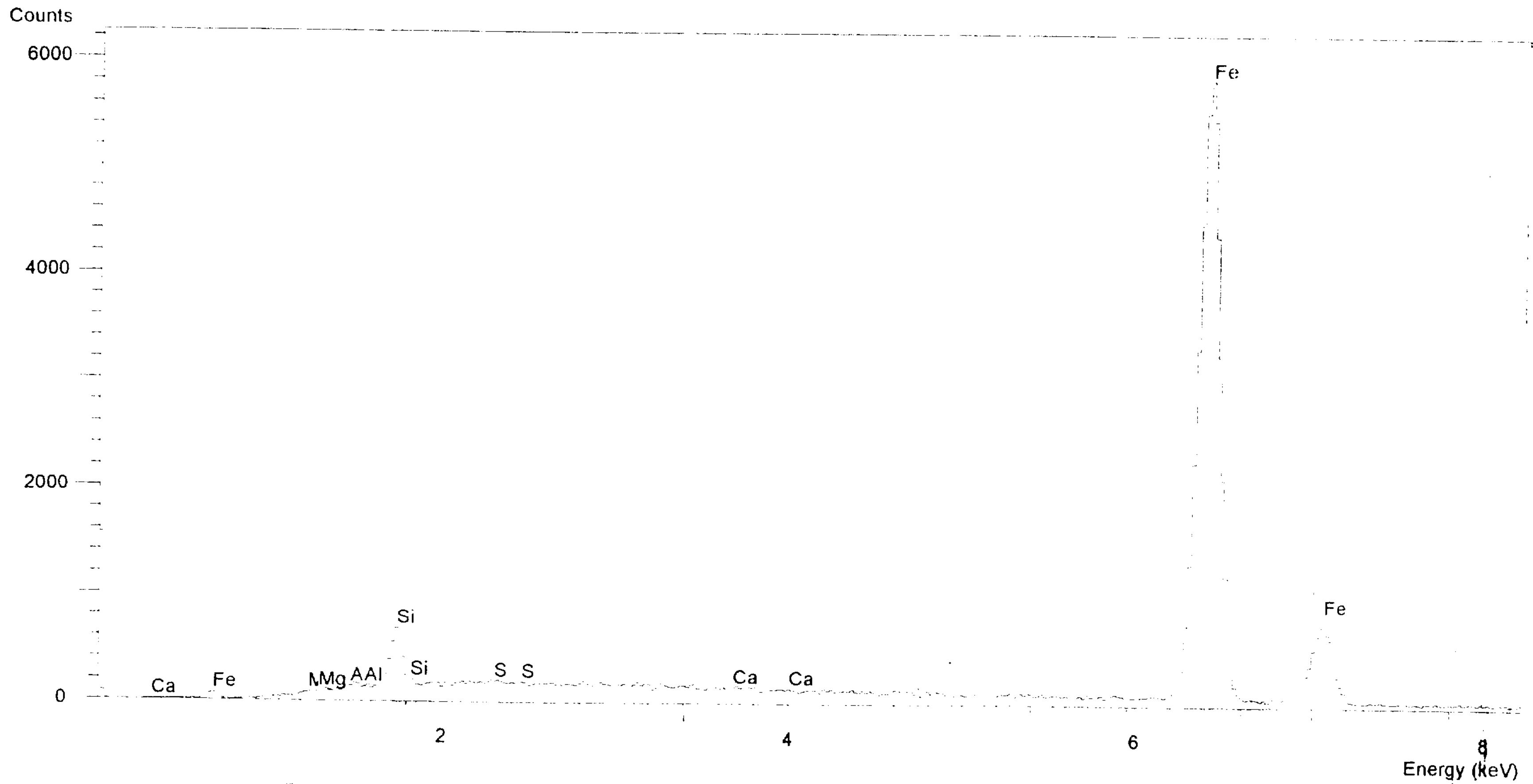
شکلهای۳-۴ و ۴-۴ نیز آنالیز ذره داخل کره های گرافیت در دو حالت جوانه زائی شده با SiC و FeSi می باشند.



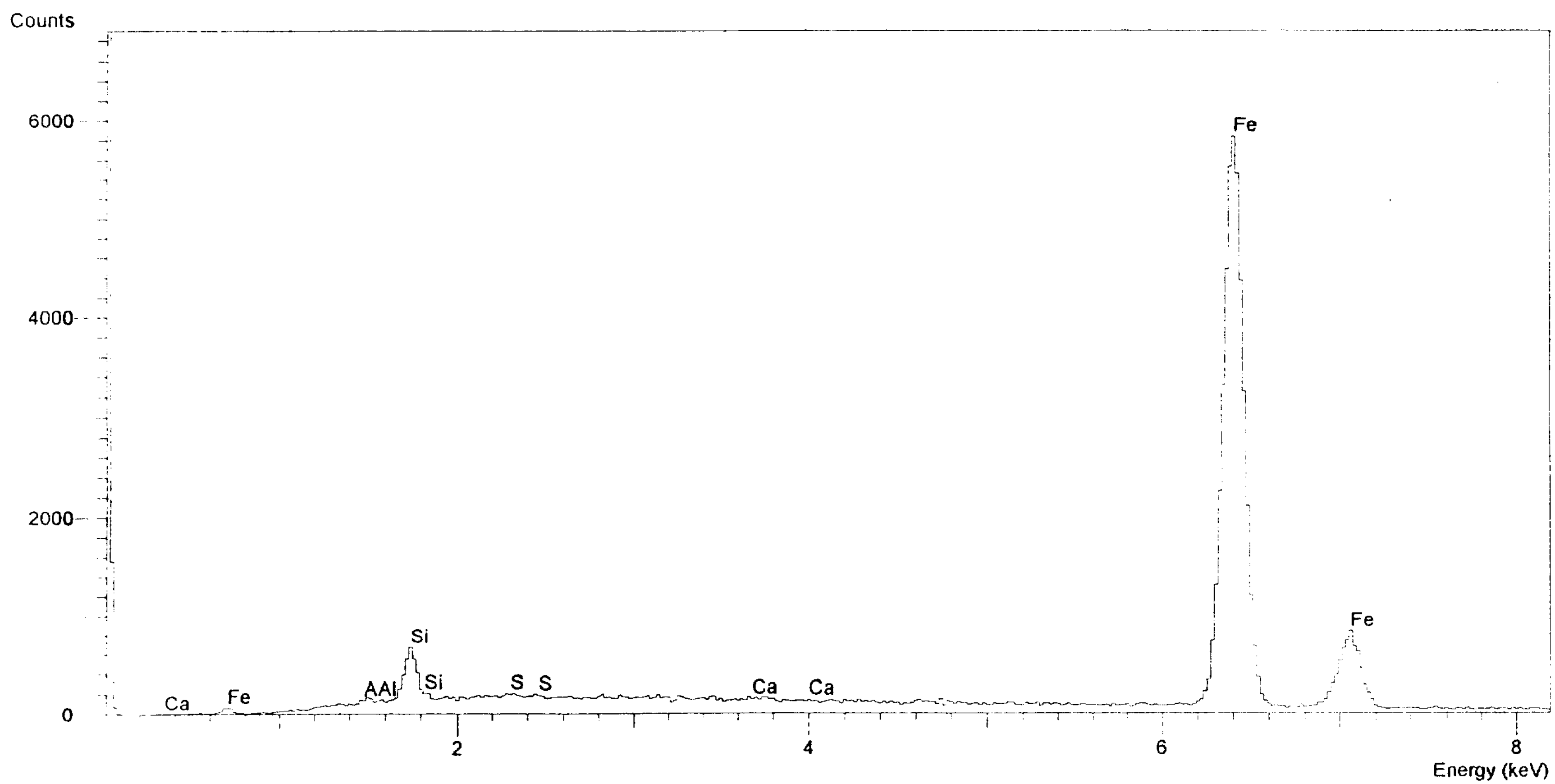
شکل(۱-۴): تصویر کره گرافیت از چدن جوانه زایی شده توسط SiC
تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی(SEM) با بزگنمایی ۲۰۰۰



شکل(۲-۴): تصویر کره گرافیت از چدن جوانه زایی شده توسط SiC ،
تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی(SEM) با بزگنمایی ۳۰۰۰



شکل(۳-۴): آنالیز شیمیایی مرکز کره گرافیت جوانه زایی شده با کاربید سیلیسیم که توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) تهیه شده است

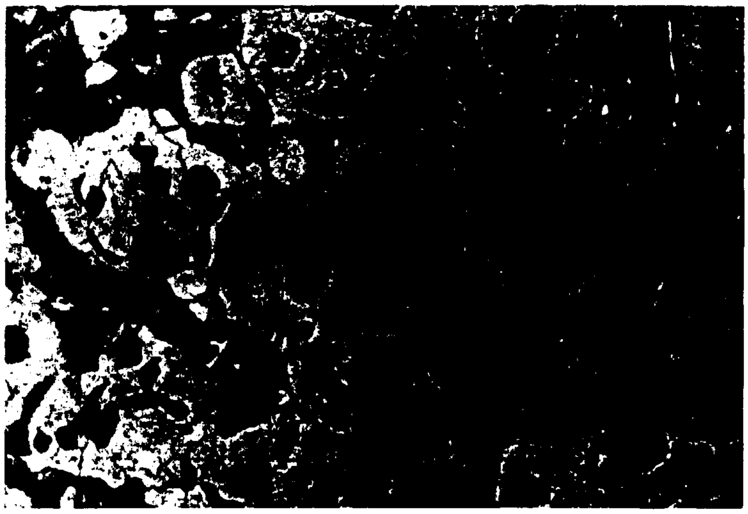


شکل(۴-۴) آنالیز شیمیایی مرکز کره گرافیت جوانه زایی شده با FeSi که توسط میکروسکوپ الکترونی SEM تهیه شده است.

۴-۴- درصد بهینه SiC

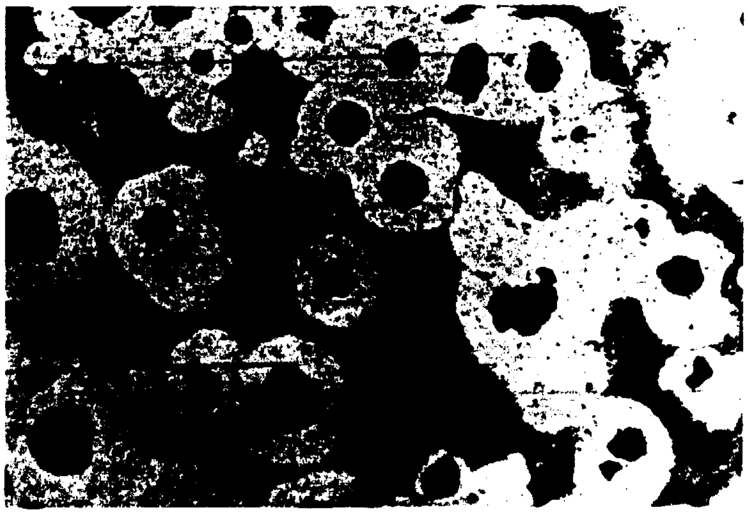
۱-۴-۴- تصاویر میکروسکپی

تصاویر ۵-۴ تا ۱۱-۴ ساختار میکروسکپی چـدن داکتیـل در نمونـه هـای Y-block را بـا بزرگنمایی ۲۰۰ و مشخصات زیر نشان می دهد.



شکل(۵-۴): تصویر میکروسکوپ نوری از ساختار چدن داکتیل
بدون افزودن مواد جوانه زا(بزگنمایی ۲۰۰)

شکل(۶-۴): تصویر میکروسکوپ نوری از ساختار چدن داکتیل
جوانه زایی شده با ۰/۱٪ کاربید سیلیسیم (بزگنمایی ۲۰۰)

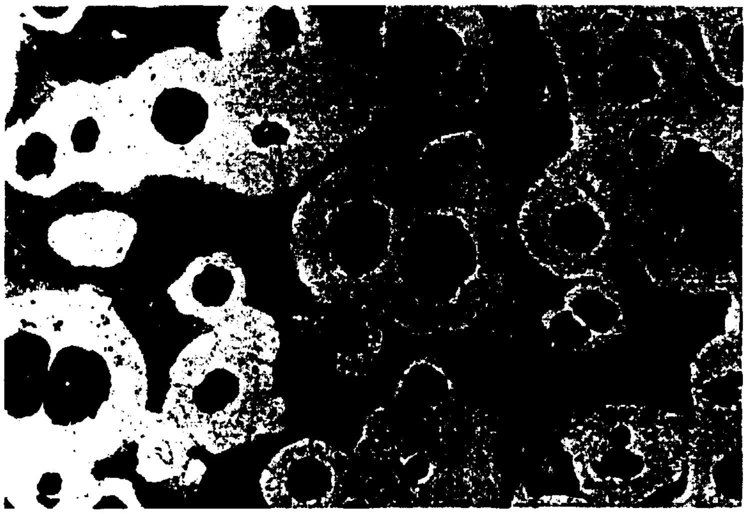


شکل(۷-۴): تصویر میکروسکوپ نوری از ساختار چدن داکتیل

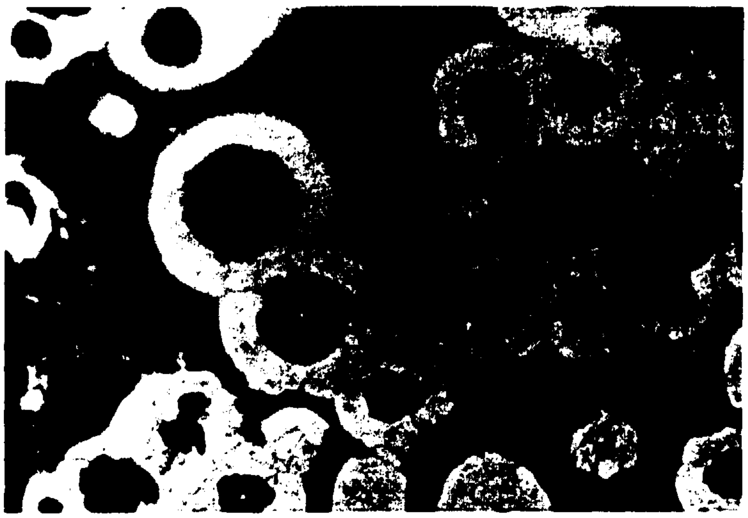
جوانه زایی شده با ۰/۲٪ کاربید سیلیسیم (بزگنمایی ۲۰۰)

شکل(۸-۴): تصویر میکروسکوپ نوری از ساختار چدن داکتیل

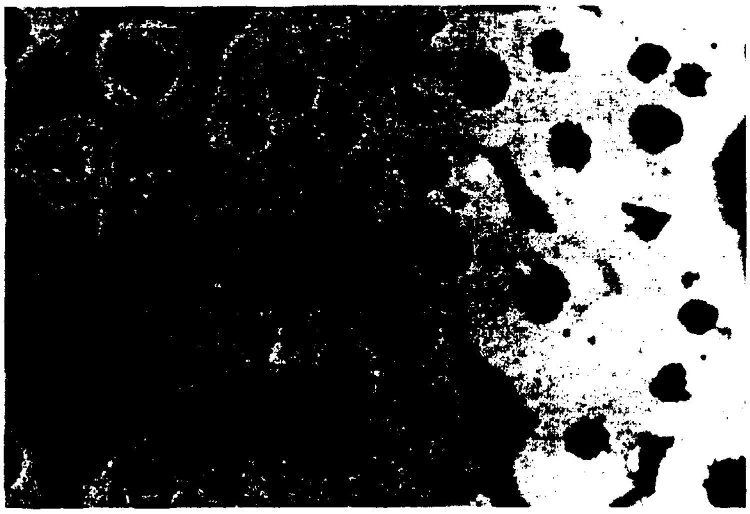
جوانه زایی شده با ۰/۳٪ کاربید سیلیسیم (بزگنمایی ۲۰۰)



شکل(۹-۴): تصویر میکروسکوپ نوری از ساختار چدن داکتیل
جوانه زایی شده با ۰/۴٪ کاربید سیلیسیم (بزرگنمایی ۲۰۰)



شکل(۱۰-۴): تصویر میکروسکوپ نوری از ساختار چدن داکتیل
جوانه زایی شده با ۰/۵٪ کاربید سیلیسیم (بزرگنمایی ۲۰۰)



شکل(۱۱-۴): تصویر میکروسکوپ نوری از ساختار چدن داکتیل
جوانه زایی شده با ۰/۵٪ فروسیلیسیم (بزگنمایی ۲۰۰)

۲-۴-۴- تعداد کره های گرافیت(nodule count)

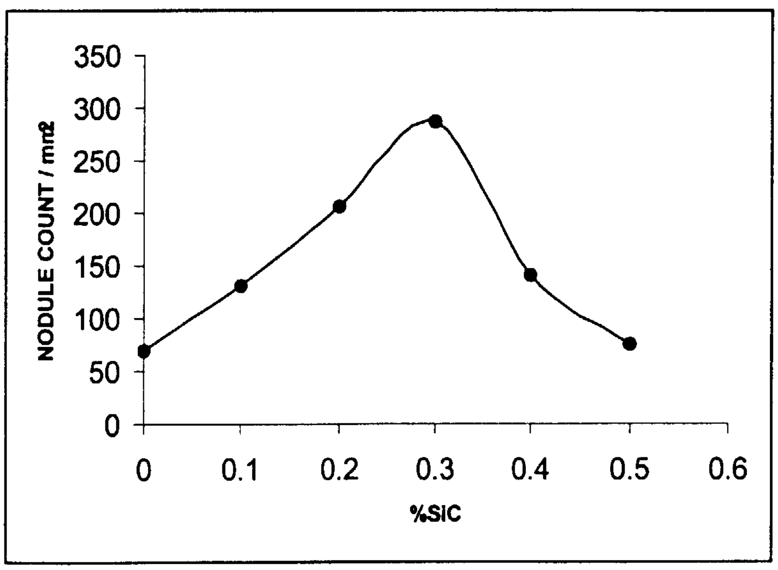
تعداد کره های گرافیت در واحد سطح برای هر کدام از نمونه ها محاسبه شد کـه نتـایج آن در جدول(۲-۴) آمده است.

جدول(۲-۴): تعداد کره های گرافیت در واحد سطح

درصدجوانه زا	۰	۰/۱ SiC	۰/۲ SiC	۰/۳ SiC	۰/۴ SiC	۰/۵ SiC	۰/۵ FeSi
تعداد کره در میلیمتر مربع	۶۸/۳	۱۳۱/۴	۲۰۵/۷	۲۸۵/۷	۱۴۰	۷۵	۱۹۴/۳

مشاهده می شود که تعداد کره های گرافیت در حالت بدون افزودن مـواد جوانـه زا کمـترین مقدار ودر حالت جوانه زایی شده با ۰/۳٪ کاربید سیلیسیم بیشـترین مقـدار اسـت. بـا افـزودن ۰/۵٪ فرو سیلسیم نیز تعداد کره ها به ۱۹۴/۳ می رسد.

شکل(۱۲-۴) چگونگی تغییرات تعداد کره های گرافیت بر حسب درصـد موادجوانـه زا را نشـان می دهد.



شکل(۱۲-۴): نمودار تغییرات تعداد کره ها بر حسب درصد مواد جوانه زا

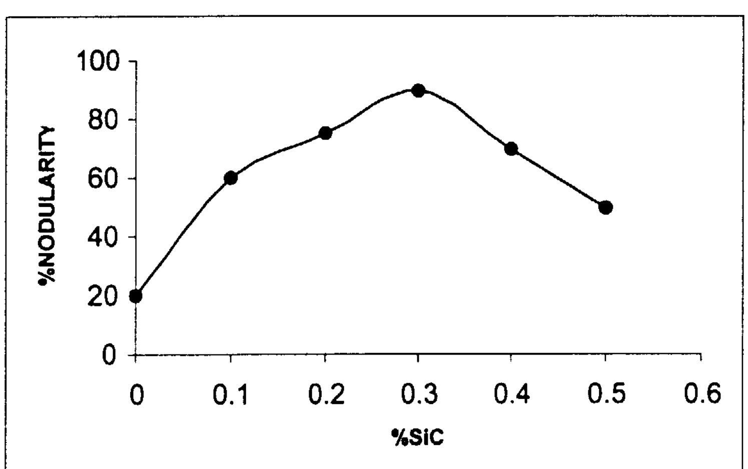
۳-۴-۴- میزان کروی شدن nodularity

به منظور تعیین میزان کروی شـدن گرافیـت هـا ، برطبـق اسـتاندارد و از روش مقایسـه ای استفاده گردید. جدول(۳-۴) نتایج حاصل را نشان می دهد.

جدول(۳-۴): میزان کروی شدن گرافیتها

درصدجوانه زا	۰	۰/۱ SiC	۰/۲ SiC	۰/۳ SiC	۰/۴ SiC	۰/۵ SiC	۰/۵ FeSi
درصد کروی شدن	۲۰	۶۰	۷۵	۹۰	۷۰	۵۰	۸۰

در اینجا نیز کمترین میزان کروی شدن در حالت عدم استفاده از مواد جوانـه زا و بیشـترین مقدار در حالت افزودن ۰/۳٪ کاربید سیلیسیم است.میزان کروی شدن در حـالت افـزودن ۰/۵٪ فروسیلسیم در حدود ۸۰٪ می باشد.در شکل(۹-۴) می توان تغییرات حاصل را مشاهده نمود.



شکل(۱۳-۴): نمودار تغییرات میزان کروی شدن بر حسب درصد مواد جوانه زا

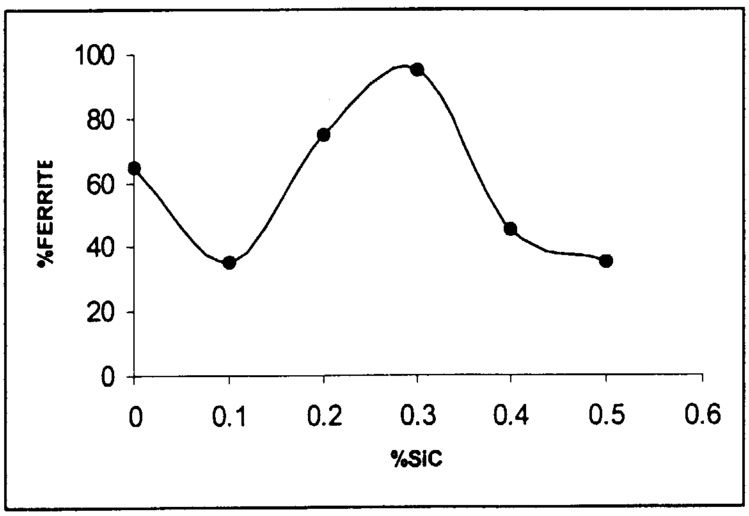
۴-۴-۴- فریت

برای محاسبه درصد فریت زمینه نیز با اســتفاده از تصـاویر اســتاندارد و از روش مقایســه ای استفاده شد.جدول(۴-۴) میزان فریت زمینه را برای مقادیر مختلف جوانه زا نشان می دهد.

جدول(۴-۴): درصد فریت نمونه ها

درصد جوانه زا	۰	۰/۱ SiC	۰/۲ SiC	۰/۳ SiC	۰/۴ SiC	۰/۵ SiC	۰/۵ FeSi
درصد فریت	۶۵	۳۵	۷۵	۹۵	۴۵	۳۵	۷۵

پس از محاسبه درصد فریت مشاهده شد که کمترین مقدار درصد فریت در حالت استفاده از ۰/۱٪ و بیشترین مقدار آن برای حالت ۰/۳٪ جوانـه زای SiC مـی باشـد. بـا اسـتفاده از ۰/۵٪ جوانه زای FeSi میزان فریت به ۰/۷۵٪ می رسد.شکل(۴-۱۴) روند تغییزات را نشان می دهد



شکل(۴-۱۴): درصد فریت بر حسب درصد جوانه زا

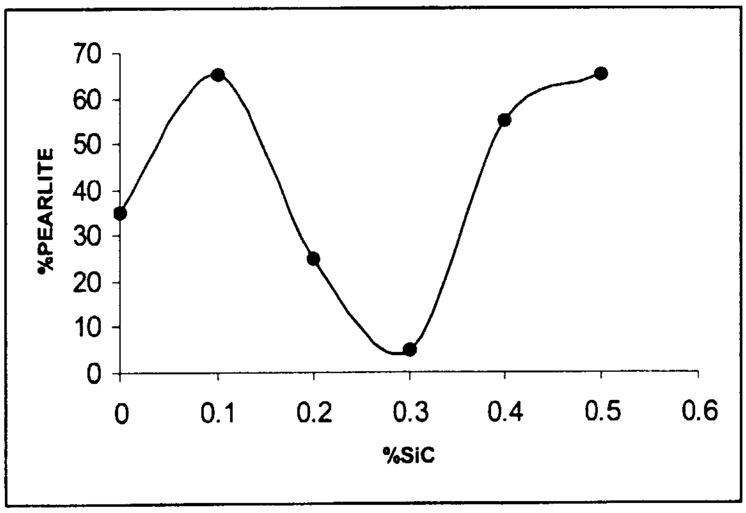
۵-۴-۴- پرلیت

مقادیر پرلیت موجود در زمینه نیز همانند مقادیر فریت محاسبه شد.جدول(۵-۴) نتایج حاصله را نشان می دهد.

جدول(۵-۴): درصد پرلیت نمونه ها

درصد جوانه زا	۰	۰/۱ SiC	۰/۲ SiC	۰/۳ SiC	۰/۴ SiC	۰/۵ SiC	۰/۵ FeSi
درصد پرلیت	۳۵	۶۵	۲۵	۵	۵۵	۶۵	۲۵

کمترین مقدار پرلیت در حالت اقزودن ۰/۳٪ و بیشترین مقدار آن هنگام افزودن ۰/۱٪ جوانه زای SiC می باشد. در حالت افزودن ۰/۵٪ فروسیلسیم مقدار پرلیت حدود ۲۵٪ است. شکل(۱۵-۴) چگونگی تغییرات را نشان می دهد.



شکل(۱۵-۴): درصد پرلیت بر حسب درصد مواد جوانه زا

فصل پنجم

خلاصه نتایج و پیشنهادات

۱-۵- خلاصه نتایج

۱-با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی کاربید سیلیسیم بهترین روش جهت انجام عملیات تلقیح روش تک مرحله أی می باشد.

۲-محدوده دانه بندی کاربید سیلیسیم برای افزودن به مذاب بر اساس حلالیت کامل وعدم میرایی در دما و زمان عملیات تلقیح تک مرحله ای در حدود ۲ میلیمتر می باشد.

۳-مقدار اپتیمم کاربید سیلیسیم افزودنی جهت بدست آوردن بهترین ریزساختار خواص مکانیکی، ۰/۳ درصد وزنی مذاب است.

۴-بهبود خواص مکانیکی و ریز ساختار درحالت استفاده از ۰/۳ درصد کاربید سیلیسیم نسبت به حالت افزودن ۰/۵ درصد FeSi بیشتر است.

۵-با کاهش سرعت سرد شدن یا با افزایش مدول قطعه تأثیر کاربید سیلیسیم در عمل جوانه زنی گرافیت کمتر می شود.

۶-پیشنهاد می شود بازده بیشتر SiC در عمل جوانه زایی به دلیل تشکیل کلاسترهای کربن پراکنده در مذاب می باشد که به دلیل مشابهت ساختار کریستالی با گرافیت، جوانه زنی را تسهیل می کند.

۲-۵-پیشنهادات

۱-بررسی تـأثیر کـاربید سیلیســیم بـه عنـوان جوانـه زای اصلـی(post inoculation) بـر روی ریزساختار و خواص مکانیکی چدن داکتیل در حالت تلقیح در قالب(In mould).

۲-تحقیق در زمینه استفاده از کاربید سیلیسیم به عنوان پیش تلقیح(pre inoculation) جـهت تهیه مذاب اولیه چدن داکتیل از کوره کوپل.

۳-بررسی وتحقیق در زمینه استفاده از کاربید سیلیسیم به عنـوان پیـش تلقیـح جـهت بـهبود کیفیت مذاب حاصل از کوره دوار جهت تهیه چدن داکتیل.

۴-تحقیق به منظور استفاده از کاربید سیلیسیم به عنوان پیش تلقیح برای تهیه چـدن داکتیـل از قراضه های فولادی.

۵-بررسی نقش کاربید سیلیسیم به عنوان آلیـاژ سـاز و اکسـیژن زدا در عملیـات فـولاد سـازی (فولاد های آلیاژی).

منابع

1- Iron Casting Handbook, Published by Iron Casting Socity, ASM, 1981.

2- Richard.WHeine,Carl.R.Loper, Principles Of Metal Casting, Tata McGraw-Hill Company, 1983.

3- D.O.Morton, M.D.B.Bryant, "75 Years of Inoculation Techniques, Foseco International Limited, Published in British Foundryman, pp.183-186, 1979

۴- تازش. حمیدرضا، تهیه پودر کربور سیلیسیم، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی، ۱۳۷۴.

5- Encyclopedia of Chemical Technology, Vol.4.PP.520-34, 1976.

۶- ا. حلوایی، ز. علی نعمتی، "کاربرد های کربور سیلسیم در صنعت"، مجله شماره(۱) ،۱۳۷۶.

7- I.Ripson, M.Chisamera, "The Industrial Experience in Using Silicon Carbides in Furnace Iron Making", Metalurgia, Vol.10.pp.40-47, 1992.

8- S.Venkateswaran, J.Wilfing, WD.Schubert, B.Lux, T.Benecke, "Influence of Sic and Fesi Addition on the Microstructure ,Cooling Curve and shrinkage Prosity of Ductile Iron",Foundry&Heat Treatmen SA, Vol.6, No4, 1998.

9- B.lux,"The Investigation of the Influence of Silicon Carbide in The Production Of Ductile Cast Iron", Foundryman, October 1994.

10- Metals Handbook,Vol.15., 9th, 1989

11- Source Book On Nodular Ductile Iron, Published by American Socity for Metals, 1977.

12- G.Fr.Hillner, “Mold Inoculation of Gray and Ductile Cast Iron-New Solution to Old Problem”,AFS Transactions, pp.167-172, 1975.

13- G.J.Davis, Soldification And Casting, Applied Science Publishers LTD, London, 1973.

14) T.Skaland, T.Grong, “A Model for the Graphite Formation in Ductile Cast Iron: Part I.Inoculation Mechanisms” Metallurgical Transactions, Vol..24A. PP.2321-2345, October 1993.

15- Roy.Elliot, Cast Iron Technology, Published by Butterworths, London, 1988.

16- T.Skaland, “Inoculation Mechanisms”, Metallurgical Transactions, Vol.12A. PP.1031-1045, 1981.

17- B.Lux, “Nucleation of Grafite in Inoculated Cast Iron”, Modern Casting, 1964

۱۸- مرعش.مرعشی، متالورژی کاربردی چدنها(نشکن،چکش خوار،فشرده)، ۱۳۷۲

19- G.M.Goodrich, D.P.Jones, “Factors Affecting Ductile Iron Nodule Count: A literature Review”, AFS Transactions, pp.1031-1037,1993.

20- D.R.Askeland, S.S.Gupta, “Effect of Nodule Count and Cooling Rate on the Matrix of Nodular Cast Iron”AFS Transactions, pp.313-320, 1975.

21- ASTM Standard:A536-84, “Standard Specification for Ductile Iron Casting”, Vol.01-02.pp.296-300, 1985.

۲۲- م.گلچین، م.دهنوی، "بررسی اثر کاربید سیلیسیم به عنوان جوانه زا در چدن های خاکستری" ، دهمین سمینار سالانه جامعه ریخته گران ایران، اردیبهشت۷۷، دانشگاه صنعتی اصفهان، ص۹۵.

23- E.Campomanes, R.Goller, “0ne Step Treatment for Ductile Iron”, AFS Transactions, pp.428-432, 1973.

24- ASTM Standard: A327-72, "Standard Method of Impact Testing of Cast Iron", Vol 01-02, pp.141-143, 1985.

25- A.Bedolla, B.Hernandez, "Effect of CaSi, FeSiMg and CaSi-GA as inoculants in Ductile Iron", AFS Transactions, pp.715-722, 1997.

26- G.M.Goodrich, "Cast Iron Microstructure Anomalies and Their Causes", AFS Transactions, pp.669-682, 1997.

27- A.Lazaridis, F.J.Worzala, C.R.Loper, R.W.Heine, "Fracture Toughness of Ductile Iron", AFS Transactions, 1971.

28- F.J.Warzala, R.W.Heine, Y.W.Cheng, "Toughness of Malleable and Ductile Iron", AFS Transactions, 1976.

ABSTRACT

The Effect of SiC as Inoculant on The Microstructure and Mechanical Properties Of Ductile Iron

BY

HOSEIN ALI KESHAVARZI

In this work, effect of SiC as post inoculant on the microstructure(ferrite and pearlite content, nodularity and nodule count) and mechanical properties of ductile iron was investigated. To stablish the position of SiC compared with other inoculant used in casting practice, similar experiments was done using ferrosilicon.

Melts were prepared in a crucible furnace by applying the one step treatment of inoculation and nodularization. Based on the solubility and no-fading effectiveness of inoculants, 0.1 to 0.5 weight percent of SiC, 2mm in size, and %0.5 ferrosilicon %75, 3 to 5mm in size, were aded to the melts.

Test samples were prepared by ASTM standard Y-block model and the step-plate model to verify the effect of cooling rate on the effectiveness of SiC as an inoculant.

Results showed that the addition of 0.3 weight percent SiC resulted in the best microstructure consisting of high ferrite content, high nodularity and nodule count, maximum toughness and elongation, suitable yield and tensile strengh compared to the 0.5 weight percent of ferrosilicon.

Investigation of the microstructure and hardness of the step-plate samples show that with decreasing cooling rate, the role of inoculant in creation of nodularity and nodule count decreased due to longer soldification time.

IN THE NAME OF GOD

THE EFFECT OF SiC AS POST INOCULANT ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF DUCTILE IRON

BY

HOSEIN ALI KESHAVARZI

THESIS

SUBMITTED TO THE SCHOOL OF GRADUATE STUDIES IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE (MSc)

IN

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING
(SELECTION OF MATERIALS)

SHIRAZ UNIVERSITY
SHIRAZ, IRAN

EVALUATED AND APPROVED BY THE THESIS COMMITTEE AS: EXCELLENT

K. Janghorban ....K. JANGHORBAN, Ph.D, PROF.OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING (CHAIRMAN)

......A. Dehghan............ A. DEHGHAN, Ph.D, ASSISTANT PROF.OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING (CHAIRMAN)

A. Nazarboland .... A. NAZARBOLAND, Ph.D, ASSISTANT PROF.OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

M.H. PAYDAR...............M.H PAYDAR, Ph.D, ASSISTANT PROF.OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

DEC 2001