

تأثیر شرایط جوانه زنی بر ساختار میکروسکوپی چدن های خاکستری

علیرضا محسنی مقدم
کارشناسی ارشد

محمد علی بوترابی
دانشیار

دانشکده مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران
مرکز تحقیقات ریخته گری

چکیده

در تحقیق حاضر تأثیر ترکیب شیمیایی جوانه زا، محل اضافه کردن جوانه زا و صلیبیت قالب بر ساختار میکروسکوپی چدن های خاکستری بررسی شده است. برای این منظور از سه نوع جوانه زای زیرسینوک، سوپرسید و فروسیلیسیم استفاده شد. جوانه زنی به دو روش تسلیح در پاتیل و قالب صورت گرفته است و قالب های مورد استفاده از نظر سختی شامل سه گروه: قالب ماسه تر با سختی ۴۵-۵۰، قالب ماسه تر با سختی ۶۵ - ۶۰ و قالب CO₂ به عنوان قالب صلب می باشند. برای اینکه امکان مقایسه نتایج وجود داشته باشد، ترکیب شیمیایی چدن، مقدار فوق ذوب و دمای بارریزی، اندازه (ابعاد) و مقدار مصرف مواد جوانه زا، ثابت نگه داشته شدند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهد که استفاده از زیرسینوک داخل پاتیل کمترین عمق تبرید، کوچکترین مقدار DAS و کمترین قطر دانه را می دهد. افزایش سختی قالب، سبب افزایش توان تبریدی و عمق تبرید نمونه ها و افزایش درصد گرافیت نوع D می شود. استفاده از سوپرسید بیشترین سختی و بیشترین درصد گرافیت نوع A را به همراه دارد. سختی نمونه ها بیشتر حاصل از درصد پرلیت زمینه بوده و مورفولوژی گرافیت نقش بسزایی در تعیین ساختار زمینه دارد.

The Effects of Inoculation Conditions on the Micro Structure of Grey Cast Iron

M. Ali Boutorabi
Associate professor

A. Mohseni Moghaddam
M. Sc.

Materials & Metallurgy Dept., IUST

Abstract

The Investigation deals with the effects of inoculation conditions and mould rigidity on the microstructure and feeding behaviour of grey cast iron. For this reason Ferrosilicon, Superseed and Zircinoc were selected as inoculants. They were added to the melt by the ladle or mould inoculation technique. The effects of mould rigidity, were evaluated by using low hardness greensand moulds (45-50), medium hardness greensand moulds (60-65) and silica sand moulds bonded with sodium silicate. Running system was designed regarding the critical gate velocity theory (0.5 m/s). Y-block and wedge test pieces were cast followed by; chill depth measurement, study of mould dilation and it's relation with

shrinkages, hardness test, study of microstructure and macrostructural experiments.

The results indicate that adding Zircinoc reduces the chill depth and produces the lowest amount of chill, smaller DAS and finest cells. The presence of Zr, Ca and Al in inoculants have had the most effect on decreasing the chill depth. Rigidity of mould results in increasing the chill tendency and enhancing the D type graphite formation. Superseed shows the best results in according to casting accuracy and producing castings with highest hardness and most percentage of A type graphite. Volume of pipe will decrease with increasing the mould rigidity. In grey irons most of the microporosities are in the form of interdendritic shrinkage. Casting hardness is more affected by percentages of pearlite in matrix and morphology of graphite has identical effects on matrix structure.

مقدمه

نتایج تحقیقات انجام شده در مورد نقش و مکانیسم جوانه زایی را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

الف) کاهش تمایل به تبرید و ایجاد چدن خالدار، افزایش داکتیلیته، کاهش خطر ترک خوردگی هنگام تخلیه قالب و تمیزکاری.

ب) افزایش تعداد سلول های یوتکتیکی، کاهش مادون انجماد و در نتیجه کاهش کاربیدها و جدایش های بین سلولی و اصلاح مورفولوژی گرافیت.

ج) تشکیل ساختاری همگون و یکنواخت در قسمت های مختلف و بهبود خواص مکانیکی و خصوصیات ماشینکاری.

د) امکان ریخته گری قطعات نازک بدون تشکیل کاربید و در نتیجه حذف عملیات حرارتی جهت از بین بردن کاربیدها.

ترکیب بیشتر مواد جوانه زا بر پایه فروسیلیسیم می باشد. تحقیقات Moore نشان می دهد که سیلیسیم یا فروسیلیسیم خالص هیچ اثر جوانه زایی ندارند [۱]. در فروسیلیسیم های تجاری، قدرت جوانه زنی با افزایش کلسیم و آلومینیم بهبود می یابد [۲]. Filkins نشان داد که آلیاژهای پایه کلسیم و فروسیلیسیم های غنی از کلسیم بهترین مواد جوانه زا هستند [۳]. جوانه زایی که حاوی کلسیم و تیتانیم هستند، در کاهش تبرید فوق العاده عمل می کنند [۴]. باریم یک عامل جوانه زنی قوی برای گرافیت یوتکتیکی بوده و مقاومت آن در برابر میرائی بهتر است [۴]. وجود زیرکونیم باعث افزایش تعداد سلول های یوتکتیکی می شود [۵]. تحقیقات Francis در زمینه مکانیزم های جوانه زنی نشان داد که هسته های گرافیت ورقه ای از جنس ذرات سولفیدی بوده و دارای یک محدوده ترکیبی می باشند. این هسته ها

کروی شکل و با قطری حدود $5\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$ هستند و آزمایش های شیمیایی که روی این هسته ها انجام شده، مقادیر زیادی اکسیژن در هسته های گرافیت ورقه ای که در هسته های گرافیت کروی مشاهده نمی شوند را نشان داد [۶]. Jacob و همکارانش ادعا کرده اند که کره های گرافیتی به صورت ناهمگون بر روی ذراتی جوانه زنی می کنند که خود دارای ساختاری مرکب هستند و شامل یک لایه خارجی از اکسیداسپینل عناصر (Ti, Si, Al, Mg) بوده که جوانه زنی خود این لایه توسط ذرات سولفیدی (Mg, Ca) یا (Mg, Ca, Sr) صورت می گیرد [۷]. میرائی مواد جوانه زا پدیده ای است که به سرعت انحلال هسته ها، یا ذرات گرافیت در مذاب، بستگی دارد. بسیاری از محققین معتقدند که در چدن هایی که مقدار گوگرد پایین است، میرائی بسیار سریع به موقع می پیوندد، در حالی که میرائی مواد مختلف با سرعت های متفاوت روی می دهد [۸، ۹]. با توجه به مقدمات فوق و هدف از انجام این تحقیق، آزمایش های اندازه گیری عمق تبرید؛ اندازه گیری سختی نمونه؛ تعیین نوع، درصد و اندازه گرافیت، تعیین درصد فریت، پرلیت و کاربید زمینه، اندازه گیری فاصله بین بازوهای دندردیتی (DAS) و اندازه گیری تعداد سلول های یوتکتیکی در واحد سطح (تعیین قطر متوسط دانه) انجام شد.

روش آزمایش

برای انجام این آزمایش از سه نوع جوانه زا؛ زیرسینوک، سوپرسید و فروسیلیسیم استفاده شد، که ترکیب شیمیایی هر کدام در جدول ۱ آمده است. اضافه کردن مواد جوانه زا به دو روش تلقیح در پاتیل و تلقیح

جدول (۱) ترکیب شیمیایی مواد جوانه‌ای مصرفی

نوع جوانه‌زا	Si %	Al %	Ca %	سایر عناصر
زیرسینوک zircinoc	۷۵	۱/۲۵	۲/۲۵	Zr% = ۱/۵۵
فروسلیسیم Fe-Si	۷۳-۷۹	۱/۵Max	۱ Max	P% = ۰/۰۵ Max S% = ۰/۰۴ Max C% = ۰/۱ Max
سوپرسید Superseed 75	۷۳-۷۸	۰/۵ Max	۰/۱ Max	Sr% = ۰/۶-۱

جدول (۲) ترکیب شیمیایی مذاب

CE %	C %	Si %	Mn %	S %	P %
۳/۸-۴/۰۵	۳/۱۵-۳/۳۵	۱/۹-۲/۱	۰/۴-۰/۵	۰/۰۸-۰/۱	۰/۰۵Max

نتایج

نتایج عمق تبرید در جدول ۳ و شکل‌های ۲ تا ۵ آمده است. همانطور که ملاحظه می‌شود بیشترین عمق تبرید مربوط به حالتی است که تلقیح انجام نشده و کمترین مقدار با استفاده از جوانه زنی زیرسینوک در پاتیل به دست آمده است. این نمودارها به خوبی مشخص است که با تغییر مشخصات قالب، مقدار عمق تبرید نیز تغییر می‌کند. مقادیر حاصل از آزمایش سختی در جدول ۴ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین سختی در حالتی به دست آمده که از جوانه‌زای سوپرسید داخل پاتیل (نمونه‌های به دست آمده از قالب CO₂)، استفاده شده است.

جدول ۵ مشخصات گرافیت را به طور اجمال نشان می‌دهد. (در تمام موارد شکل گرافیت ورقه‌ای بوده و علامت آن VII است). مقادیر کمی فازهای زمینه در جدول ۶ آمده است. استفاده از سوپرسید و فروسیلیسیم بیشترین مقادیر پرلیت را باعث شده و کمترین مقدار مربوط به حالتی است که عملیات تلقیح انجام نشده باشد. تغییرات درصد پرلیت زمینه با نوع جوانه‌زا و

داخل قالب صورت گرفت که برای حالت تلقیح داخل پاتیل، مواد جوانه‌زا به میزان ۰/۳ - ۰/۲۵ درصد وزنی و با ابعاد ۱-۱/۵mm به پاتیل اضافه شدند. این مقادیر برای حالت تلقیح داخل قالب، ۰/۱ درصد وزنی و با ابعاد ۰/۷-۰/۵mm می‌باشند. (محل اضافه کردن مواد جوانه‌زا، حوضچه پای راهگاه می‌باشد)، [۱۲ و ۱۱]. در هر مرحله از بارریزی از سه نوع قالب با سختی‌های ۴۵-۵۰، ۶۵-۶۰ و قالب CO₂ استفاده شد و در هر قالب یک نمونه Y بلوک با ابعاد A=۲۵mm (مطابق استاندارد ASTM-A436) و یک نمونه گوه (گوه W3 مطابق استاندارد ASTM-A367) ریخته شد، [۱۴ و ۱۳]. طراحی سیستم راهگاهی با رعایت سرعت بحرانی مذاب در راهباره‌ها (0.5 m/s) صورت گرفت که شکل سیستم راهگاهی با رعایت سرعت بحرانی مذاب، در راهباره‌ها (0.5 m/s) صورت گرفت. که شکل سیستم راهگاهی و طرز استقرار مدل‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است، [۱۵]. ترکیب شیمیایی مذاب مورد استفاده در جدول ۲ آمده است. این ترکیب برای ریخته‌گری سیلندر موتور پیکان استفاده می‌شود و مواد مصرفی شارژ کوره عبارتند از: قراضه آهن پرس شده، برگشتی چدن، گرافیت، فروسیلیسیم و فرومنگنز. عملیات ذوب در کوره القایی صورت گرفت و پس از ذوب کامل نمونه کوانتومتری تهیه شده و پس از آنالیز، عمل سرباره‌گیری با پودر سلاکس انجام می‌گیرد. کنترل دما توسط ترموکوپل انجام شده و به این وسیله سه دما قابل اندازه‌گیری خواهد بود:

۱ - حداکثر دمای مذاب داخل کوره (۱۵۰۰ °C)

۲ - دمای تلقیح داخل پاتیل (۱۴۵۰ °C)

۳ - دمای بارریزی (۱۴۱۰ °C)

بعد از انجام مراحل ریخته‌گری با شرایط فوق، اندازه‌گیری عمق تبرید با شکستن گوه‌های ریختگی از وسط انجام شد. اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها به روش برینل و استاندارد 3000/10 صورت گرفته و آزمایش‌های متالوگرافی با تعیین نوع، درصد و اندازه گرافیت و تعیین درصد فریت و پرلیت زمینه انجام شدند و در ادامه فاصله بین بازوهای دندردیتی که یکی از مهمترین کمیت‌های طولی قابل اندازه‌گیری در ساختار میکروسکوپی است، محاسبه شده و در انتها تعداد و اندازه سلول‌های یوتکتیکی مورد مطالعه قرار گرفتند. لازم به ذکر است که برای مطالعه ساختار زمینه از محلول نیتال ۲٪ و برای مطالعه ساختار دانه‌ای از محلول Stead's NO1 استفاده شده است.

جدول (۵) مشخصات گرافیت در نمونه ها

شماره نمونه	توزیع و درصد گرافیت	اندازه گرافیت
۱	۹۰%A ۱۰%D	۴ و ۵ و ۶
۳	۷۰-۸۰%A ۲۰-۳۰%D, E	۵ و ۶
۵	۶۰-۷۰%D ۲۰-۴۰%E	۶ و ۷
۷	۱۰۰%A %D	۴ و ۵ و ۶
۹	۵۰-۶۰%A ۴۰-۵۰%D	۴ و ۵ و ۶
۱۱	۵۰-۷۰%D ۲۰-۳۰%A ۱۰-۲۰%E	۵ و ۶ و ۷
۱۳	۹۰%A بیشتر در لبه ها ۱۰%D	۵ و ۶
۱۵	۷۰-۸۰%A ۲۰-۳۰%D	۵ و ۶
۱۷	۶۰-۷۰%D ۳۰-۴۰%A, E	۶ و ۷ و ۵
۱۹	۷۰-۸۰%A ۲۰-۳۰%D	۵ و ۴
۲۱	۵۰%A ۵۰%D	۵ و ۶
۲۳	۶۰-۷۰%D ۲۰-۳۰%A ۱۰%E	۵ و ۶ و ۷
۲۵	۱۰۰%A	۴ و ۵
۲۷	۱۰۰%A	۴ و ۵
۲۹	۶۰-۷۰%A ۲۰-۴۰%D	۴ و ۵ و ۶
۳۱	۹۰%A ۱۰%D	۴ و ۵
۳۳	۶۰-۷۰%A در لبه ها ۳۰-۴۰%D کمی E	۴ و ۵ و ۶
۳۵	۷۰%D ۳۰%A	۵ و ۶
۳۷	۷۰%A ۲۰%D	۵ و ۶
۳۹	۶۰-۷۰%A ۳۰-۴۰%D	۴ و ۵ و ۶
۴۱	۶۰%D ۲۰%E ۲۰%A	۵ و ۶ و ۷

محل اضافه کردن جوانه را در شکل ۶ و تغییرات سختی قطعه با درصد پرلیت زمینه در شکل ۷ نمایش داده شده اند، مشاهده می شود که با افزایش درصد پرلیت زمینه، سختی افزایش یافته است.

جدول (۳) نتایج عمق تیرید نمونه های گوه

شماره نمونه	قسمت کاملاً سفید Clear chill (mm)	مجموع سفید و خالدار total chill (mm)
۲	۳/۷	۶/۲
۴	۴/۲	۷
۶	۴/۲	۱۰/۵
۸	۲	۲/۶
۱۰	۲/۲	۳/۷
۱۲	۲/۶	۵/۳
۱۴	۲/۸	۳/۶
۱۶	۲/۵	۴/۴
۱۸	۳/۷	۵/۵
۲۰	۱/۳	۲/۳
۲۲	۱/۴	۲/۵
۲۴	۱/۵	۲/۷
۲۶	۱/۴	۱/۸
۲۸	۱/۴	۱/۶
۳۰	نقطه کمی از کنارها سفید شده بود	-
۳۲	۱/۸	۲
۳۴	۱/۶	۳
۳۶	۲/۵	۴
۳۸	-	۲/۴
۴۰	۲/۲	۴/۵
۴۲	۲/۶	۴/۲

جدول (۴) نتایج حاصل از آزمایش سختی (3000/10)

شماره نمونه	سختی نمونه (برینل)	شماره نمونه	سختی نمونه (برینل)
۱	۱۸۳	۲۳	۱۷۹
۳	۱۷۱	۲۵	۱۵۰
۵	۱۶۷	۲۷	۱۵۱
۷	۱۸۷	۲۹	۱۷۴
۹	۱۸۷	۳۱	۱۸۳
۱۱	۱۸۷	۳۳	۱۷۷
۱۳	۱۸۵	۳۵	۱۷۹
۱۵	۱۹۴	۳۷	۱۷۰
۱۷	۲۰۰	۳۹	۱۷۲
۱۹	۱۷۹	۴۱	۱۷۹
۲۱	۱۷۹		

جدول (۶) درصد فریت، پرلایت و کاربید زمینه

شماره نمونه	درصد فریت	درصد پرلایت	درصد کاربید
۱	۳۰-۴۰	۶۰-۷۰	-
۲	بیشتر در لبه ها ۱۵	۸۵	-
۵	۷۰-۸۰	۲۰-۳۰	-
۷	۱۰	۹۰	-
۹	۵	۹۵	-
۱۱	۶۰-۷۰	۳۰-۴۰	-
۱۳	۵	۹۵	-
۱۵	۵	۹۵	-
۱۷	بیشتر در لبه ها ۱۵	۸۵	-
۱۹	۱۵	۸۵	-
۲۱	۲۰	۸۰	-
۲۲	۴۰	۶۰	-
۲۵	۵۰	۵۰	-
۲۷	۵۰	۵۰	-
۲۹	۲۵	۷۵	-
۳۱	۵	۹۵	-
۳۳	۱۰	۹۰	-
۳۵	۵	۹۵	-
۳۷	۱۰	۹۰	-
۳۹	بیشتر در لبه ها ۲۵	۷۵	-
۴۱	۲۰	۸۰	-

جدول (۷) مقادیر فاصله بین بازوهای دندریتی

شماره نمونه	فاصله بین بازوهای دندریتی (μm)
۵	۱۹/۳۱
۱۱	۱۷/۷
۱۷	۲۰
۱۹	۲۵/۶
۲۳	۱۸/۷
۲۹	۱۵/۲
۳۱	۱۹/۳
۳۵	۲۰/۴
۳۷	۱۷/۱
۴۱	۱۷/۷

جدول (۸) تعداد سلول های یونکتیکی در واحد سطح و قطر متوسط دانه

شماره نمونه	تعداد سلول های یونکتیکی بر میلی متر مربع	قطر متوسط دانه (mm)
۱ و ۵	۱/۲	۱/۰۳
۷ و ۱۱	۳/۱۲	۰/۶۴
۱۳ و ۱۷	۳/۱۲	۰/۶۴
۱۹ و ۲۳	۳/۶۹	۰/۵۸
۲۵ و ۲۹	۶/۵۶	۰/۴۳
۳۱ و ۳۵	۳/۳۱	۰/۶۲
۳۷ و ۴۱	۴/۲۱	۰/۵۴

بحث

۱- تأثیر نوع جوانه زا و محل اضافه کردن آن بر عمق تبرید (الف) جوانه زایی با فروسیلیسیم

استفاده از فروسیلیسیم به عنوان جوانه زا، عمق تبرید را نسبت به حالتی که جوانه زنی انجام نشده باشد، به میزان قابل توجهی کاهش می دهد. با توجه به جدول ۱ فروسیلیسیم مصرفی علاوه بر سیلیسیم (۷۳-۷۹٪) حاوی عناصری نظیر $\text{Al} (1/5/\text{Max})$ و $\text{Ca} (1/\text{Max})$ می باشد. در فروسیلیسیم های تجاری، قدرت جوانه زنی با افزایش آلومینیم و کلسیم بهبود می یابد که در این بین

در جدول ۷ مقادیر فاصله بین بازوهای دندریتی (DAS) ارائه شده، همانگونه که مشخص است، کمترین مقدار DAS در حالتی به دست آمده که از زیرسینوک داخل پاتیل استفاده شده است (نمونه هایی که در قالب CO_2 ریخته شده اند). تغییرات DAS با نوع جوانه زا و محل جوانه زنی در شکل ۸ آمده است.

در جدول ۸ تعداد سلول های یونکتیکی در واحد سطح و قطر متوسط دانه ها ارائه شده است. نمونه هایی که در آنها تلقیح انجام نشده دارای کمترین تعداد سلول یونکتیکی و بیشترین قطر متوسط دانه هستند. عملیات جوانه زنی به وسیله زیرسینوک در پاتیل، بیشترین تعداد سلول یونکتیکی و کمترین قطر متوسط دانه را به وجود آورده است.

کلسیم یک عامل بسیار مهم در کنترل تبرید می باشد. کلسیم می تواند در مذاب چدن تشکیل کاربید کلسیم (CaC_2) دهد که اختلاف پارامتر شبکه این ترکیب با گرافیت اندک بوده و می تواند به عنوان یک زیر لایه برای رسوب گرافیت عمل کند. اما در چدن ها معمولاً مقداری گوگرد و اکسیژن وجود دارد که باعث می شوند در دماهای معمول کاربید کلسیم از نظر ترمودینامیکی ناپایدار باشد، چرا که تمایل کلسیم برای ترکیب با گوگرد و اکسیژن بیشتر است. سولفید کلسیم (CaS) نیز از نظر پارامتر شبکه تطابق خوبی با گرافیت دارد و با توجه به پایداری ترمودینامیکی و نقطه ذوب بالا ($2450^\circ C$) می توان از آن به عنوان یک هسته فعال در مذاب چدن یاد کرد. [۱۶ و ۱۷].

تجزیه و تحلیل های تئوریک که تاکنون بر روی مسئله جوانه زنی صورت گرفته، نشان می دهند که امکان جوانه زنی همگون CaO و Al_2O_3 وجود دارد. از سوی دیگر این احتمال نیز وجود دارد که حضور سیلیسیم در ماده جوانه زا باعث اکسیژن زدایی مذاب و تشکیل سیلیس (SiO_2) شود. وجود این سه ترکیب (CaO , SiO_2 و Al_2O_3) توجه ما را به دیگرام سه تایی $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ جلب می کند (شکل ۹). در این سیستم سه تایی احتمال تشکیل ترکیبات متعددی وجود دارد که در این میان نقش $CaO \cdot Al_2O_3$ (Anorthite) $2SiO_2$ در جوانه زنی بیشتر است [۱۷ و ۱۸].

نکته قابل توجهی که در نتایج تحقیق حاضر مشاهده می شود، این است که در تمام حالت ها استفاده از فروسیلیسیم داخل راهگاه تأثیر بیشتری در کاهش عمق تبرید دارد که دلیل آن را می توان در پدیده میرائی جستجو کرد. گذشت زمان بعد از عملیات جوانه زنی توسط فروسیلیسیم در پاتیل، سبب انحلال هسته ها یا ذرات گرافیت می شود. معمولاً این نوع جوانه زا تمایل به تشکیل سیلیکات های کمپلکس داشته که با گذشت زمان به سمت سرباره حرکت می کنند و لذا تعداد زیادی از هسته ها ناپدید شده و باعث کم شدن تأثیر این نوع جوانه زا در پاتیل می شود [۱۹]. یک راه برای رفع این اشکال استفاده از عناصری نظیر Zr , Sr , Ba است که باعث بهبود خواص میرائی فروسیلیسیم می شود، [۲۰ و ۸]. راه دیگر استفاده از این نوع جوانه زا، در آخرین مراحل ریخته گری است. انجام عملیات تلقیح در قالب یکی از راهها است. همانطور که نتایج این تحقیق نشان می دهند، استفاده از فروسیلیسیم داخل قالب در افزایش راندمان بسیار مؤثر است.

ب) جوانه زایی با زیرسینوک

بین مواد مختلفی که به عنوان جوانه زا استفاده شده اند، زیرسینوک در تمام حالت ها، کمترین مقدار عمق تبرید را از خود نشان می دهد. از جدول ۱ پیداست که این ماده علاوه بر سیلیسیم (۷۵٪) حاوی عناصری نظیر Al (۱/۲۵٪)، Ca (۲/۲۵٪) و Zr (۱/۵۵٪) می باشد. لذا این ماده علاوه بر دارا بودن مزایای فروسیلیسیم حاوی عنصر Zr نیز هست. زیرکونیم با گوگرد ترکیب شده و احتمالاً سولفید حاصله به عنوان یک هسته برای جوانه زنی گرافیت یوتکتیک عمل می کند [۵]. علاوه بر این زیرکونیم یک عنصر اکسیژن زدای قوی است، وجود این عنصر باعث تشکیل اکسیدهایی می شود که به عنوان هسته برای SiO_2 عمل می کنند و طبق ادعای بعضی محققین این ترکیب باعث جوانه زنی گرافیت یوتکتیک می شود. وجود این عنصر به عنوان اکسیژن زدا یا گاززدا عمل می کند. مطابق تئوری Boyles، واکنش گاززدایی ممکن است با دو مکانیسم سبب جوانه زنی شود: یکی حذف گازهایی که سبب تبریدی شدن می شوند و دیگر تشکیل آخال هایی که ممکن است در مذاب به عنوان هسته های فعال عمل کنند. [۲۱]. همچنین تحقیقات انجام شده نشان می دهند که امکان جوانه زنی همگون ZrO_2 در مذاب وجود دارد. تحقق این امر و واکنش منتهجه و جوانه زنی همگون سیلیکات ها، زمینه ای برای ایجاد گرافیت می شود [۱۸].

وجود زیرکونیم نه تنها عمل جوانه زنی را فعال تر می کند بلکه میرائی مواد جوانه زا را نیز کاهش می دهد. به همین علت است که بر خلاف فروسیلیسیم، زیرسینوک در پاتیل بسیار مؤثر عمل می کند. نتایج این تحقیق نیز گواه این ادعا است. همانطور که نتایج نشان می دهند، زیرسینوک در تمام حالت ها، در پاتیل مؤثرتر عمل می کند.

ج) جوانه زایی با سوپرسید

نتایج عمق تبرید نمونه هایی که با سوپرسید جوانه زنی شده اند، نسبت به مواردی که جوانه زنی انجام نشده کمتر بوده، ولی در مقایسه با نتایج زیرسینوک و فروسیلیسیم بیشتر است. با توجه به کاربرد وسیع این ماده در صنعت، نتایجی که در مورد عمق تبرید حاصل شد، دور از انتظار بود. شاید علت ضعف سوپرسید در کاهش عمق تبرید (نسبت به زیرسینوک و فروسیلیسیم) کم بودن درصد عناصری نظیر Al و Ca باشد (جدول ۱) و شاید اضافه کردن این

عناصر هم (مثل Ca)، روش مناسبی نباشد، زیرا وجود کلسیم در ماده جوانه زان، تأثیر استرانسیوم را خنثی می کند [۲۲]. اکسید یا سولفید استرانسیوم (SrS, SrO) جزو ترکیباتی هستند که هنگام اضافه کردن سوپرسید به مذاب، می توانند نقش هسته را ایفا نمایند. از نظر میراثی سوپرسید بسیار جوانه زای مناسبی است و در این تحقیق نتایج استفاده از این ماده در پاتیل و قالب بسیار نزدیک به هم می باشد. در انتها بایستی یادآور شد که در زمینه رفتار انقباضی چدن های خاکستری نتایج بسیار جالبی در مورد سوپرسید مشاهده شده است [۲۳].

۲- تأثیر نوع قالب روی عمق تبرید

به طور کلی تأثیر نوع قالب روی نتایج عمق تبرید به مشخصات فیزیکی و حرارتی آن برمی گردد [۲۴]. تراکم بیشتر توده ماسه (با کوبش بیشتر و با استفاده از قالب هایی نظیر قالب CO₂) سبب افزایش سطوح تماس ذرات ماسه با یکدیگر و افزایش ضریب انتقال حرارت آن می شود. در این رابطه می توان به نتایج تحقیقات Kubo استناد کرد [۲۴]. در نتایج حاصل از این آزمایش، چه در نمونه های جوانه زنی نشده و چه در سایر نمونه ها، شاهد تغییرات عمق تبرید با تغییر سختی و نوع قالب هستیم. به دلیل بالا بودن ضریب انتقال حرارت در قالب های CO₂، در این نوع قالب ها تغییرات به طور محسوس تری مشاهده می شود.

۳- سختی

به طور کلی مقدار سختی در چدن های خاکستری رابطه نزدیکی با ساختار زمینه، مشخصات گرافیت و ساختار دانه ای دارد. همانطور که از نتایج پیدا است، استفاده از سوپرسید داخل پاتیل، بیشترین مقدار سختی را می دهد. بعد از آن نتایج حاصل از اضافه کردن سوپرسید داخل راهگاه، فروسیلیسم و زیرسینوک داخل راهگاه، فروسیلیسیم داخل پاتیل و زیرسینوک داخل پاتیل، به ترتیب در مکان های بعدی قرار دارند.

۴- مورفولوژی گرافیت

خواص چدن ها تا حد زیادی وابسته به مورفولوژی گرافیت است. عوامل اصلی مؤثر بر مورفولوژی گرافیت عبارتند از: سرعت سرد شدن، ترکیب شیمیایی و وجود هسته های ناهمگون برای جوانه زنی گرافیت. در کاربردهای سایشی نظیر سیلندرهای موتورهای احتراق

داخلی، گرافیت نوع A با اندازه های متوسط نسبت به انواع دیگر آن مزیت دارد.

استفاده از سوپرسید داخل راهگاه مورفولوژی گرافیت را به سمت A سوق می دهد. اضافه کردن این ماده به پاتیل کارآیی حالت فوق را ندارد. در مورد زیرسینوک عکس رفتار بالا مشاهده می شود. نتایج حاصل از استفاده فروسیلیسیم نشان می دهد که این ماده وقتی در راهگاه اضافه می شود، درصد بیشتری گرافیت نوع A بوجود می آید. البته بایستی یادآور شویم که اختلاف نتایج در دو حالت جوانه زنی در راهگاه و پاتیل در مورد فروسیلیسیم نسبت به موارد قبل کمتر است.

همانگونه که ارقام جدول ۵ نشان می دهند، با ثابت بودن کلیه متغیرها، به طوری که فقط نوع قالب تغییر کند، در همه موارد وقتی نوع قالب به سمت CO₂ میل می کند شاهد افزایش درصد گرافیت نوع D هستیم (شکل های ۱۰ و ۱۱).

۵- ساختار زمینه

نکته ای که در این مبحث دارای اهمیت است، نقش مورفولوژی گرافیت در تعیین ساختار زمینه است. معمولاً چدن های خاکستری (که دارای گرافیت ورقه ای می باشند) در مقابل تشکیل فریت از خود مقاومت نشان می دهند که دلیل آن را کمبود محل های مناسب برای جوانه زنی روی گرافیت ورقه ای می دانند. اما در بین انواع مختلف گرافیت ورقه ای، بیشترین درصد پرلایت در زمینه وقتی به دست می آید که دارای توزیع نوع A باشیم. همانطور که نتایج این آزمایش نشان می دهند، هر عاملی (شامل نوع جوانه زان و محل جوانه زنی و نوع قالب) که توزیع گرافیت را به سمت A سوق می دهد. سبب افزایش درصد پرلایت زمینه می شود (افزایش درصد پرلایت زمینه به همراه افزایش گرافیت نوع D)، این سرعت سرد شدن است که مکانیزم غالب می باشد. شکل ۷ بیانگر رابطه مستقیم سختی قطعه با درصد پرلایت زمینه می باشد.

۶- فاصله بین بازوهای دندریتی (DAS)

در بیشتر آلیاژهای ریختگی، خواص مکانیکی وابستگی شدیدی به DAS دارد. کاهش DAS سبب افزایش حد پارگی، داکتیلیته و ازدیاد طول نسبی می شود. در مواردی که نیاز به عملیات همگن سازی باشد، کاهش

DAS سبب کاهش زمان عملیات خواهد شد. [۱۵] مقدار DAS توسط فرآیند رشد کنترل می‌شود. اگر فرض کنیم زمان انجماد t_f باشد، DAS متناسب با t_f^3 است، که معمولاً n بین $3/0$ تا $4/0$ قرار دارد. استفاده از زیرسینوک داخل پاتیل کمترین مقدار DAS را نشان می‌دهد ($51/2 \mu m$). استفاده از فروسیلیسیم داخل پاتیل ($17/7 \mu m$)، سوپرسید داخل راهگاه ($17/7 \mu m$) زیرسینوک داخل راهگاه ($18/7$)، سوپرسید داخل پاتیل ($20 \mu m$) و فروسیلیسیم داخل راهگاه ($20/4 \mu m$)، به ترتیب در مکان‌های بعدی قرار دارند. جدول ۷ مقادیر DAS و شکل ۸ تغییرات DAS با نوع جوانه‌زا و محل اضافه کردن جوانه‌زا را نشان می‌دهند. شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ دندریتهای استتیت اولیه را در نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد.

۷- ساختار دانه‌ای (سلول‌های یوتکتیکی)

به طور کلی مزایای یک ساختار ریزدانه عبارتند از: الف) مقاومت بهتر در مقابل پارگی گرم در حین انجماد ب) مقاومت بهتر در مقابل خوردگی مرزدانه‌ای ج) استحکام و تنش گسیختگی بالاتر د) چقرمگی بیشتر ه) مقاومت به خستگی بالاتر و) کاهش پراکندگی امواج اولتراسونیک و اشعه X (این مورد امکان بررسی‌های غیر مخرب را بهبود می‌بخشد). جدول ۸ تعداد سلول‌های یوتکتیکی و قطر متوسط دانه را در نمونه‌ها نشان می‌دهد. نمونه‌هایی که در آنها عملیات تلقیح انجام نشده دارای کمترین تعداد سلول یوتکتیکی و بیشترین قطر متوسط دانه هستند. اضافه کردن مواد جوانه‌زا سبب افزایش مکان‌های مناسب برای جوانه‌زنی سلول‌های یوتکتیکی می‌شود. نمونه‌هایی که با زیرسینوک جوانه‌زنی شده‌اند دارای بیشترین تعداد سلول یوتکتیکی و کمترین قطر دانه هستند. وجود عناصری نظیر Ca، Al، Zr در این ماده تشکیل ترکیبات سولفیدی، اکسیدی و سیلیکاتی می‌دهند که در مذاب به عنوان هسته‌های ناهمگون عمل کرده و باعث ریزدانه‌گی خواهند شد. نحوه تغییرات سلول‌های یوتکتیکی برحسب نوع جوانه‌زا و محل اضافه کردن آن در شکل ۱۶ آمده است. شکل ۱۷ تغییرات سختی برحسب تعداد سلول‌های یوتکتیکی در واحد سطح را نشان می‌دهد. این نمودار بیانگر یک روند ثابت است که تا حدودی غیر متعارف به نظر می‌رسد. انتظار می‌رفت که افزایش

تعداد سلول‌های یوتکتیکی سبب افزایش سختی شود. علت این مسئله را بایستی در سایر نتایج جستجو کرد. در صد پرلایت زمینه، یک عامل مهم در توجیه این پدیده می‌باشد. به طور مثال در نمونه ۲۹ شاهد بیشترین تعداد سلول یوتکتیکی هستیم ($6/56/mm^2$) و انتظار می‌رود که این نمونه دارای بالاترین سختی باشد. اما وقتی به نتایج ساختار زمینه نگاه می‌کنیم، در می‌یابیم که این نمونه حاوی ۲۵ درصد فریت آزاد در زمینه است که باعث کاهش سختی می‌شود. نتایج این آزمایش نشان می‌دهند که نقش پرلایت زمینه در تعیین مقدار سختی نمونه‌ها بیشتر است. شکل‌های ۱۸ تا ۲۴ سلول‌های یوتکتیکی در نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

- ۱- از نظر کاهش عمق تبرید، استفاده از زیرسینوک با پاتیل مؤثرترین حالت است.
- ۲- به نظر می‌رسد وجود عناصری نظیر Al، Ca، Zr در ماده جوانه‌زا بیشترین نقش را در کاهش عمق تبرید دارند.
- ۳- افزایش سختی قالب، سبب افزایش توان تبریدی و باعث بالا رفتن عمق تبرید نمونه‌ها می‌شود. تحقق این مورد در قالب‌های CO_2 مشهودتر است.
- ۴- استفاده از سوپرسید داخل پاتیل، بیشترین سختی را می‌دهد.
- ۵- نتایج سختی نمونه‌ها، بیشتر متأثر از درصد پرلایت زمینه است.
- ۶- مورفولوژی گرافیت نقش به‌سزایی در تعیین ساختار زمینه دارد. در صورت ثابت بودن سایر شرایط در ساختاری با توزیع نوع A بیشتر شاهد پرلایت در زمینه هستیم و توزیع نوع D درصد فریت را افزایش می‌دهد.
- ۷- افزایش سختی قالب، مورفولوژی گرافیت را به سمت توزیع نوع D سوق می‌دهد.
- ۸- استفاده از زیرسینوک بیشترین کاهش را در مقدار DAS نشان می‌دهد.
- ۹- کمترین تعداد سلول یوتکتیکی در واحد سطح (بیشترین قطر متوسط دانه) در نمونه‌هایی که تلقیح نشده‌اند، مشاهده می‌شود.
- ۱۰- استفاده از زیرسینوک داخل پاتیل کمترین قطر دانه و بیشترین سلول یوتکتیکی در واحد سطح را می‌دهد.

تقدیر

از جناب آقای مهندس سعدیان مدیریت محترم کارگاه

فهرست نمونه های تهیه شده در مرحله چهارم و پنجم بارریزی

نوع نمونه	شماره نمونه	سختی قالب (Bhn)	محل اضافه کردن جوانه زا	نوع جوانه زای مصرفی
Y بلوک گوه	۱۹	۴۵-۵۰	حوضچه پای راهگاه	Zircinoc (Zircinoc)
	۲۰			
Y بلوک گوه	۲۱	۶۰-۶۵		
	۲۲			
Y بلوک گوه	۲۳	قالب CO ₂		
	۲۴			
Y بلوک گوه	۲۵	۴۵-۵۰	داخل پاتیل	
	۲۶			
Y بلوک گوه	۲۷	۶۰-۶۵		
	۲۸			
Y بلوک گوه	۲۹	قالب CO ₂		
	۳۰			

فهرست نمونه های تهیه شده در مرحله ششم و هفتم بارریزی

نوع نمونه	شماره نمونه	سختی قالب (Bhn)	محل اضافه کردن جوانه زا	نوع جوانه زای مصرفی
Y بلوک گوه	۳۱	۴۵-۵۰	حوضچه پای راهگاه	فروسیلیسیم ۷۵٪ Fe-Si
	۳۲			
Y بلوک گوه	۳۳	۶۰-۶۵		
	۳۴			
Y بلوک گوه	۳۵	قالب CO ₂		
	۳۶			
Y بلوک گوه	۳۷	۴۵-۵۰	داخل پاتیل	
	۳۸			
Y بلوک گوه	۳۹	۶۰-۶۵		
	۴۰			
Y بلوک گوه	۴۱	قالب CO ₂		
	۴۲			

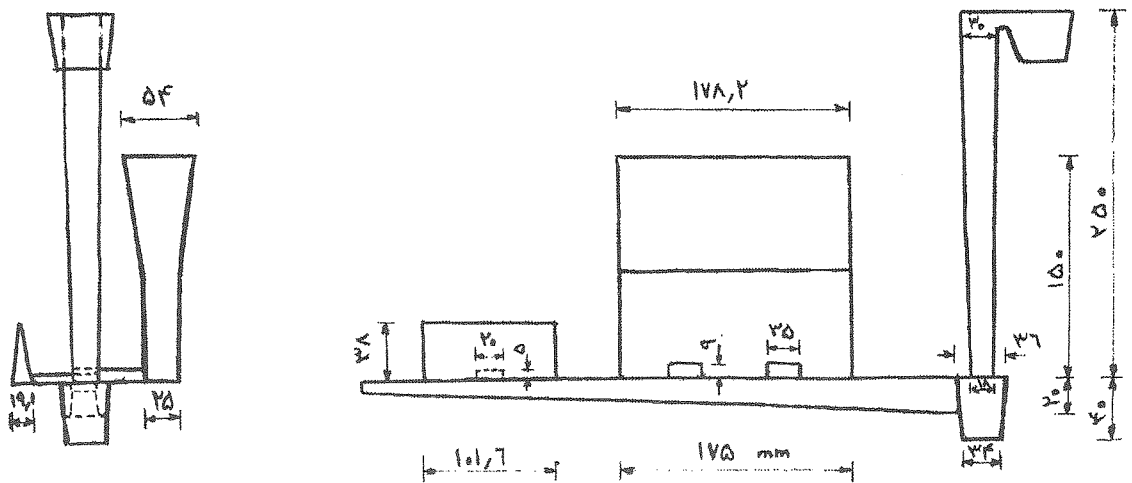
ریخته گری و جناب آقای مهاجر سرپرست آزمایشگاه های کارگاه ریخته گری کارخانه ایران خودرو که انجام بخشی از این تحقیق را در واحد مربوطه امکان پذیر ساختند، تشکر و قدردانی می شود.

فهرست نمونه های تهیه شده در مرحله اول بارریزی

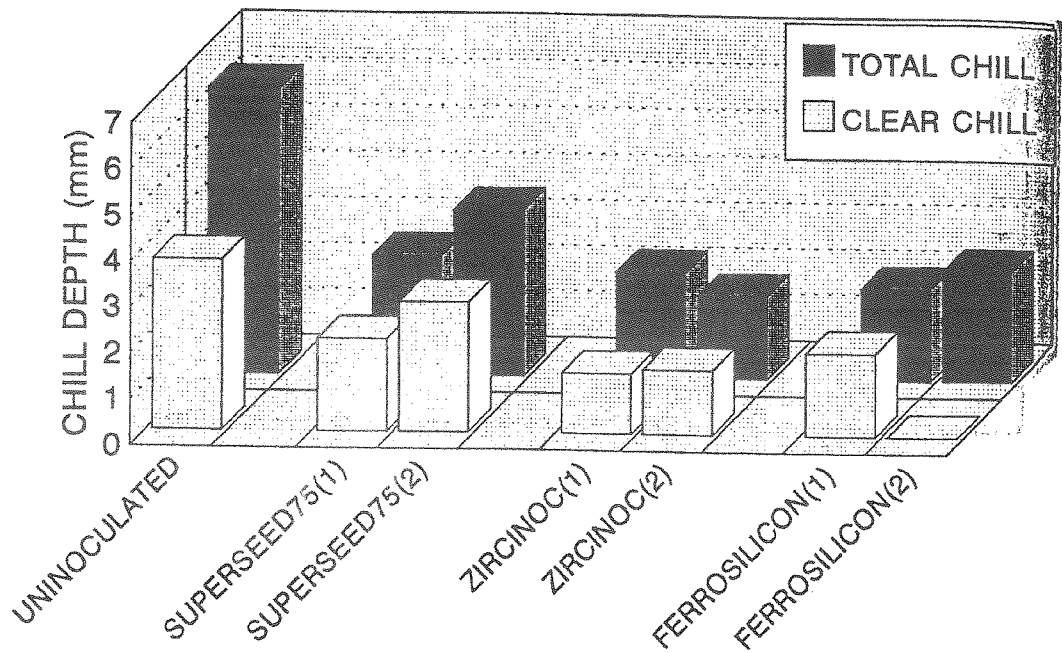
نوع نمونه	شماره نمونه	سختی قالب (Bhn)	محل اضافه کردن جوانه زا	نوع جوانه زای مصرفی
Y بلوک گوه	۱	۴۵-۵۰	-	ریخته گری آلیاژ پایه بدون اضافه کردن جوانه زا
	۲			
Y بلوک گوه	۳	۶۰-۶۵		
	۴			
Y بلوک گوه	۵	قالب CO ₂		
	۶			

فهرست نمونه های تهیه شده در مرحله دوم و سوم بارریزی

نوع نمونه	شماره نمونه	سختی قالب (Bhn)	محل اضافه کردن جوانه زا	نوع جوانه زای مصرفی
Y بلوک گوه	۷	۴۵-۵۰	حوضچه پای راهگاه	سو پرسید ۷۵ (Superseed) 75
	۸			
Y بلوک گوه	۹	۶۰-۶۵		
	۱۰			
Y بلوک گوه	۱۱	قالب CO ₂		
	۱۲			
Y بلوک گوه	۱۳	۴۵-۵۰	داخل پاتیل	
	۱۴			
Y بلوک گوه	۱۵	۶۰-۶۵		
	۱۶			
Y بلوک گوه	۱۷	قالب CO ₂		
	۱۸			

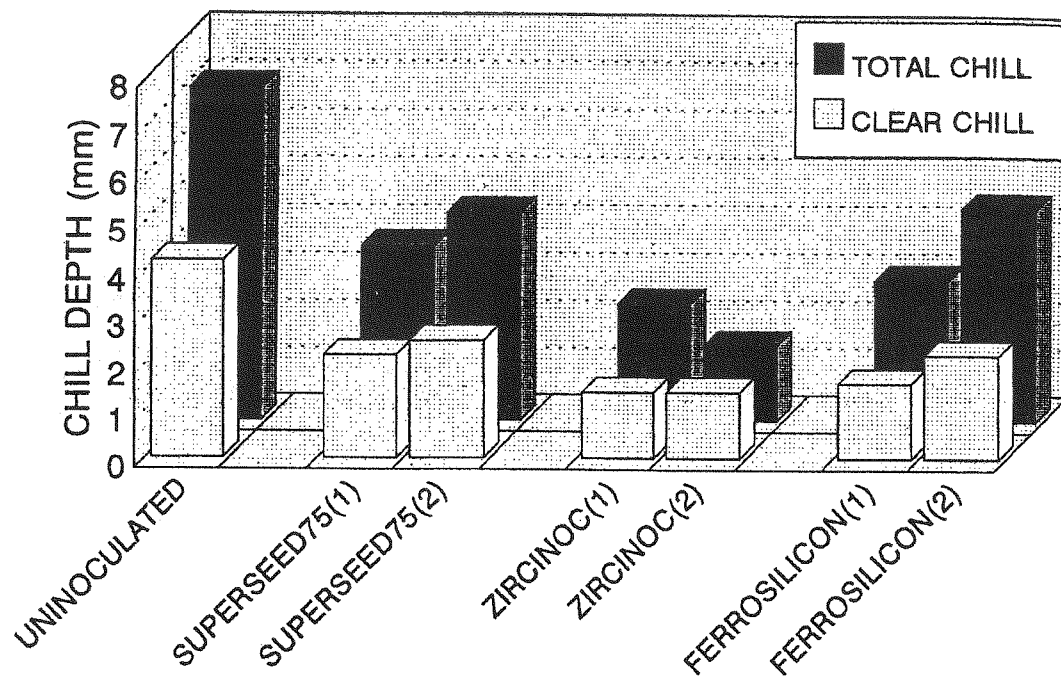


شکل (۱) سیستم راهگامی



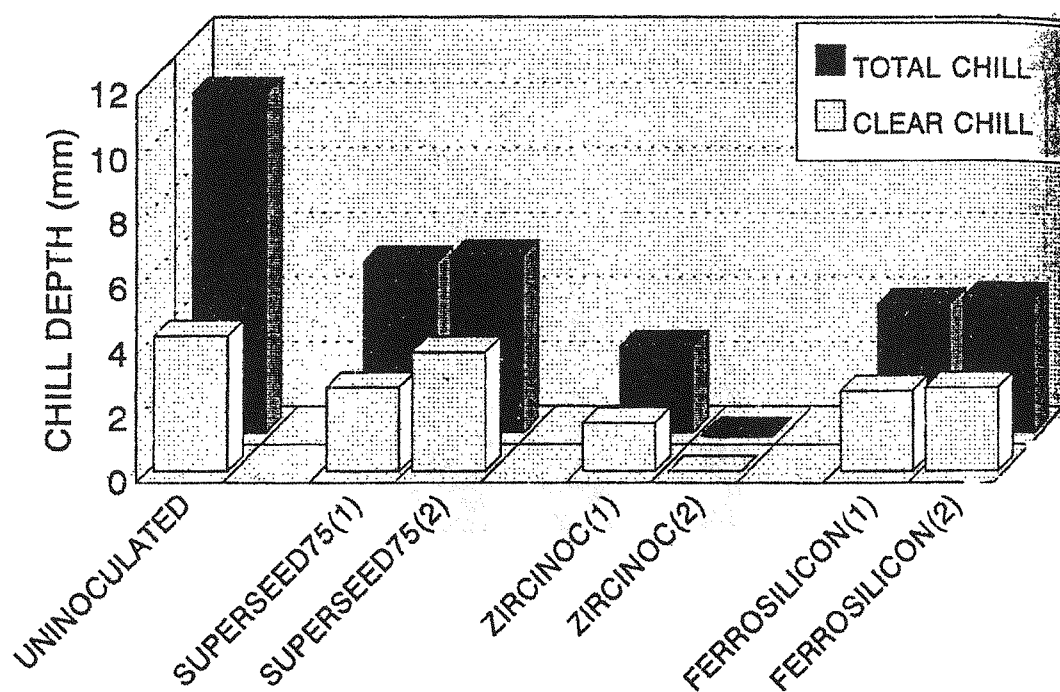
:MOLD INOCULATION (2):LADLE INOCULATION

شکل (۲) تغییرات عمق تبرید بر حسب نوع جوانه زا و محل اضافه کردن جوانه زا. (در قالب‌هایی با سختی B ۵۰-۲۵)



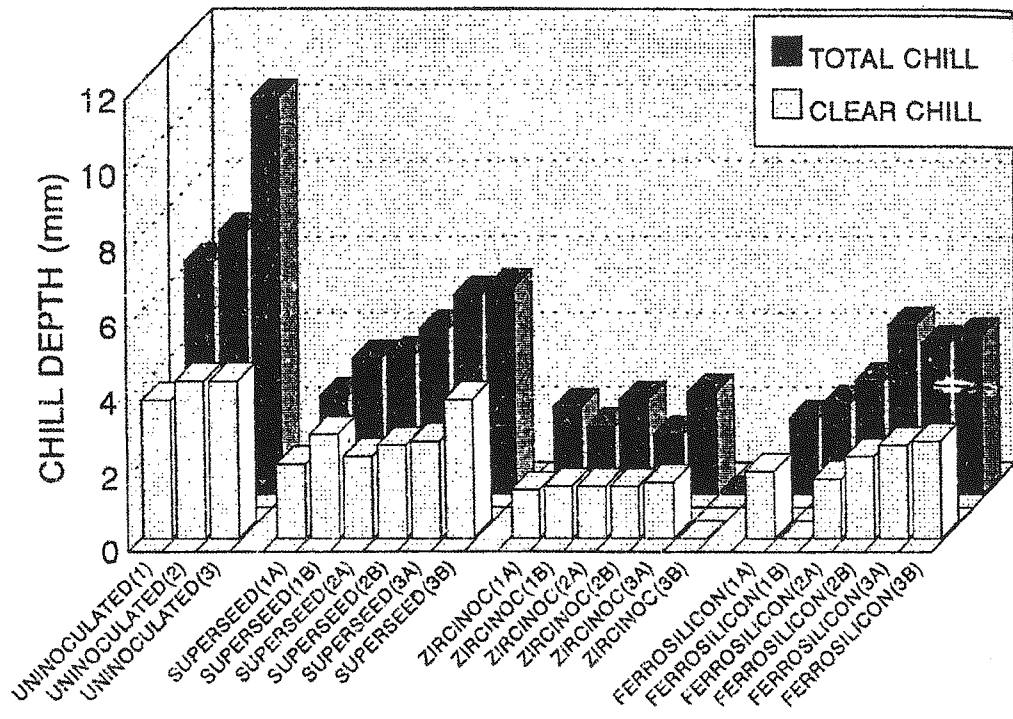
(1):MOLD INOCULATION (2):LADLE INOCULATION

شکل (۳) تغییرات عمق تبرید بر حسب نوع جوانه زا و محل اضافه کردن جوانه زا. (در قالب هایی با سختی B ۶۵-۶۰)



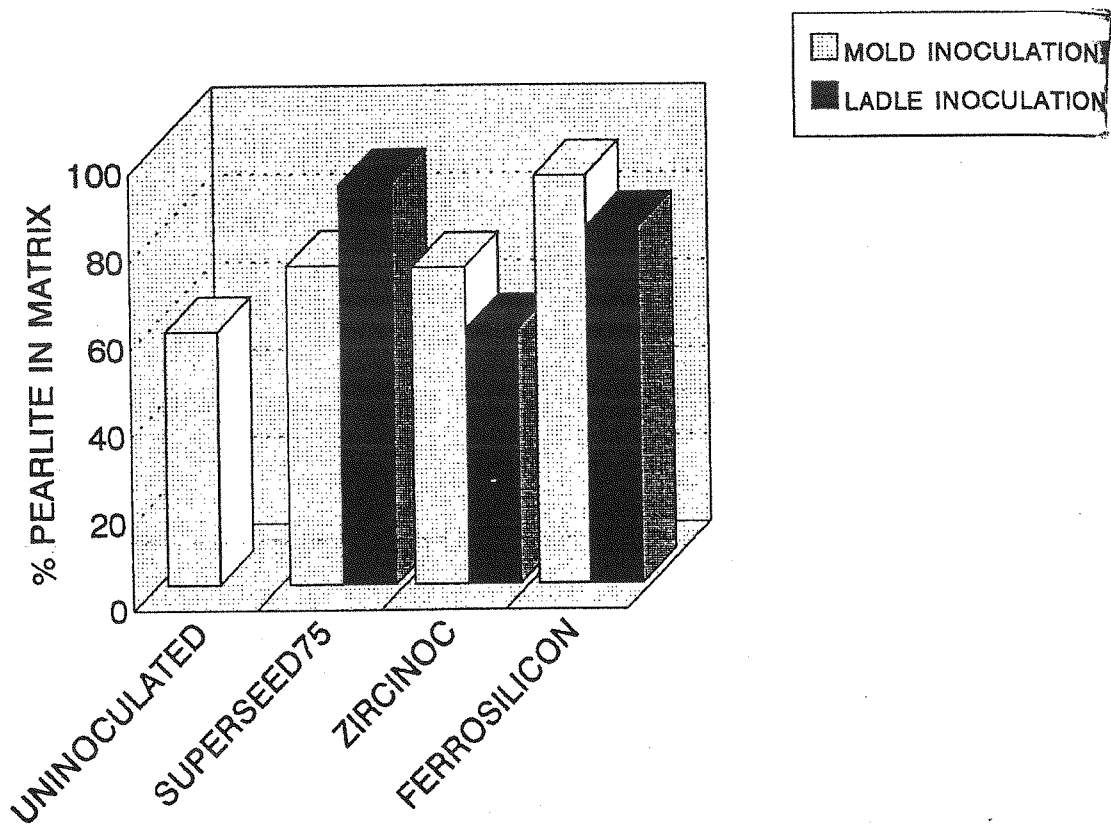
(1):MOLD INOCULATION (2):LADLE INOCULATION

شکل (۴) تغییرات عمق تبرید بر حسب نوع جوانه زا و محل اضافه کردن جوانه زا. (در قالب های صلب CO₂)

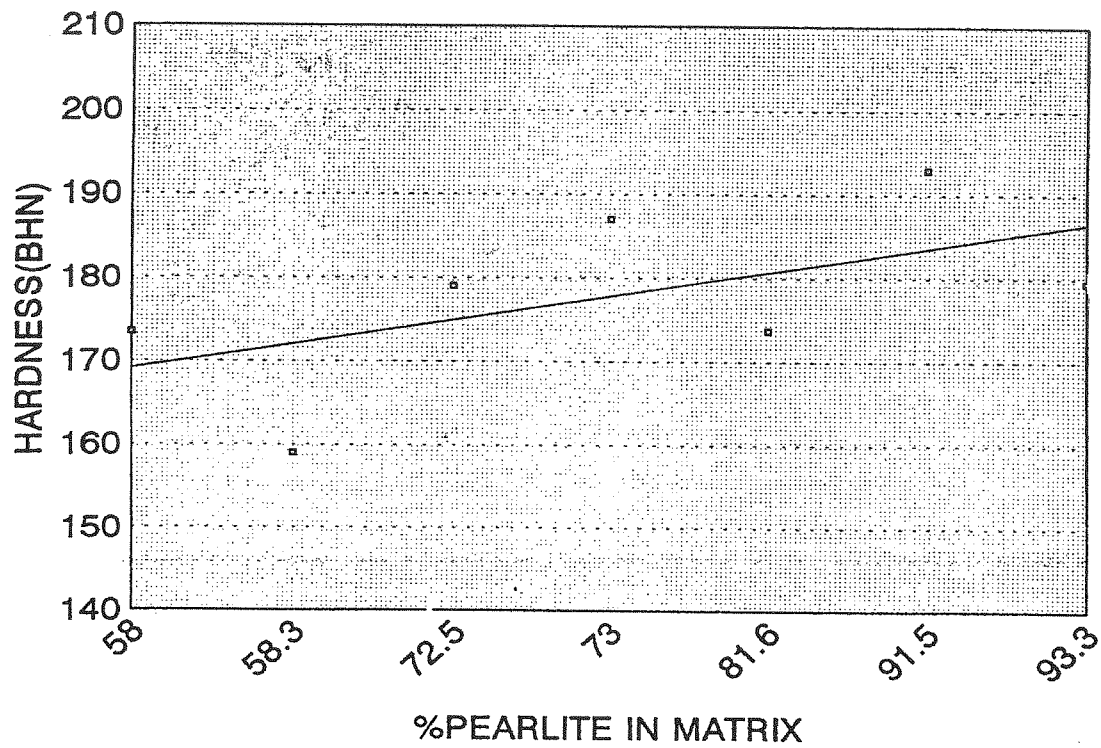


(1):MH=45-50 E (2):MH=60-63 B (3):RM(CO₂) (A):MOLD INOCULATION (B):LADLE INOCULATION

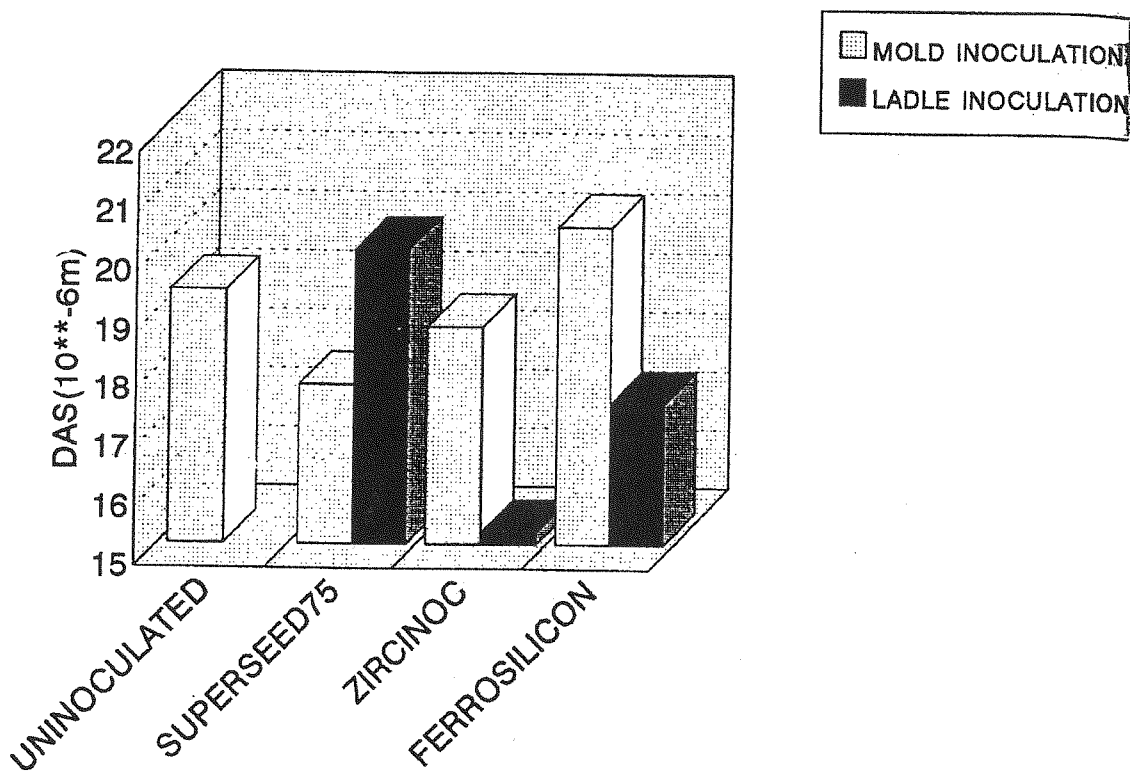
شکل (۵) تغییرات عمق تبرید بر حسب نوع جوانه‌زا و محل اضافه کردن جوانه‌زا و صلیبیت قالب



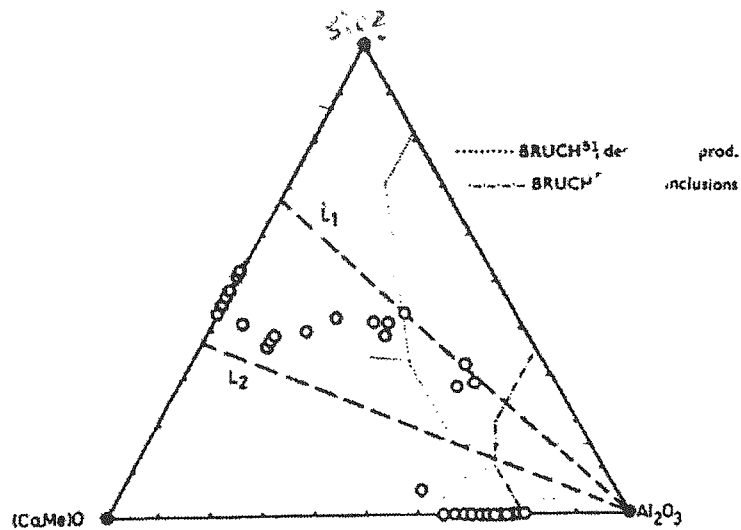
شکل (۶) تغییرات درصد پیرلیت زمینه با نوع جوانه‌زا و محل اضافه کردن جوانه‌زا



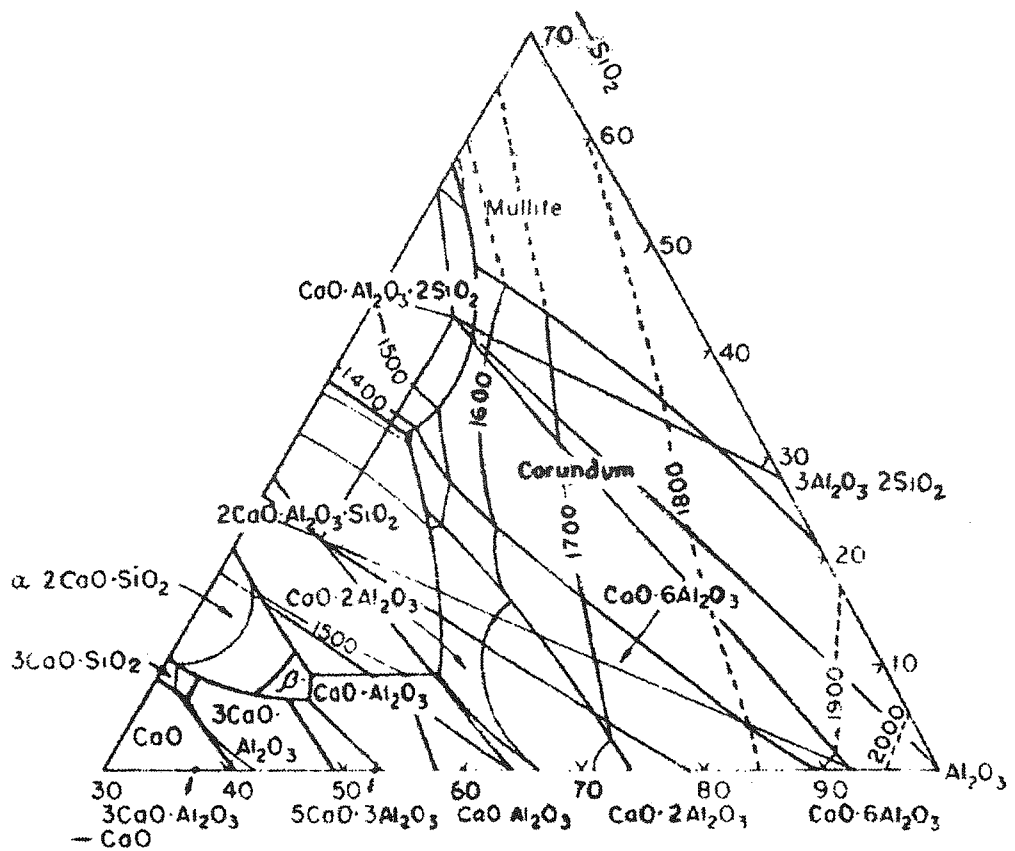
شکل (۷) تغییرات سختی قطعه با درصد پرلیت زمینه



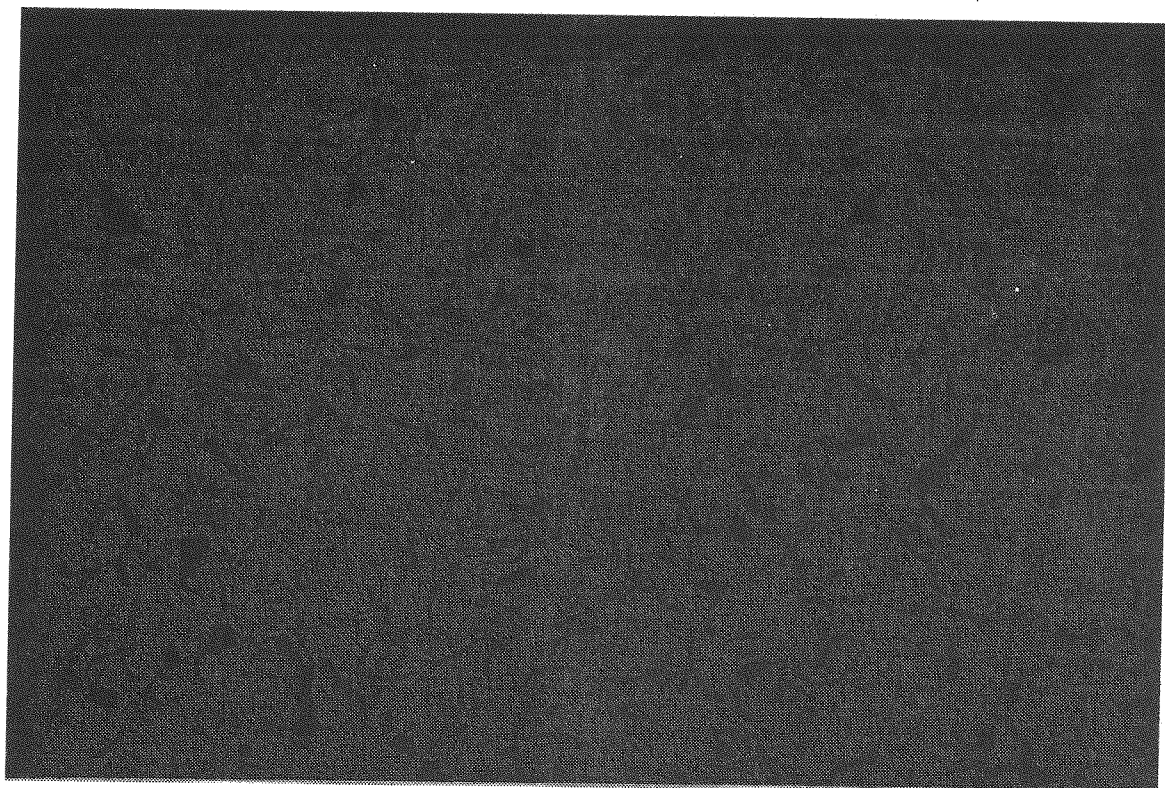
شکل (۸) تغییرات DAS با نوع جوانه‌زا و محل اضافه کردن جوانه‌زا



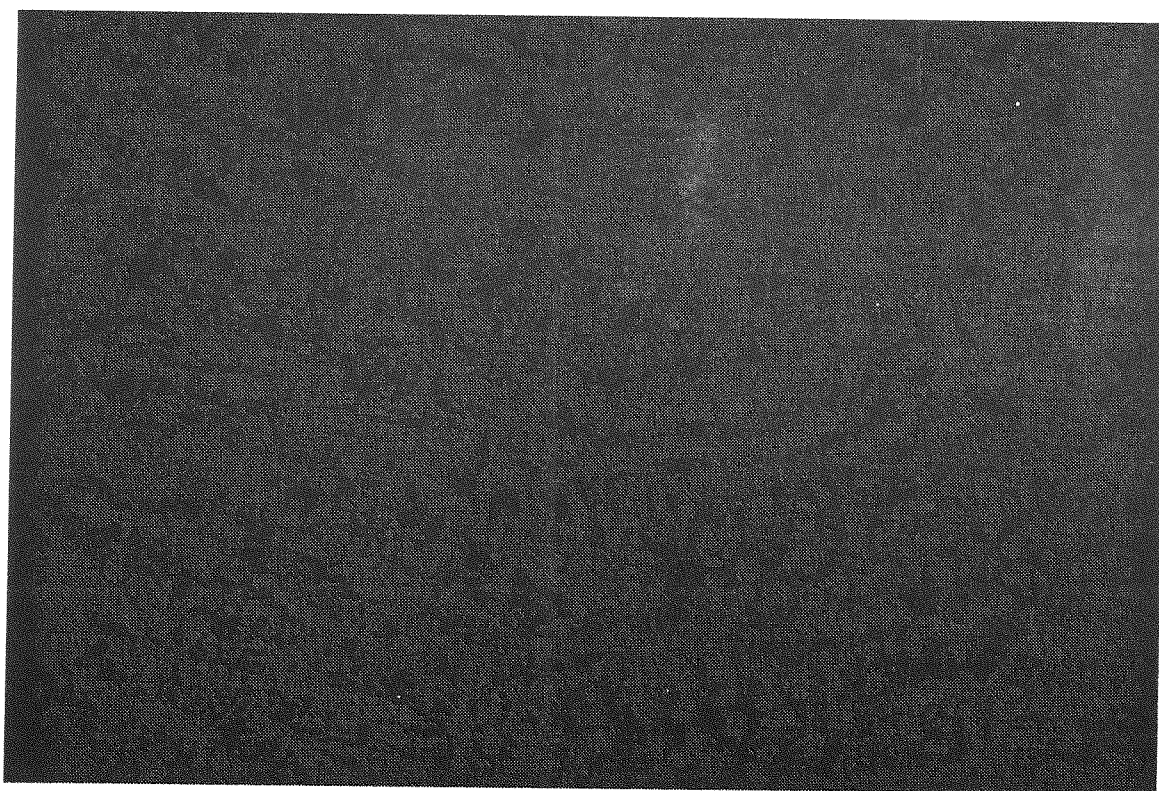
CaO-Al₂O₃-SiO₂



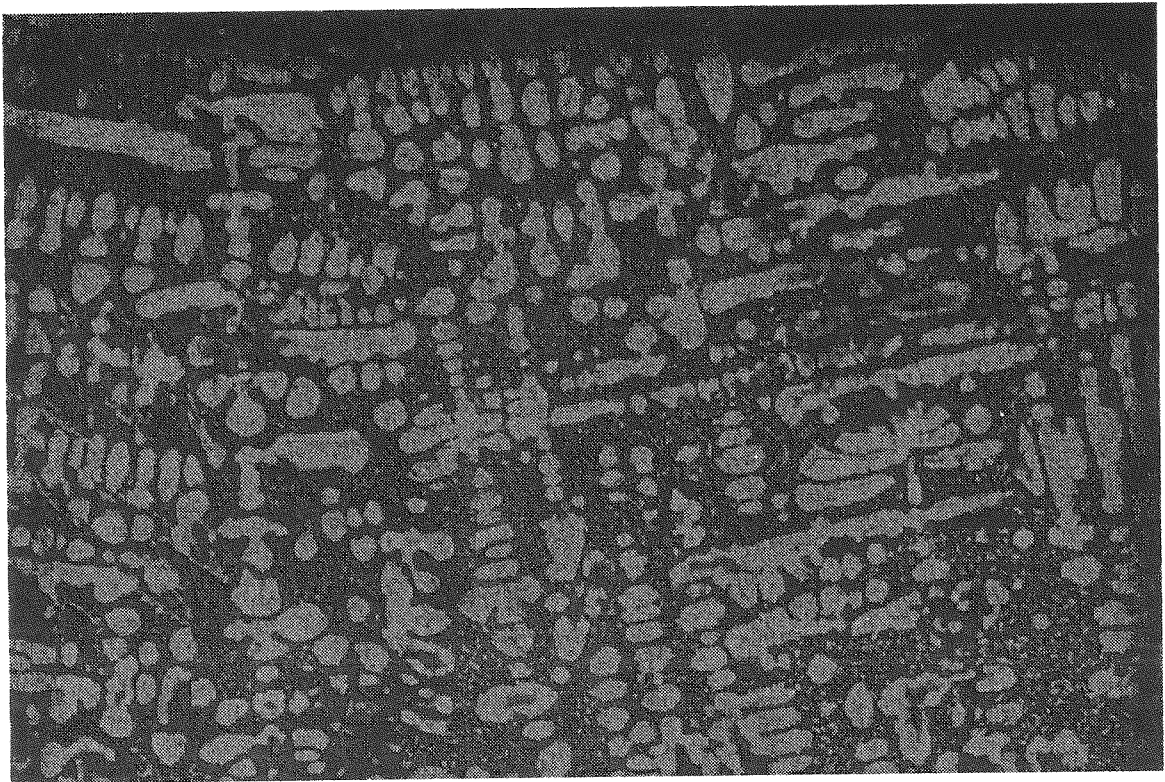
شکل (۹) دیاگرام سه تایی SiO₂ و Al₂O₃ و CaO



شکل (۱۰) تصویر میکروسکوپی نمونه ۷. بدون اج. بزرگنمایی $\times 100$. حاوی گرافیت A با اندازه های ۵ و ۴ و در بعضی نقاط ۶.



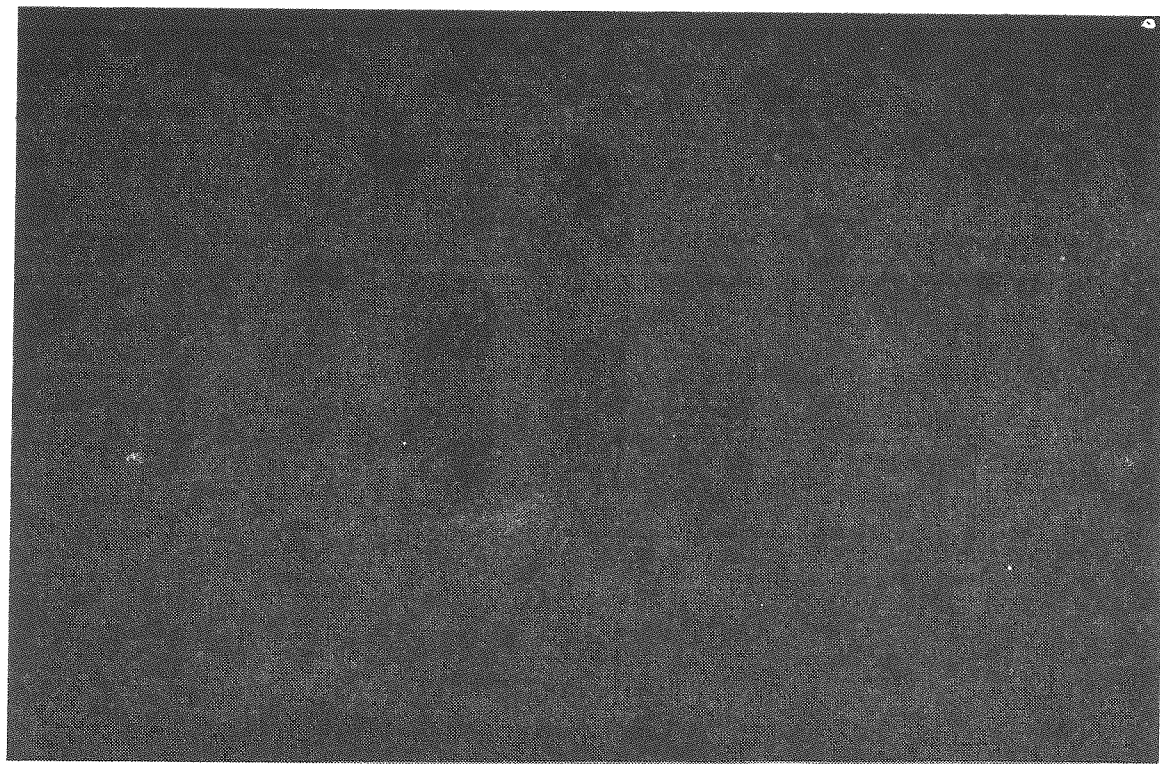
شکل (۱۱) تصویر میکروسکوپی نمونه ۱۱. بدون اج. بزرگنمایی $\times 100$. حاوی $50-70\%$ گرافیت D، $20-30\%$ A و $10-20\%$ E با



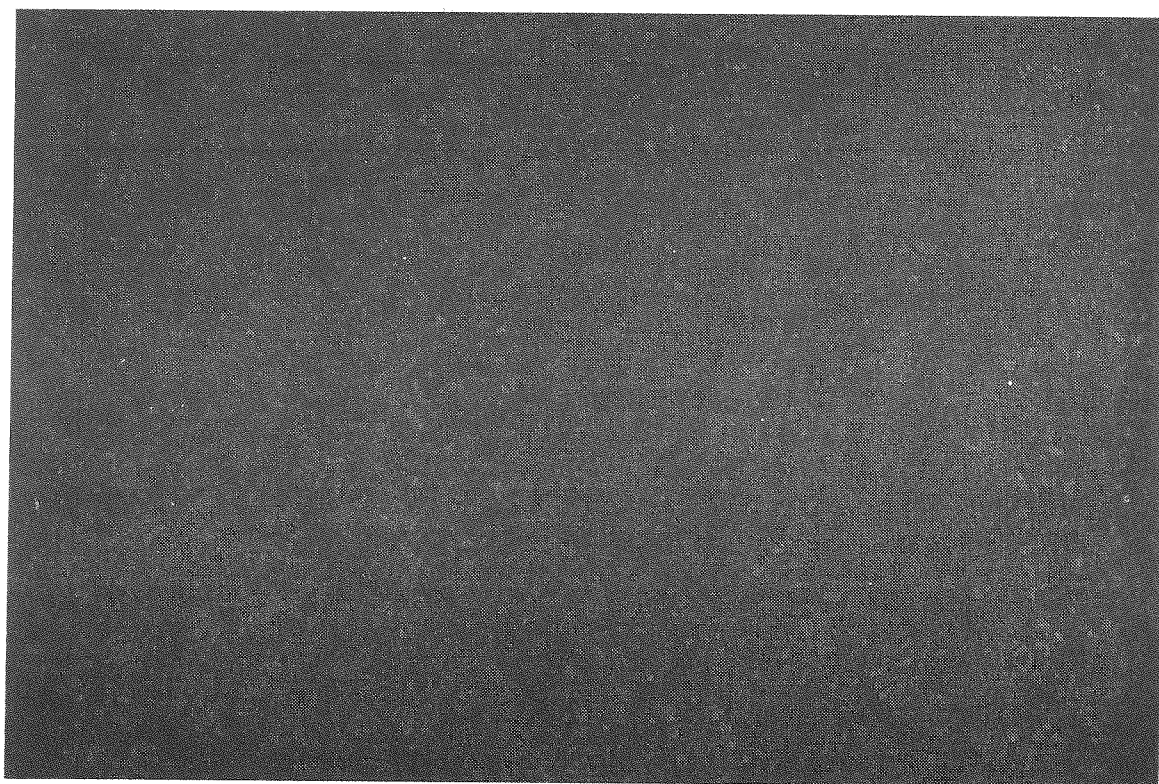
شکل (۱۲) تصویر میکروسکوپی نمونه ۵. سلول اچ نیتال ۲٪. بزرگنمایی ۱۰۰× حاوی ۸۰٪ فریت و ۲۰٪ پرفیت. دندریت های استنیت اولیه در این تصویر مشخص هستند.



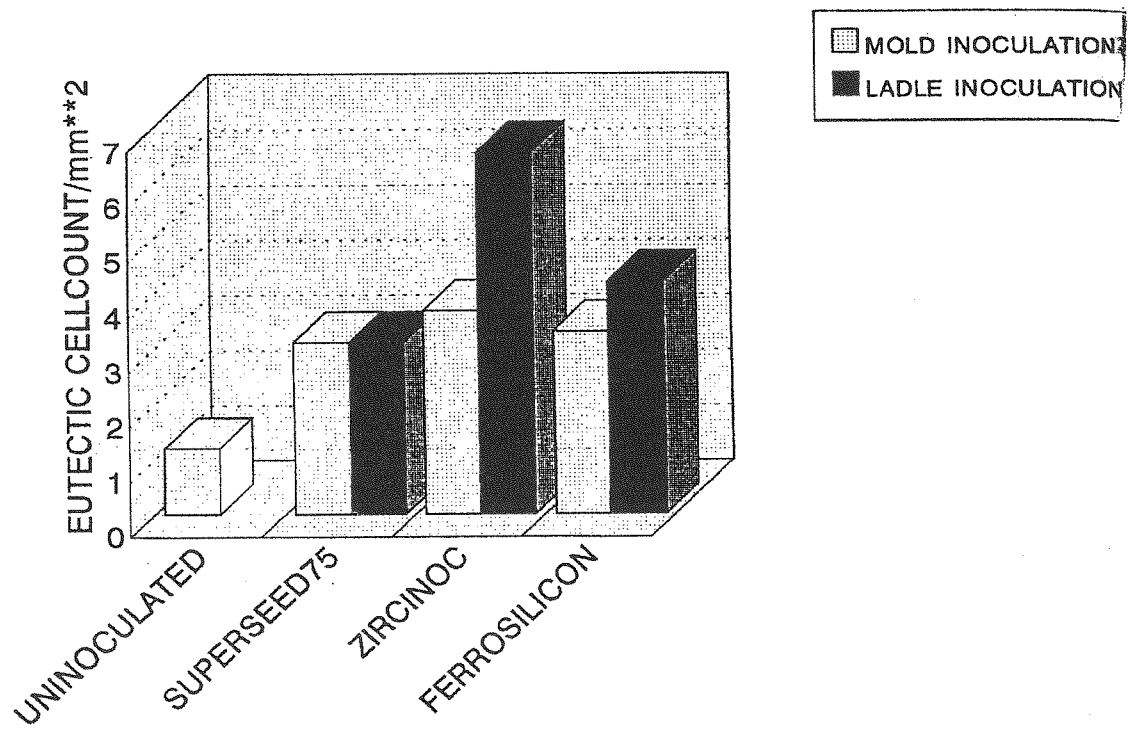
شکل (۱۳) تصویر میکروسکوپی نمونه ۱۷. محلول اچ نیتال ۲٪. بزرگنمایی ۱۰۰× حاوی ۸۵٪ پرفیت و ۱۵٪ فریت. دندریت های استنیت اولیه در این تصویر مشخص هستند.



شکل (۱۴) تصویر میکروسکوپی نمونه ۴۹. محلول اج نیتال ۲٪. بزرگنمایی ۱۰۰x حاوی ۲۵٪ پرلیت و ۲۵٪ فریت. در این تصویر و دندریتهای استنیت اولیه مشاهده میشوند.

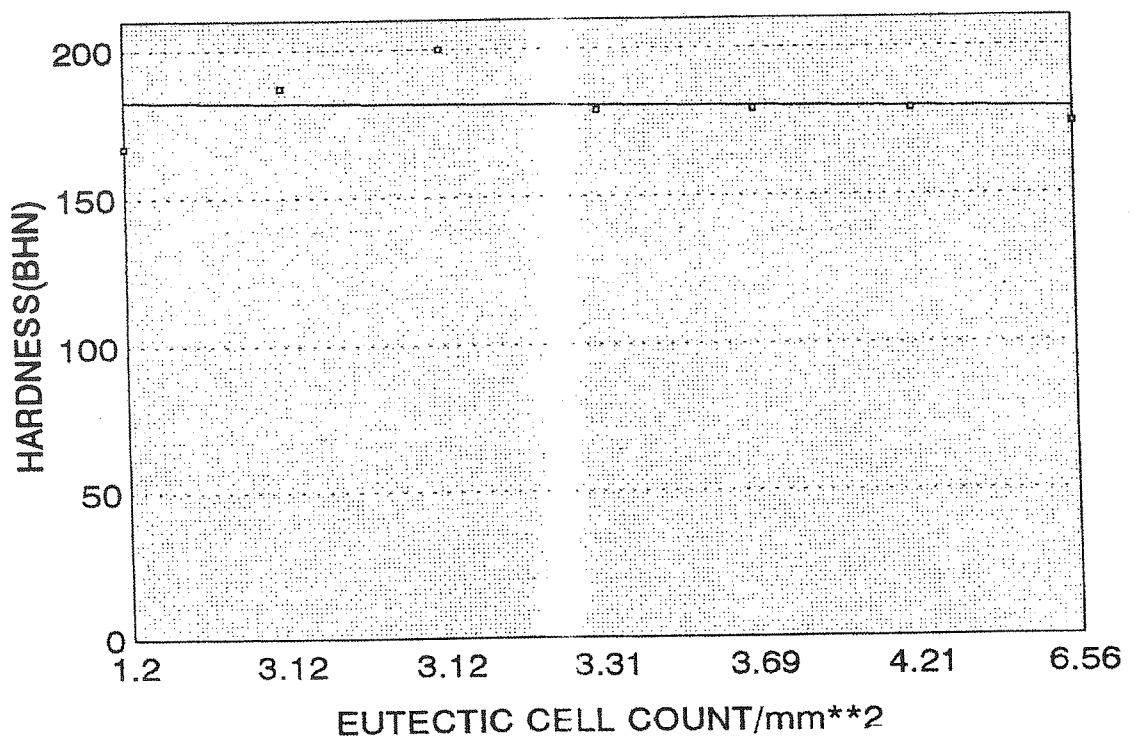


شکل (۱۵) تصویر میکروسکوپی نمونه ۴۱. محلول اج نیتال ۲٪، بزرگنمایی ۱۰۰x. حاوی ۸۰٪ پرلیت و ۲۰٪ فریت

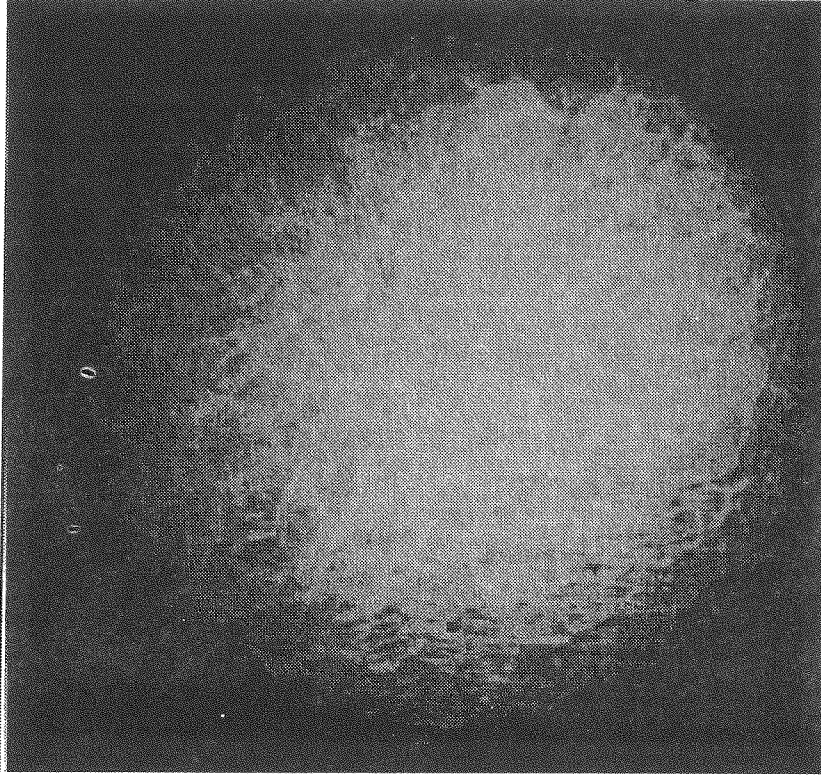


شکل (۱۶) تغییرات تعداد سلول های یونکتیکی بر حسب نوع جوانه زا و محل اضافه کردن جوانه زا.

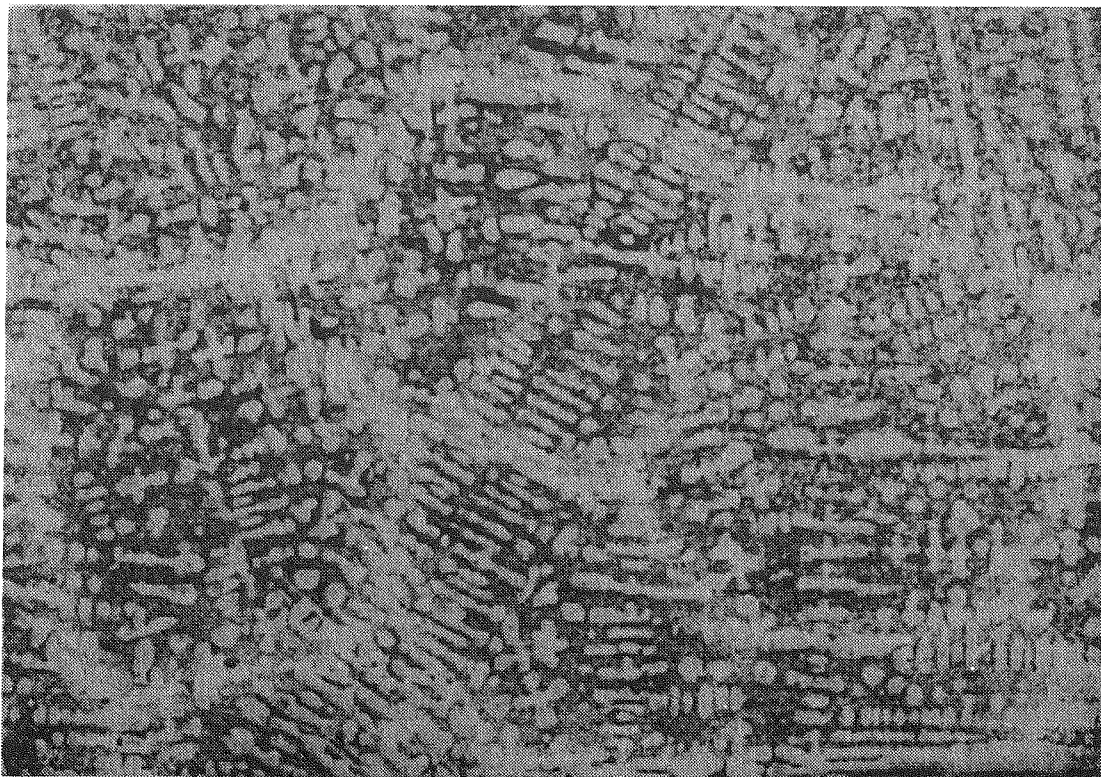
اضافه کردن جوانه زا.



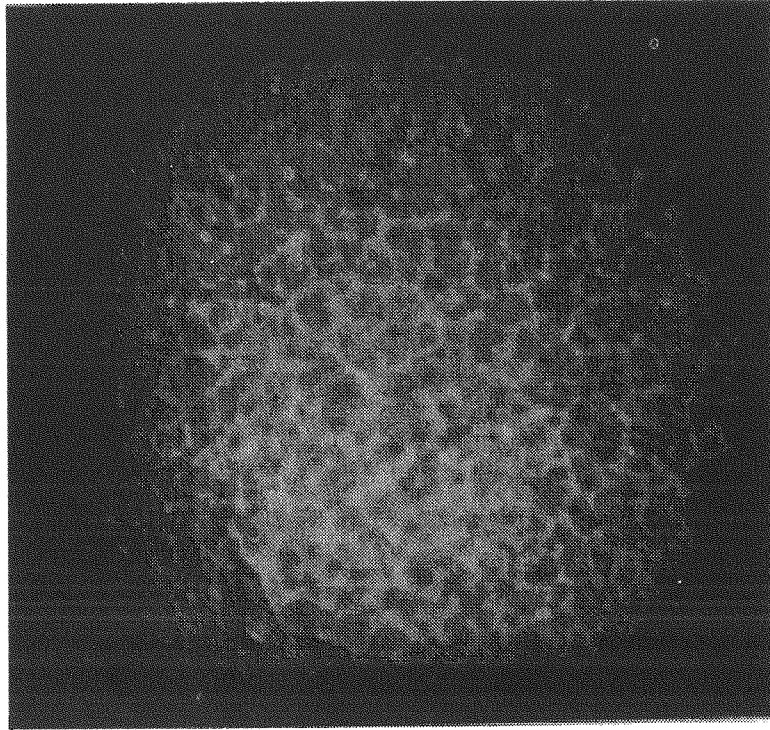
شکل (۱۷) تغییرات سختی بر حسب تعداد سلول های یونکتیکی در واحد سطح.



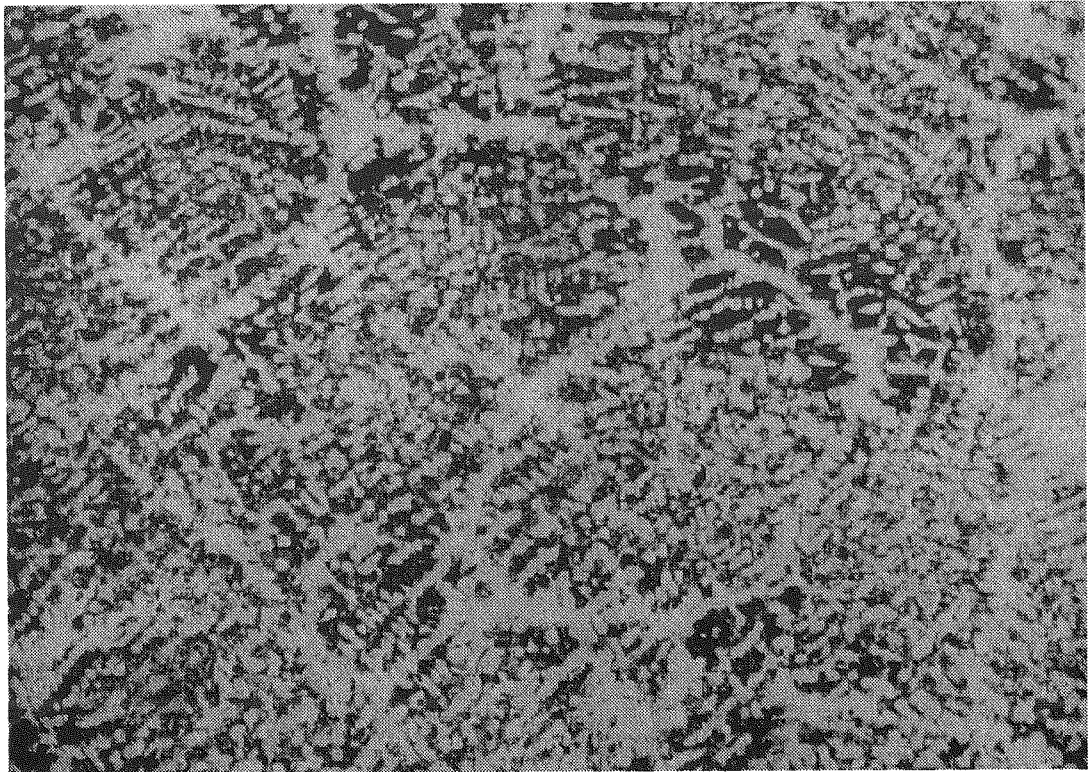
تصویر ماکروسکوپی نمونه ۵.
محلول اچ Stead's No1. بزرگنمایی $\times 5$. قطر متوسط دانه $0.3 / 0.1$ mm.



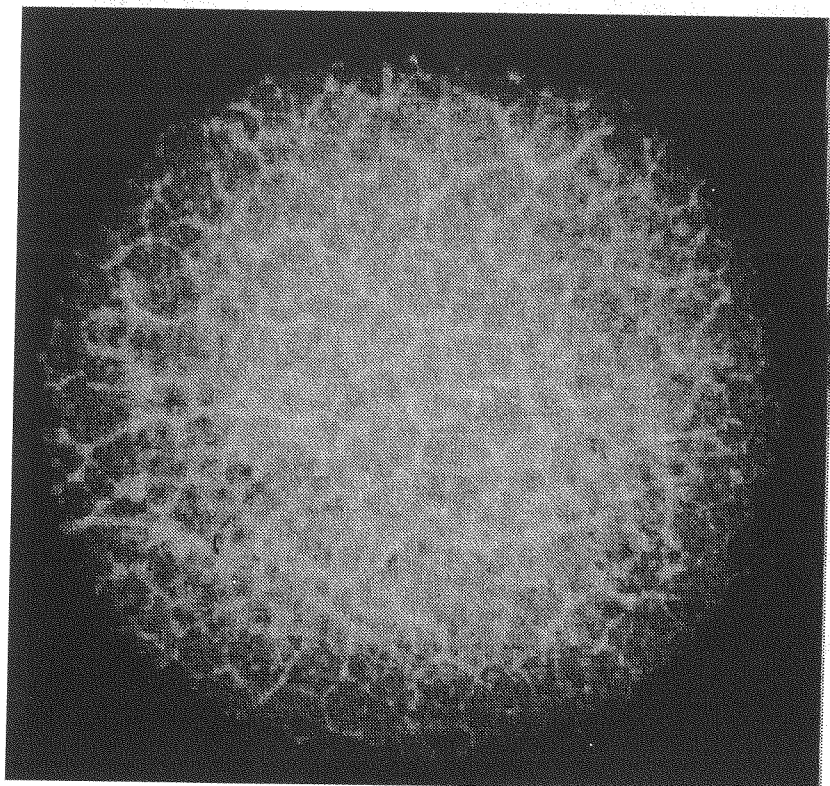
شکل (۱۸) تصویر ماکروسکوپی نمونه ۵. محلول اچ Stead's No1. بزرگنمایی $\times 50$. قطر متوسط دانه $0.3 / 0.1$ mm.



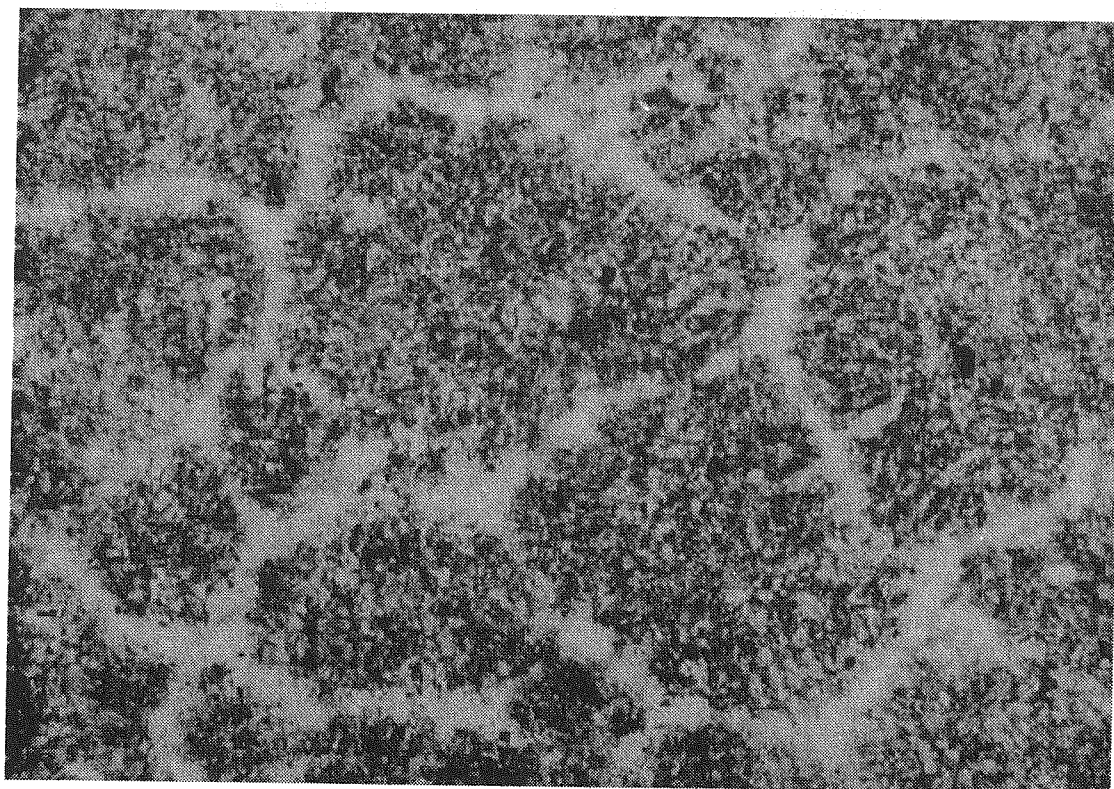
تصویر ماکروسکوپی نمونه ۱۱ .
محلول اچ Stead's No1. بزرگنمایی x50. قطر متوسط دانه ۰/۶۴ mm



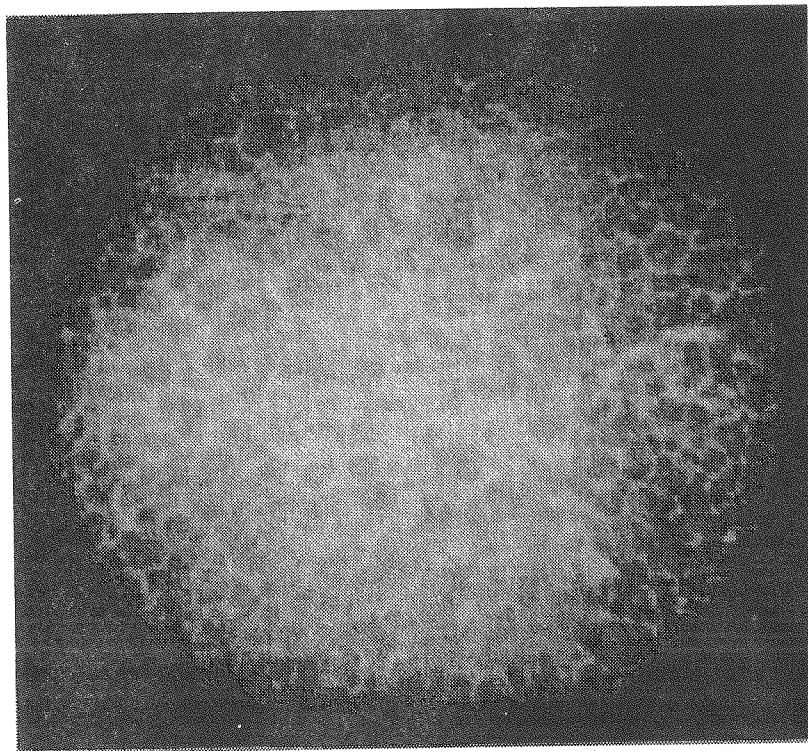
شکل (۱۹) تصویر ماکروسکوپی نمونه ۱۱. محلول اچ Stead's No1. بزرگنمایی x50. قطر متوسط دانه ۰/۶۴ mm



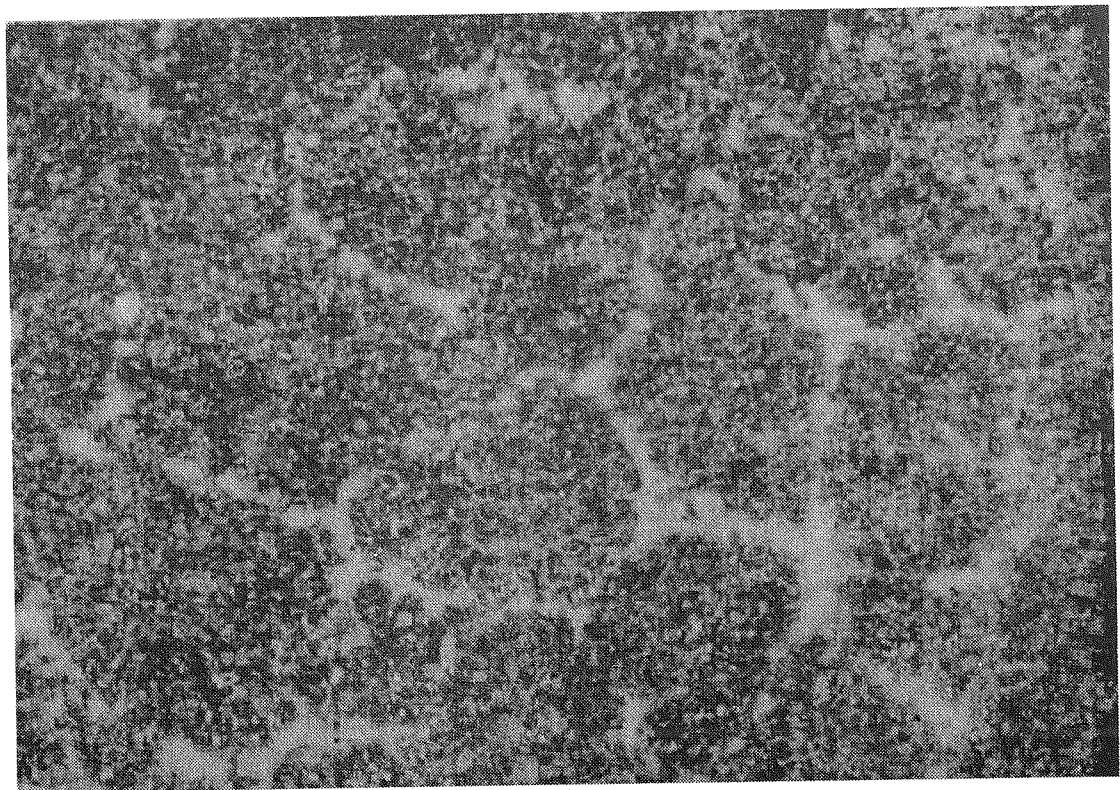
تصویر ماکروسکوپی نمونه ۱۷ .
محلول اچ Stead's No1. بزرگنمایی ۵۰X. قطر متوسط دانه ۰/۶۴ mm



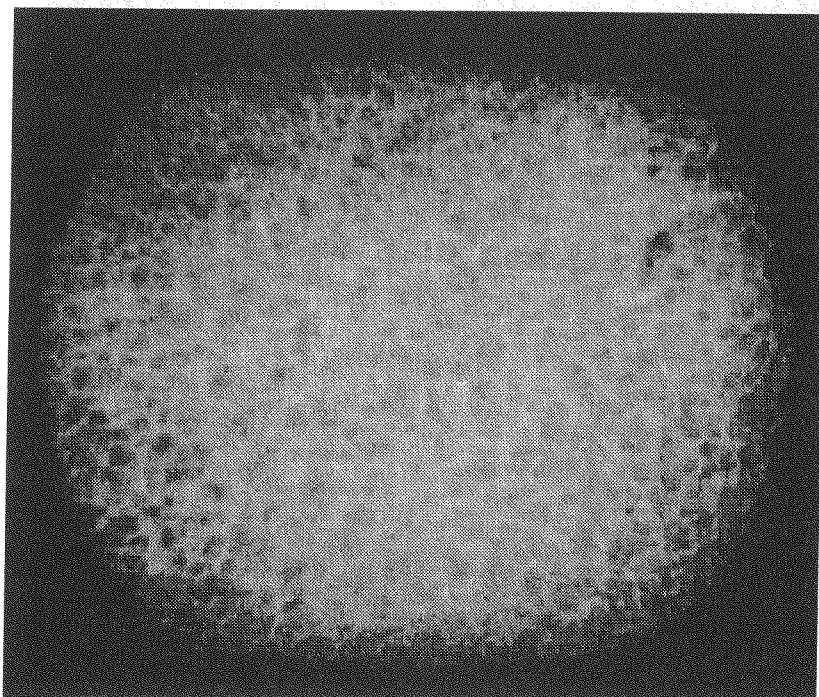
شکل (۲۰) تصویر ماکروسکوپی نمونه ۱۷ . محلول اچ Stead's No1. بزرگنمایی ۵۰X. قطر متوسط دانه ۰/۶۴ mm



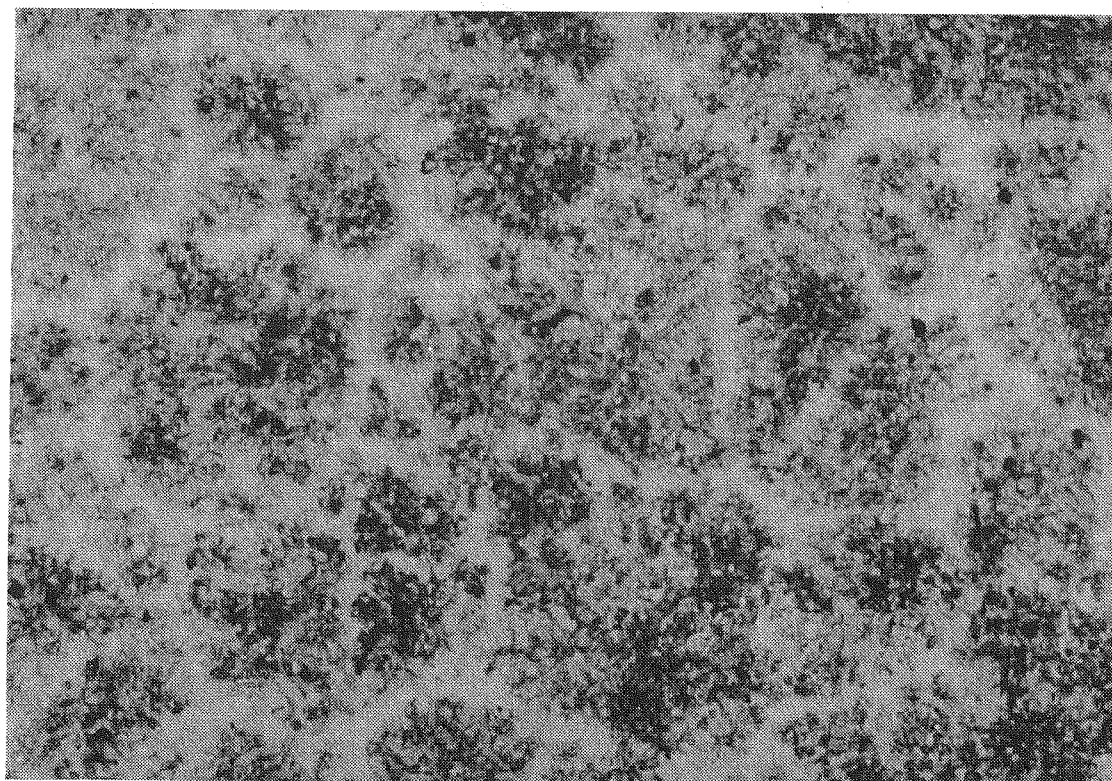
تصویر ماکروسکوپی نمونه ۲۳.
محلول اج Stead's No1. بزرگنمایی $\times 5$. قطر متوسط دانه $58 \text{ mm} / 0$.



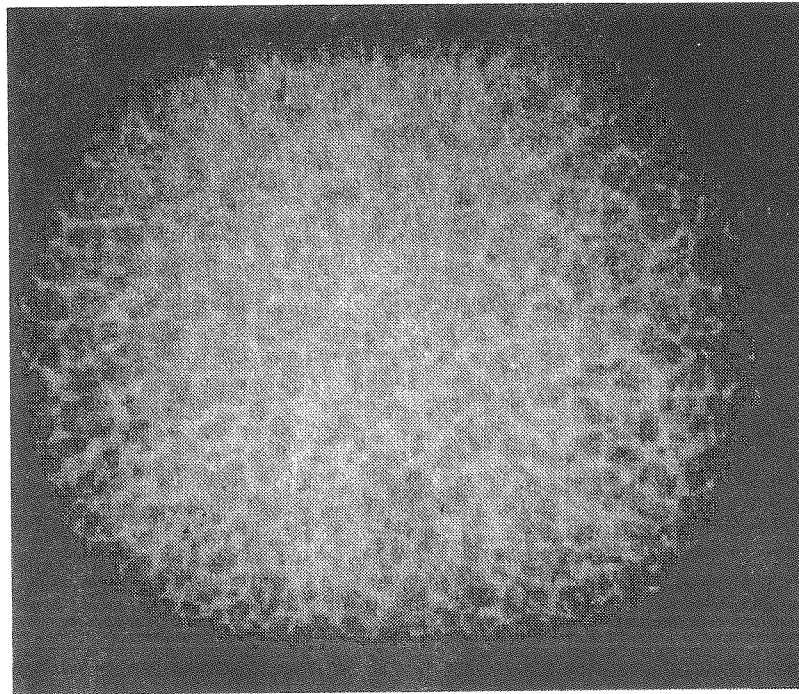
شکل (۲۱) تصویر ماکروسکوپی نمونه ۲۳. محلول اج Stead's No1. بزرگنمایی $\times 50$. قطر متوسط دانه $58 \text{ mm} / 0$.



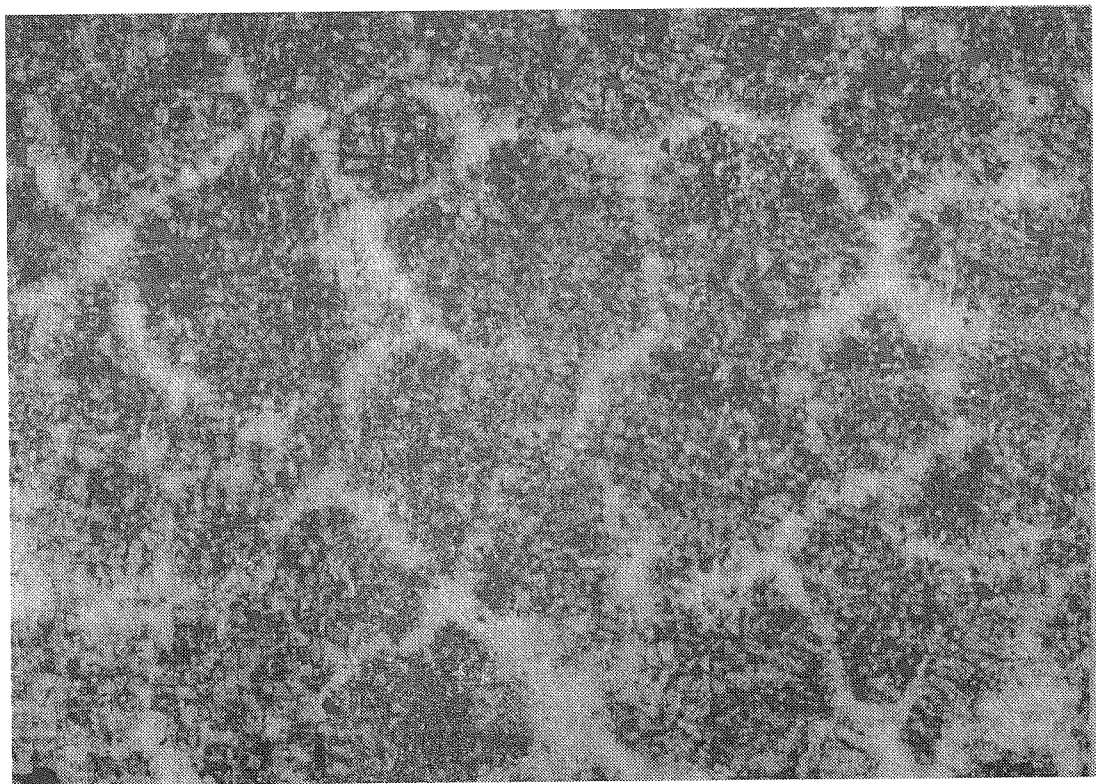
تصویر ماکروسکوپی نمونه ۴۹.
محلول اج Stead's No1. بزرگنمایی X۵۰. قطر متوسط دانه mm ۴۳ / ۰.



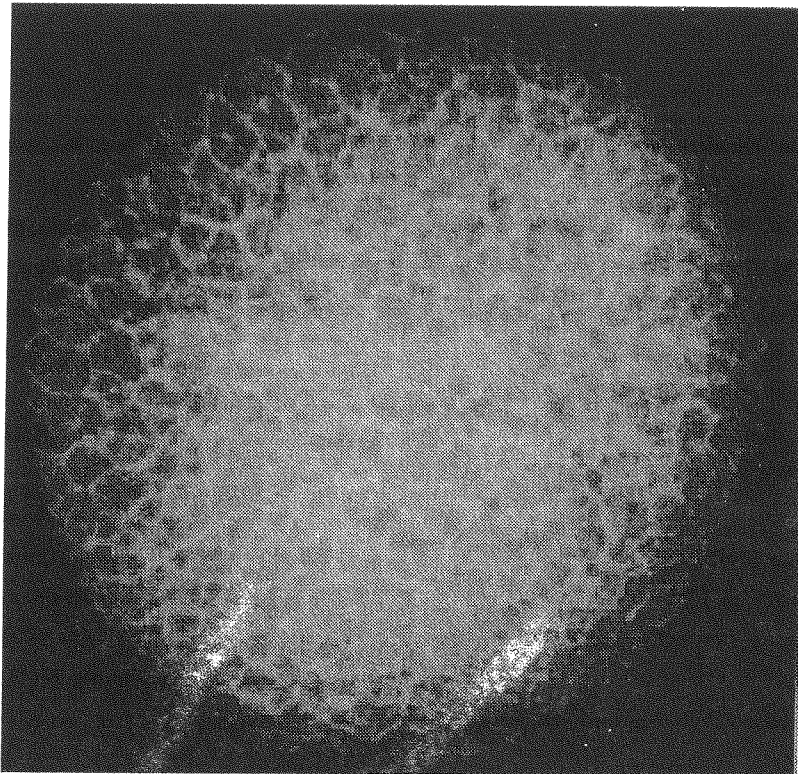
شکل (۲۲) تصویر ماکروسکوپی نمونه ۴۹. محلول اج Stead's No1. بزرگنمایی X۵۰. قطر متوسط دانه mm ۴۳ / ۰.



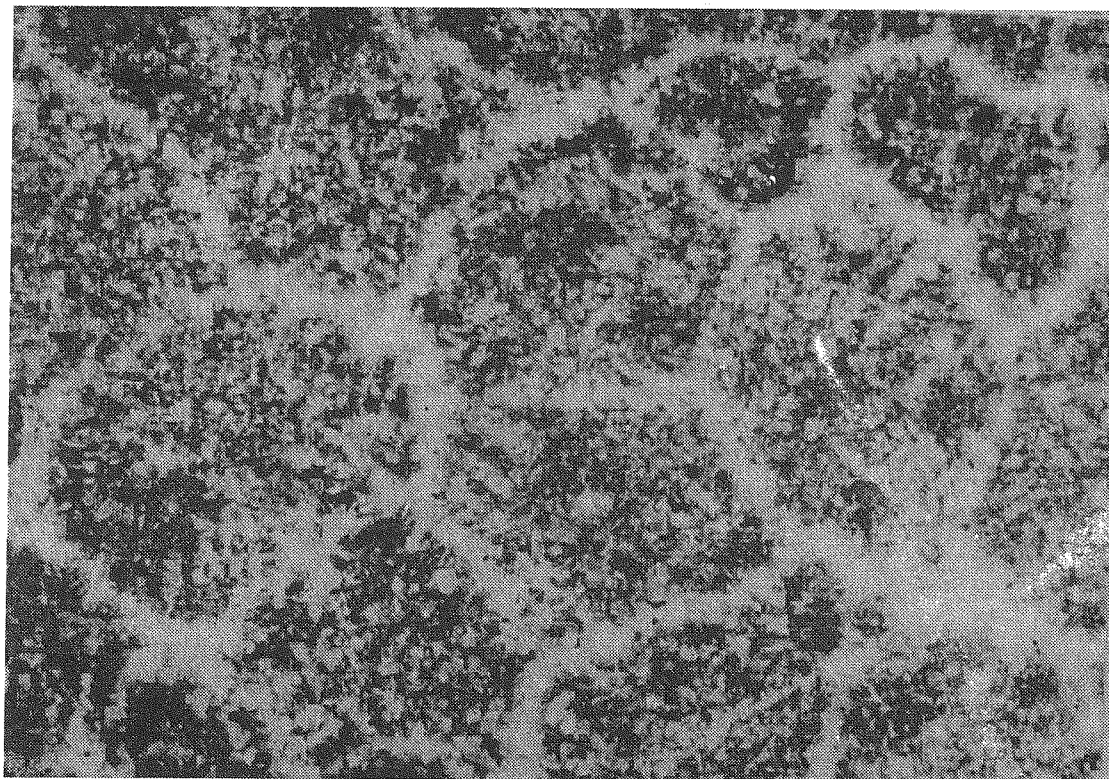
تصویر ماکروسکوپی نمونه ۳۵ .
محلول اچ Stead's No1. بزرگنمایی ۵۰x. قطر متوسط دانه ۰/۶۲mm .



شکل (۲۳) تصویر ماکروسکوپی نمونه ۳۵. محلول اچ Stead's No1. بزرگنمایی ۵۰x. قطر متوسط دانه ۰/۶۲mm .



تصویر ماکروسکوپی نمونه ۴۱.
محلول اج Stead's No1. بزرگنمایی X۵. قطر متوسط دانه ۰/۵۴ mm.



شکل (۲۴) تصویر ماکروسکوپی نمونه ۴۱. محلول اج Stead's No1. بزرگنمایی X۵۰. قطر متوسط دانه ۰/۵۴ mm.

- [1] A. Moore, "Some Recent Advances in the Practice and Understanding Inoculation". AFS Transactions, May, 1974.
- [2] P. J. Bilek, J. M. Dong, T.K. Mc cluhn, "The Roles of Ca. and Al in Inoculation of gray Iron" . AFS Trans. PP. 183, 1972.
- [3] Filkins, W. L. etal. AFS Transactions, 1962.
- [4] Patterson, V. H., foundry trade journal, 1973.
- [5] Naro, R. L. and Wallace J. F., AFS Transactions, 1969.
- [6] Benjamin Francis, "Heterogeneous Nuclei and Graphite Chemistry in Flake and Nodular Cast Irons, "Metallurgical transactions A. Vol. 10, pp. 21-31, 1979.
- [7] Jacobs, M. H, Law, T. J. Melford, D. A. and stowell, M. G, Metal Technology, 1976.
- [8] Dawson, J. V, and Maitra, S, British Foundryman, 1967.
- [9] Moore A., "Some Factors Influencing Inoculation and Inoculant Fade in Flake and Nodular Graphite Irons". AFS Trans. PP. 268, 1973.
- [10] S. N. Lekakh, G. F. Andreev, and A. N. Roghozhnikov, "In-mold graphitization treatment of cast Iron with modifying Inserts", Sov. Cast. tech, PP. 46, 1990.
- [11] J. N. Harvey pp Mohla Mold Inoculation of cast Iron using pressed blocks, Modern Casting April pp. 48. 1993.
- [12] Tom Bex, "Gray Iron Inoculation Revisited", Modern Casting, PP. 51, 1991.
- [13] Annual book of ASTM standard, standard Methods of chill testing of cast Iron, A367, 1978.
- [14] Annual book of ASTM standard, A436, 1980
- [15] Campbell, J. Castings , Butterworth - Hahmannn, 1995.
- [16] Lux, B, and Tannerberger, H, AFS Transactions, 1962.
- [17] T. Skaland, Q. Grong and T. Grong. "A model for the graphite formation in ductile cast Iron, Part I. Inoculation Mechanisms", Metallurgical Transactions A, Vol. 24A, 1993.
- [18] Gadd, M. A. and Bennet, G. H. J., The physical Metallurgy of cast Iron, Aug, 1984.
- [19] Tantera, J, AFS ICM Journal, 1980.
- [20] Lownie, H. W. Foundry, 1963.
- [21] Boyles, A. The structure of cast Iron", American society of Metals 1947.
- [22] Dawson Jv BCIRA Journal 1966.
- [۲۲] علیرضا محسنی مقدم، سید محمدعلی بوتراپی، تأثیر شرایط جوانه زنی بر ساختار میکروسکوپی و تغذیه چدن های خاکستری، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۵
- [24] K. Kubo, R. D. Pehlke, "Thermal Properties of Molding Sands", AFS Transactions, PP. 405-414, 1985.