



IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

# Founding Research Journal

## Effects of Aluminum Content on Microstructure and Matrix Hardness of Spherical Graphite Cast Irons Produced by in-Mold Process

Mohammad Mehdi Khalvan<sup>1</sup>, Mehdi Divandari<sup>2\*</sup>

1. M.Sc. student, in Materials Engineering, 2. Associate Professor,  
School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Received: 28 May 2018  
Accepted: 10 November 2018

### Abstract:

In this research, the effect of various amounts of aluminum on microstructure and matrix hardness of ductile cast irons produced by in-mold casting process is investigated. For this purpose, spherical graphite cast iron containing 3.7, 6.4 and 7.5 wt. % aluminum, respectively, were prepared in Y-block form via in-mold process. After casting, samples were prepared for microstructural studies, using conventional methods, and then were examined by optical and scanning electron microscopy. Chemical composition of samples was determined using optical emission spectrometry (OES), X-ray fluorescence (XRF), and carbon-sulfur analyzer (LECO) method. X-ray diffraction test (XRD) was used for phase identification. The results indicate changing of the precipitated pearlite morphology as the aluminum content increases. Also pearlite and ferrite hardness increases, 178 and 164 Vickers, respectively, as a result of increasing aluminum content from 3.7 to 7.5 wt. %. Increasing the number of nodular graphites from 422 to 668 per square millimeter, reducing the graphite diameter from 13.1 to 8.8 micrometers, and changing the percentage of spherical graphite from 60 to 48 percent, with increasing aluminum content, are other noteworthy results.

### Keywords:

Al alloyed cast iron,  
In-mold process,  
Microstructure,  
Micro-hardness,  
Nodular graphite

Journal homepage: [www.foundingjournal.ir](http://www.foundingjournal.ir)

### Please cite this article using:

Khalvan M.M., Divandari M., Effects of aluminum content on microstructure and matrix hardness of spherical graphite cast irons produced by in-mold process, in Persian, Founding Research Journal, 2019, 2(4) 251-261.  
DOI: 10.22034/FRJ.2018.133149.1041

### \* Corresponding Author:

Mehdi Divandari, Associate Professor

**Address:** School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology,  
P.O. Box 16846-13114, Narmak, Tehran, Iran. Tel/Fax: +98 21 77240320.  
E-mail: [divandari@iust.ac.ir](mailto:divandari@iust.ac.ir)



انجمن علمی ریخته‌گری ایران

فصل‌نامه علمی پژوهشی

## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### تأثیر مقدار آلومینیم بر ریزساختار و سختی زمینه چدن‌های با گرافیت کروی تولیدشده به روش منیزیم در راهگاه

محمد مهدی خالوان<sup>۱</sup>، مهدی دیوانداری<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران. mehdikhalvan@gmail.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران. divandari@iust.ac.ir (نویسنده مکاتبه کننده)

#### چکیده:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۰۹

پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۰

این پژوهش به تأثیر مقادیر مختلف آلومینیم بر ریزساختار و خواص چدن‌های با گرافیت کروی تولیدشده به روش منیزیم در راهگاه اختصاص دارد. به این منظور چدن با گرافیت کروی به ترتیب حاوی ۳/۷، ۶/۴ و ۷/۵ درصد وزنی آلومینیم به صورت Y بلوک در ماسه معمولی و به روش منیزیم در راهگاه تهیه شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها بر اساس روش‌های متداول، ریزساختار چدن‌های تولیدشده با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. تعیین ترکیب شیمیایی نمونه‌ها به وسیله آنالیز عنصری کوانتومتری، طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس و آنالیز LECO و شناسایی فازهای رسوب کرده توسط آزمون تفرق اشعه ایکس انجام شد. نتایج بررسی‌ها، بیانگر تغییر مورفولوژی و افزایش میزان پرلیت رسوب کرده بر اثر افزایش مقدار آلومینیم. همچنین فاز پرلیت و فریت به ترتیب افزایش سختی به میزان ۱۷۸ و ۱۶۴ ویکرز را با افزایش آلومینیم از ۳/۷ به ۷/۵ درصد وزنی نشان می‌دهد. افزایش تعداد کره‌ها از ۴۲۲ به ۶۶۸ در واحد سطح، کاهش اندازه دانه و کرویت گرافیت‌ها به ترتیب از ۱۳/۱ به ۸/۸ میکرومتر و از ۶۰ به ۴۸ درصد، از دیگر نتایج است. شرایط بروز هر کدام از فازهای فوق مورد بحث قرار گرفته است.

#### واژه‌های کلیدی:

چدن آلومینیم‌دار،  
روش منیزیم در راهگاه،  
ریزساختار،  
ریزسختی،  
گرافیت کروی.

#### ۱- مقدمه

دلیل اصلی توجه به گروه آلیاژی آهن و آلومینیم (Fe-Al) و آهن-آلومینیم-کربن (Fe-C-Al) - یعنی چدن‌های دارای آلومینیم- اهمیت صنعتی دو فلز آهن و آلومینیم است که هر دو جزو پر مصرف ترین فلزات محسوب می‌شوند. تحقیق و توسعه گروه آلیاژی چدن‌های دارای آلومینیم سال‌ها مورد توجه بوده است. کاربرد این چدن‌ها در شرایطی است که نیاز به وزن پایین و مقاومت به اکسیداسیون بالا در دماهای مختلف مورد نظر باشد، مطرح است [۱-۴].

پژوهش در مورد نقش آلومینیم در چدن بیش از یک قرن سابقه دارد. در سال ۱۹۰۰ میلادی اولین گزارش، در مورد اثر آلومینیم روی کربن در چدن‌ها، توسط والدرون و ملاند منتشر شد. در سال ۱۹۰۶، آدامسون گزارش نمود که آلومینیم در مقادیر کم بر رسوب گرافیت در چدن تأثیر

گذاشته و عمق تبرید را کاهش می‌دهد. پس از او یک محقق ژاپنی به نام هاماسومی طی تحقیقاتی در مورد اثر عناصر مختلف بر روی گرافیت موجود در چدن‌ها، به این نتیجه رسید که آلومینیم باعث ایجاد یک سرباره ضخیم بر روی مذاب شده و امکان تولید قطعات سالم را از بین می‌برد [۵]. تحقیق وی نشان داد که تولید این چدن‌ها آسان نیست و لازم است جنبه‌های مختلف این موضوع بررسی شده و حل شود. در سال ۱۹۳۷، دو منطقه گرافیت‌زایی در چدن‌های حاوی آلومینیم یعنی زیر ۱۰ درصد و بالای ۲۰ درصد (تا ۲۵ درصد) در تحقیقات والش مورد توجه قرار گرفت [۶]. این تحقیق با شناسایی دو منطقه گرافیت‌زایی زیر ۱۰ درصد وزنی آلومینیم و بالای ۲۰ درصد تا ۲۵ درصد جزو مهمترین نتایج است که تقریباً تحقیقات سال‌های بعد- کم و بیش همین محدوده را تایید می‌کند. ویژگی‌های ساختاری مورد اشاره محققین فوق، در

دسته از چدن‌ها معمولاً فریتی، پرلیتی و یا ترکیبی از این دو همراه با گرافیت رسوب کرده بوده و بسته به نحوه انجماد حضور کاربید نیز مشاهده می‌شود [۱۶-۲۱]، همچنین این عنصر، فعالیت کربن در مذاب را افزایش داده و احتمال گرافیت‌زایی را بالا می‌برد [۲۲]، به‌علاوه آلومینیم در چدن‌های نشکن بر روی سختی نمونه و میکروسختی فازها اثر می‌گذارد [۲۳]. حضور آلومینیم می‌تواند باعث بروز تغییراتی در دامنه پایداری فازهای موجود در دی‌گرام تعادلی آهن-کربن شده [۲۴] و این عنصر می‌تواند به‌منظور تشکیل پرلیت در چدن نشکن افزوده شود [۲۵]. ضمناً از آنجاکه در چدن‌های نشکن حاوی آلومینیم تمایل به تبرید کمتر است امکان تولید قطعات نازک‌تر که فاقد کاربید است وجود دارد [۲۶].

در این تحقیق شرایط تولید گرافیت کروی در سیستم آهن-آلومینیم-کربن در محدوده زیر ۸ درصد وزنی آلومینیم و افزایش تعداد گرافیت در واحد سطح و دستیابی به توزیع مناسب گرافیت در کنار کنترل شکل گرافیت و کاربرد روش افزودن منیزیم در راهگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

فرایند ذوب با استفاده از کوره القایی، درون بوته‌ای از جنس کاربید سیلیسیم (SiC) با ظرفیت ۸ کیلوگرم انجام پذیرفت. پس از محاسبات شارژ، ابتدا قراضه فولاد (با ترکیب شیمیایی مورد استفاده در صنعت) و شمش چدن نشکن با آنالیز شیمیایی ارائه شده در جدول (۱)، ذوب و سپس دمای مذاب به ۱۴۵۰ افزایش یافت.

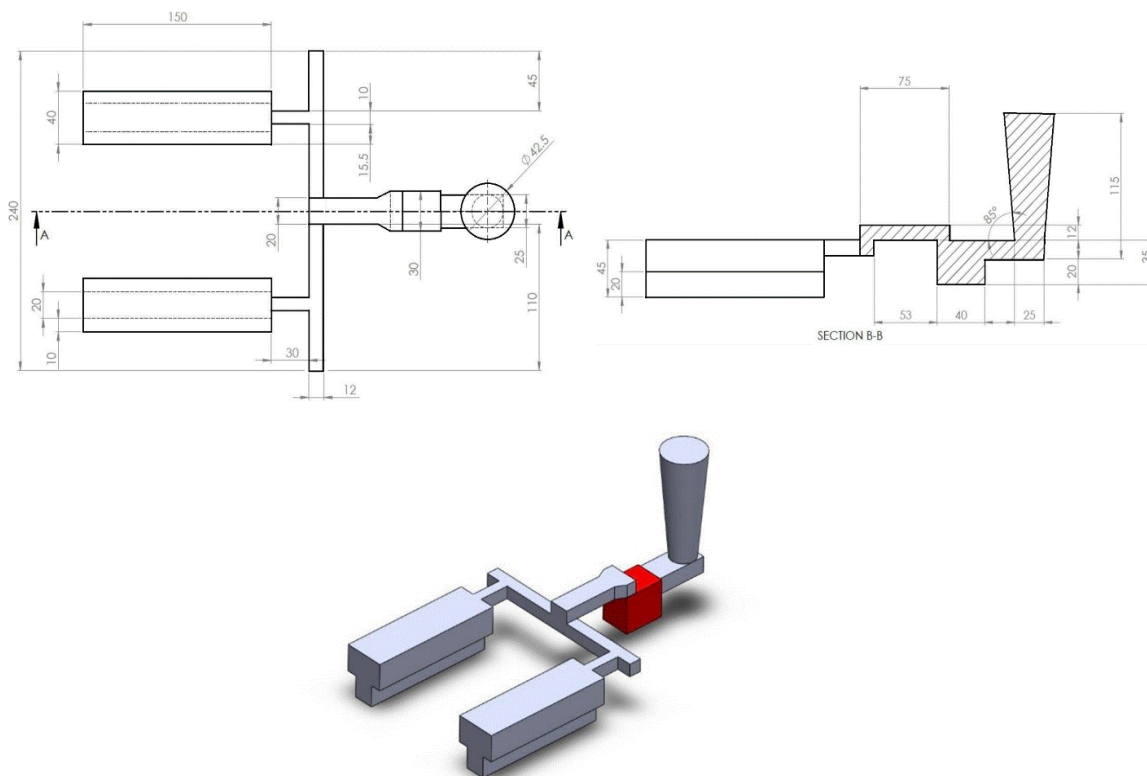
برای جلوگیری از شناور شدن آلومینیم، قطعات جامد آلومینیم خالص تجاری توسط فروبر (Plunger) به ته مذاب فرو شده و فرصت کافی به آن داده شد تا کاملاً ذوب شود. عملیات کروی‌سازی گرافیت با استفاده از آلیاژ  $(\text{FeSiMg } 5\%)$  با دانه‌بندی ۱ تا ۴ میلی‌متر به میزان ۱ درصد وزنی مذاب درون قالب صورت پذیرفت. طراحی سیستم راهگاهی همان‌گونه که در شکل (۱) قابل مشاهده

مقادیر کم آلومینیم، با تحقیقات کارلبرگ و فردریکسون سوئدی مورد تأکید قرار گرفت [۷]. به‌علاوه تحقیقات آن‌ها نشان داد که در سرعت انجمادی خاصی، گرافیت کروی بدون هیچ‌گونه عملیات خاص به وجود می‌آید. ده‌ها سال تحقیق در مورد نقش آلومینیم مورد توجه بوده است تا این که در اواخر قرن گذشته و همچنین سال‌های اخیر گزارش‌های دیگری در مورد اثر شکل و توزیع گرافیت بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی چدن منتشر می‌شود. در تحقیقی در داخل کشور در زمینه کروی کردن گرافیت در چدن‌های پرآلومینیم (۲۰ تا ۲۵ درصد وزنی) مشخص شده است که امکان تولید چدن‌های با گرافیت کروی حاوی مقادیر بالای آلومینیم (۲۰ تا ۲۵ درصد وزنی) با درصد کرویت بالا، وجود دارد [۸]. روش بکار رفته در این تحقیق منیزیم در راهگاه بوده و شکل، اندازه و نحوه توزیع گرافیت در محدوده تحقیق فوق، جالب توجه است.

شکل، اندازه و نحوه توزیع گرافیت بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی چدن اثر جدی داشته [۹-۱۱] و بررسی این اثرات مورد توجه محققین بوده است. به‌جز خواص سبکی و مقاومت به خوردگی حرارتی در دمای بالا، می‌توان به مقاومت به سایش بیشتر نسبت به چدن با گرافیت کروی معمولی، اشاره کرد. از لحاظ متالورژیکی، آلومینیم در چدن شبیه سیلیسیم عمل می‌کند [۱۲-۱۳]. بوت‌رابی و همکارانش در تحقیقی تحلیل کردند که سازوکار کروی شدن گرافیت در چدن‌های نشکن حاوی آلومینیم (Al-SG) با آنچه در چدن‌های نشکن حاوی سیلیسیم (Si-SG) مشاهده می‌شود متفاوت است هرچند استفاده از منیزیم به‌عنوان عامل کروی کننده در هر دو یکسان است ولی رفتار آهن در حین جوانه‌زنی کاملاً متفاوت است [۱۴]. همچنین گزارش شده است که آلومینیم بر تعداد، اندازه و میزان کرویت کره‌های گرافیت و همچنین فازهای رسوب کرده حین انجماد اثر می‌گذارد و به‌عنوان یک عامل مهم در جوانه‌زنی گرافیت‌های کروی در چدن نشکن معرفی شده است [۸، ۱۵]. در حالت کلی، ریزساختار این

جدول ۱- ترکیب شیمیایی شمش چدن مورد استفاده برای آلیاژسازی و آلیاژهای ریخته شده (درصد وزنی)

ماده	Fe	Al	Ni	Mn	P	S	Mg	Si	C
شمش چدن	باقیمانده	۰/۰۱۸	۰/۰۸۵	۰/۱۵	۰/۰۱	۰/۰۱۷	۰/۰۰۲	۱/۴۶	۳/۴۵
آلیاژ ۱	باقیمانده	۳/۷۲	۰/۰۴	۰/۰۴	<۰/۰۴	<۰/۰۲	-	۱/۴	۲/۸
آلیاژ ۲	باقیمانده	۶/۴۱	۰/۰۴	۰/۰۵	<۰/۰۴	<۰/۰۲	-	۰/۵۶	۳/۱۱
آلیاژ ۳	باقیمانده	۷/۵۲	۰/۰۵	۰/۰۵	<۰/۰۴	<۰/۰۲	-	۰/۲۶	۳/۰۸



شکل ۱- طرح‌واره و ابعاد مدل مورد استفاده در ریخته‌گری Y بلوک همراه با محافظه واکنش که با رنگ قرمز مشخص شده است. (ابعاد به میلی‌متر)

توسط دستگاه MHV-1000Z تحت نیروی اعمالی ۲۵ گرم و میانگین ۵ عدد سختی برای هر فاز انجام شد. برای محاسبه سختی و ریزسختی فازها از مقیاس ویکرز استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- اهمیت روش نمونه سازی آلیاژ

مطابق کلیه گزارش‌های منتشر شده، تولید چدن‌های حاوی آلومینیم به نسبت مشکل بوده و یکی از دلایل نیاز به تحقیق در این زمینه محسوب می‌شود [۵-۸، ۲۳-۲۵]. به هر حال، به سبب دشواری‌های عملیات ذوب و ریخته‌گری، به‌کارگیری شیوه‌های خاص، ضروری است. شکل (۲)، طرح‌واره نمایشی مشکلات در تولید این گروه آلیاژی است. بایستی توجه داشت که اضافه کردن آلومینیم به چدن، به‌صورت مذاب آلومینیم، اگرچه از نظر اختلاط راحت‌تر است ولی تلفات ناشی از اکسیداسیون آن بسیار بالا است [۸]. آلومینیم، هم شدیداً اکسید می‌شود و هم بسیار سبک‌تر از چدن است. به‌علاوه نقطه ذوب این دو فلز بسیار متفاوت است یعنی آلومینیم خالص با نقطه ذوب  $660^{\circ}\text{C}$  و چدن با حداقل نقطه ذوب  $1150^{\circ}\text{C}$  و معمولاً با فوق ذوب بالای  $1300^{\circ}\text{C}$ ، جزو مشکلات آلیاژسازی به شمار می‌رود.

است، انجام و مورد استفاده قرار گرفت [۲۷]. نمونه‌ها به‌صورت Y بلوک طراحی شد و در ماسه معمولی ریخته‌گری انجام شد.

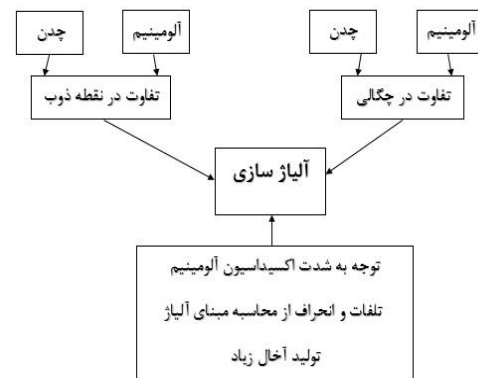
نمونه‌ها پس از ریخته‌گری، از قسمت انتهایی Y بلوک، برای انجام آنالیز عنصری به روش کوانتومتری، همچنین طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) توسط دستگاه Axios Fast و آزمون تعیین میزان کربن و گوگرد (LECO) توسط دستگاه Carbon/Sulfur Analyzer، برش داده شدند که نتایج در جدول (۱) مشاهده می‌شود. پس از آن، نمونه‌های برش یافته ابتدا مانت گرم شده و پس از سنباده‌زنی شماره ۶۰ تا ۳۰۰۰ و سپس پولیش دومرحله‌ای توسط ذرات ۱ و  $0/3$  میکرومتر آلومینا، جهت متالوگرافی آماده شد. اچ نمونه‌ها، به کمک محلول نایتال ۲ درصد و تصویربرداری توسط میکروسکوپ نوری HUVITZ مدل HRM-300 و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) دستگاه TESCAN مدل VEGA صورت گرفت. آنالیز تصاویر به‌دست‌آمده از میکروسکوپ نوری توسط نرم‌افزار ImageJ و سختی‌سنجی نمونه‌ها توسط دستگاه یونیورسال UV3 KOOPA تحت نیروی اعمالی ۲۰ کیلوگرم و میانگین ۵ عدد سختی برای هر نمونه و ریزسختی فازها

کروی کردن گرافیت از روش منیزیم در راهگاه استفاده شده است که با روش حاضر تشابه دارد [۱۵،۸]. انجام عملیات آلیاژسازی با در نظر گرفتن این سوابق پژوهشی و اجرای روش فروری آلومینیم جامد در مذاب چدن منجر به نتایج مطلوب شده و تلفات قابل توجهی، از نظر مقدار آلومینیم ایجاد نشد. البته گرمازا بودن واکنش آلومینیم با اکسیدهای موجود در سطح مذاب به افزایش دما کمک می‌کند [۲۳-۲۵].

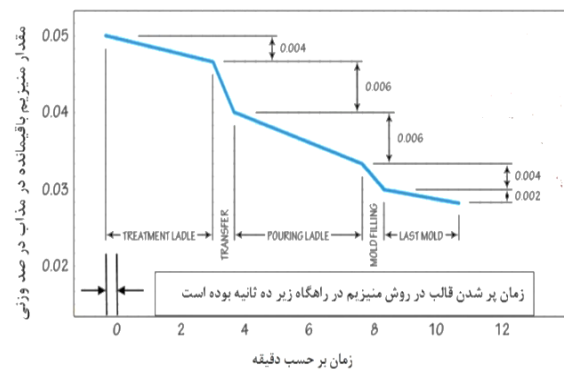
تحقیق قبل نشان داده است که با توجه به سرعت عملیات جوانه‌زنی در روش منیزیم در راهگاه می‌توان گرافیت کروی را با اطمینان بیشتری در مذاب و نهایتاً در قطعه تولید شده انتظار داشت [۸]. در این پژوهش نیز فرآیند افزودن منیزیم در راهگاه، برای تولید چدن با گرافیت کروی استفاده شد. این روش با به حداقل رساندن فاصله زمانی افزودن مواد جوانه‌زا یا کروی کننده گرافیت تا شروع مرحله انجماد و در نتیجه کاهش مشکلات مربوط به میرایی عنصر کروی کننده می‌شود. همچنان‌که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، در شرایط کارخانه‌ای ممکن است مراحل آماده‌سازی مذاب، از نظر عملیات کروی کردن و انتقال به پاتیل انتقال مذاب، شامل دوسوم وقت کل بارریزی شود که در این حالت دوازده دقیقه است. در این حالت، بارریزی داخل قالب در حدود ۴ دقیقه منظور شده است. نتیجه این است که بخش زیادی از منیزیم در سیستم تلف می‌شود. روش منیزیم در راهگاه، محدوده عملکردی منیزیم را به زیر ده ثانیه، در اغلب موارد، تقلیل می‌دهد. که در نتیجه تعداد گرافیت در واحد سطح و شرایط جوانه‌زنی گرافیت بسیار عالی است. در نتیجه، بر خلاف برخی گزارش‌ها که به نقش مخرب آلومینیم در تولید گرافیت کروی اشاره می‌کند، روش منیزیم در راهگاه، عملکرد کروی‌سازی خوب را با حضور آلومینیم نشان داده است.

کاهش مصرف آلیاژ کروی‌کننده به مقدار کمتر از نصف نسبت به روش‌های دیگر امتیازاتی دارد. از سوی دیگر افزایش بهره‌وری بازیابی منیزیم موجب کاهش تمایل به تشکیل کاربید شده و نهایتاً منجر به ایجاد گرافیت کروی مطلوب با کروی مناسب و شمارش گرافیت در واحد سطح بالا می‌شود. به دلایل فوق در این تحقیق از هیچ‌گونه مواد جوانه‌زایی استفاده نشده است. البته باید توجه داشت که روش منیزیم در راهگاه مستلزم فرآوری مذاب و طراحی دقیق سیستم راهگاهی است [۲۷-۲۹].

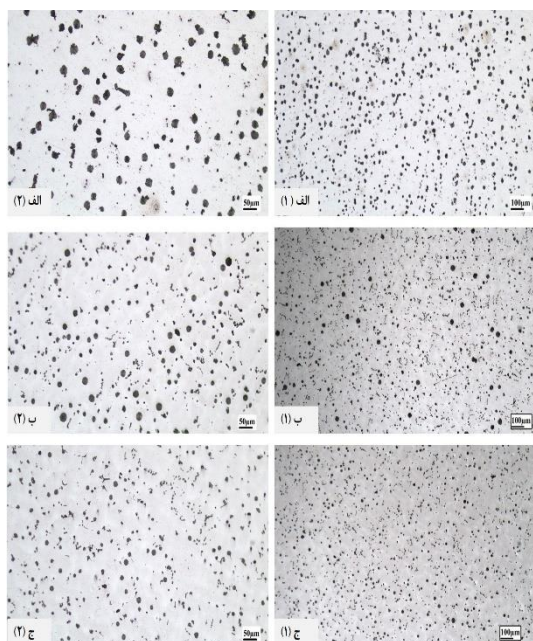
از جمله روش‌های پیشنهاد شده توسط محققین، اضافه کردن آلومینیم جامد توسط فروبر درون مذاب چدن است به‌گونه‌ای که از اتلاف بیش‌ازحد آلومینیم جلوگیری کند [۱۵]. تاکید مجدد بر این موضوع در بخش نتیجه گیری و بحث به این دلیل است که مشاهدات عملی در حین انجام مراحل این تحقیق نشان داد که این بخش از کار یعنی "مرحله ذوب و آلیاژسازی" و "ریخته‌گری" نمونه در درون قالب باید با توجه به شرایط اکسیداسیون مذاب با دقت کافی صورت گیرد. عدم توجه کامل به این موضوع باعث می‌شود که تحقیق در این زمینه در همان مرحله نمونه گیری کارگاهی- آزمایشگاهی متوقف شود. البته هر چه مقدار آلومینیم بیشتر می‌شود، آلیاژسازی سخت‌تر می‌شود. در تحقیق دیگری، در محدوده بالاتر از ۲۰ درصد آلومینیم، استفاده از روش حفاظت مکانیکی موفق بوده است که طی آن ابزاری با عنوان "محافظ مکانیکی گرافیتی" هم‌زمان با اضافه کردن مذاب سنگین به مذاب سبک استفاده شده است که عملکرد واقعی آن "جلوگیری از اکسیداسیون" بوده و نتایج خوبی داشته است. در تحقیق مذکور برای



شکل ۲- طرح‌واره نمایش موارد مشکل ساز در تولید آلیاژهای چدن آلومینیم دار



شکل ۳- نمودار محدوده عملکردی روش منیزیم در راهگاه در مقایسه با روش‌های متداول کروی‌سازی



شکل ۴- تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری از نمونه‌های حاوی: (الف) ۳/۷ (ب) ۶/۴ و (ج) ۷/۵ درصد وزنی آلومینیم جهت نمایش شکل، توزیع و اندازه گرافیت‌های کروی قبل از اچ، در دو بزرگنمایی متفاوت (اندازه میکروبارها ۱۰۰ و ۵۰ میکرومتر است).

جدول ۳- مشخصات ریزساختاری گرافیت‌های رسوب کرده در آلیاژهای مورد مطالعه

شماره آلیاژ	کرویت (درصد)	اندازه متوسط کره‌ها (میکرومتر)	تعداد کره‌ها در یک میلی‌متر مربع
۱	۶۰	۱۳/۱	۴۲۲
۲	۵۲	۹/۴	۷۰۲
۳	۴۸	۸/۸	۶۶۸

• جوانه‌زنی ذرات (MnS)X بر روی این ریز جوانه‌زها.

• رشد گرافیت بر روی این ذرات [۲۲].

در واقع، همانطور که اشاره شد، آلومینیم با افزایش مکان‌های مناسب برای جوانه‌زنی فاز گرافیت [۲۲]، منجر به افزایش تعداد کره‌ها و کاهش فاصله مورد نیاز برای نفوذ کربن از آستنیت به گرافیت می‌شود که عاملی در کاهش اندازه دانه‌های گرافیت است. همچنین از آنجایی که آلومینیم دمای استحاله یوتکتیک را افزایش می‌دهد، باعث تشکیل و رشد کره‌ها در دمای بالاتری می‌شود، بنابراین نرخ نفوذ کربن را در مذاب افزایش و همراه با تحت انجماد بیشتر احتمال تشکیل کره‌های بیشتر را افزایش می‌دهد [۲۶، ۷]. برخی بر این عقیده‌اند که حفره‌زا بودن ترکیبات آلومینیم

جدول (۱)، نتایج حاصل از آنالیز ترکیب شیمیایی نمونه‌های تهیه شده در این تحقیق را نشان می‌دهد که به وسیله روش‌های کوانتومتری، XRF و LECO بدست آمده است. به نظر می‌رسد که افزایش آلومینیم، روی مقدار کربن تاثیر نداشته است، ولی باعث کاهش مقدار سیلیسیم شده است. کاهش مقدار سیلیسیم می‌تواند در اثر کاهش حد حلالیت این عنصر در حضور آلومینیم باشد. عدم شناسایی منیزیم به احتمال زیاد به دلیل مقدار کم باقیمانده این عنصر است که جزو ویژگی‌های فرایند منیزیم در راهگاه محسوب می‌شود.

### ۲-۳- ریزساختار

در این تحقیق، ریزساختار چدن‌های با گرافیت کروی حاوی مقادیر مختلف آلومینیم مورد ارزیابی قرار گرفت [۳۰]. همان‌طور که در شکل (۴) به خوبی قابل مشاهده بوده و در جدول (۳) ذکر شده است، با افزایش درصد آلومینیم، اندازه کره‌های گرافیت، کاهش و تعداد آن‌ها افزایش پیدا کرده است که با تحقیقات قبلی محققین سازگار است. البته با افزایش درصد آلومینیم از ۶/۴ تا ۷/۵ درصد، مقداری از تعداد کره‌های گرافیت کاسته شده است که می‌تواند ناشی از تشکیل بیشتر کاربیدهای مشترک آهن-آلومینیم و کاهش حلالیت کربن در آن مقادیر و غلبه این دو عامل بر تاثیر افزایش آلومینیم بر تعداد گرافیت‌های کروی باشد. کاهش حلالیت کربن توسط محققین مختلف گزارش شده است [۶ و ۱۶]. به‌هرحال، کره‌های گرافیتی توزیع مناسب و یکنواختی در زمینه دارند که نتایج تحقیقات دیگر محققین نیز توزیع یکنواخت کره‌های گرافیتی را تایید می‌کند [۳۱]. افزایش تعداد کره‌های گرافیتی در حالی مشاهده می‌شود که در تولید آلیاژهای مذکور، از هیچ‌گونه ماده جوانه‌زایی استفاده نشده است. این مطلب، تاثیر مستقیم فرآیند منیزیم در راهگاه را نشان می‌دهد [۳۳، ۳۲، ۲۹، ۲۸]. در واقع روش منیزیم در راهگاه، باعث می‌شود که زمان میرایی نقش زیادی داشته باشد. ریپسون و همکارانش [۲۲] نحوه تشکیل گرافیت در چدن‌های نشکن حاوی آلومینیم را به‌صورت زیر بیان کرده‌اند:

• تشکیل جوانه‌زهای ریز حاوی عناصر احیاکننده قوی مانند آلومینیم: حضور ریز جوانه‌زای  $Al_2O_3$  به‌عنوان محل مناسب جوانه‌زنی ترکیب (MnS)X به‌حساب می‌آید. X می‌تواند Fe، Al و Si باشد.

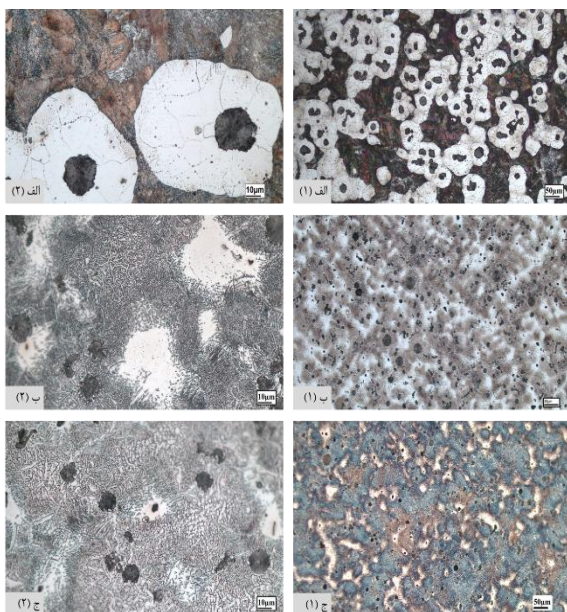


کروی شده به وسیله سریم است [۱۶] که نشان از مؤثرتر بودن منیزیم نسبت به سریم در گرافیت‌زایی چدن‌های با گرافیت کروی حاوی آلومینیم دارد.

با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق و با توجه به این موضوع که در آلیاژهای آهن-کربن، عنصر آلومینیم، پایدارکننده پرلیت طی استحاله یوتکتوئید است، پرلیت‌زا بودن آلومینیم، در مقادیر بالای ۳/۷ درصد وزنی از این عنصر مشهود است هرچند پرلیت رسوب کرده در این دسته از آلیاژها، به استناد EDS صورت گرفته از نمونه‌های موجود [۳۶]، با فاز پرلیت مرسوم در چدن‌های معمولی تفاوت دارد. بررسی تصاویر تهیه شده از میکروسکپ الکترونی روبشی که در شکل (۶) نیز مشاهده می‌شود، نشان

جدول ۴- درصد حجمی فازهای موجود در آلیاژهای مورد مطالعه

شماره آلیاژ	گرافیت	تفکیک گرافیت رسوب کرده (درصد)	فریت	پرلیت	سمنتیت
۱	۱۲	IV+ %۵۰III %۵۰	۵۲/۲	۳۵/۸	ناچیز
۲	۶/۷	IV+ %۵۴III %۴۶	۱۰/۱	۸۳/۲	ناچیز
۳	۵	IV+ %۵۷III %۴۳	۶/۳	۸۸/۷	ناچیز
گرافیت کروی = IV			گرافیت فشرده = III		



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های حاوی:

(الف) ۳/۷ (ب) ۶/۴ و (ج) ۷/۵ درصد وزنی آلومینیم جهت نمایش توزیع فازهای پرلیت و فریت، اچ شده توسط محلول نایتال ۲ درصد، در دو بزرگنمایی متفاوت (اندازه میکروبارها ۵۰ و ۱۰ میکرومتر است).

نیز یکی دیگر از عوامل تشویق جوانه‌زنی گرافیت است [۳۴]. دلیل دیگر، کاهش حلالیت کربن مذاب با افزایش درصد آلومینیم تا مقداری مشخص است که به گرافیت‌زایی بیشتر منجر می‌شود. این عوامل در نهایت به کاهش اندازه کره‌های گرافیتی و افزایش تعداد آن‌ها ختم می‌شود.

از عوامل کاهش میزان کرویت کره‌های گرافیتی می‌توان به این موضوع نیز اشاره کرد که پوسته آستنیت در اطراف گرافیت در سیستم Fe-C-Si کاملاً کروی است. درحالی‌که این پوسته در حضور آلومینیم در این سیستم، شکل کروی نداشته و شبه دندردی است. در نتیجه از کرویت گرافیت‌ها در اثر نفوذ غیریکنواخت کربن به دلیل فاصله نفوذی ناهمگون در درون پوسته آستنیت به سمت گرافیت می‌کاهد [۲۶]. گزارش‌های متعددی از مشاهده ساختاری با گرافیت‌های فشرده (کرمی شکل) علاوه بر گرافیت کروی در سیستم Fe-C-Si-Al منتشر شده است [۳۵].

همان‌گونه که تصاویر متالوگرافی بعد از اچ کردن (شکل ۵) و اعداد موجود در جدول (۴) نشان می‌دهد، با افزایش درصد آلومینیم، فاز فریت زمینه کاسته شده و فاز پرلیت افزایش پیدا کرده است که با تحقیقات قبلی در توافق است [۲۳-۲۴]. گزارش شده است که [۱۴]، در حضور آلومینیم، رسوب فاز سمنتیت ( $Fe_3C$ ) در آلیاژهای تولیدشده مشکل می‌شود که با نتایج به‌دست‌آمده در همین تحقیق سازگار است. آلومینیم فاصله پایداری و ناپایداری یوتکتیک را افزایش می‌دهد، در نتیجه شرایط را برای تشکیل کاربید در استحاله یوتکتیک مشکل می‌سازد. تشکیل کاربید در قیاس با گرافیت نیاز به دمای پایین‌تری دارد. در حضور آلومینیم و با افزایش دمای یوتکتیک و بنابراین افزایش نرخ نفوذ کربن، احتمال تشکیل کاربید به‌شدت کاهش می‌یابد [۲۶]. طبق رابطه زیر که توسط سوینسکی [۱۶] پیشنهاد شده است می‌توان مقدار حجم اشغال‌شده توسط گرافیت در چدن‌های نشکن کروی شده توسط سریم را به ازای درصدهای متفاوت آلومینیم تخمین زد.

$$P = -0.118 \times (\%Al) + 1.208 \times (\%Al) + 4.29 \quad (1)$$

که در آن، P، مقدار حجم اشغال‌شده توسط گرافیت برحسب درصد حجمی است. مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با رابطه (۱) نشان می‌دهد که در حضور مقادیر مختلف آلومینیم، گرافیت رسوب‌کرده در چدن‌های با گرافیت کروی شده توسط منیزیم بیشتر از چدن

از تفاوت مورفولوژی پرلیت رسوب‌کرده در مقادیر بالاتر از ۳/۷ درصد وزنی آلومینیم دارد که نشان از رسوب فازهای کاربیدی دارد.

### ۳-۳- سختی و میکروسختی

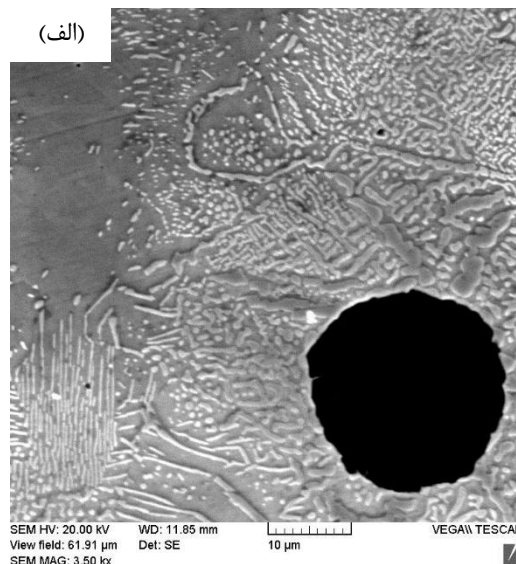
نتایج به‌دست‌آمده در رابطه با ریزسختی فازهای پرلیت و فریت که در جدول (۵) گزارش شده است، بیان‌گر افزایش ریزسختی هر دو فاز با افزایش میزان آلومینیم است. اعداد به‌دست‌آمده در رابطه با ریزسختی فازها، بیان‌گر تفاوت فریت و پرلیت رسوب‌کرده در حضور آلومینیم با فریت و پرلیت معمولی (چدن‌های با گرافیت کروی فاقد آلومینیم) است. خواص مکانیکی چدن تحت تاثیر متغیرهایی نظیر میزان کرویت گرافیت، تعداد کره‌های گرافیت، نسبت حجمی فریت به پرلیت، مورفولوژی و ظرافت فازهاست. در رابطه با افزایش سختی فاز فریت، تشکیل ترکیبات کمپلکس و محلول در فریت با عناصر آلومینیم، سیلیسیم، آهن و کربن باعث افزایش سختی قابل ملاحظه‌ای می‌شود [۳۶]. کارلبرگ [۷] نشان داده است که با افزایش درصد آلومینیم پوسته آستنیتی احاطه‌کننده گرافیت کوچک‌تر شده، بنابراین در نهایت فریتی دانه‌ریزتر و با سختی بالاتری ایجاد خواهد شد که با نتایج حاصل از همین تحقیق، تطابق دارد. در رابطه با افزایش سختی فاز پرلیت، ظریف‌تر شدن تیغه‌های سمنتیت همراه با افزایش سختی فریت موجود در لایه‌های پرلیت به دلیل ایجاد محلول جامد آلومینیم در آهن و همچنین تشکیل مقادیر زیادی از کاربید  $\epsilon$  با ترکیب  $Fe_3AlC_x$  در مقادیر بالای آلومینیم منجر به افزایش سختی فاز پرلیت می‌شود [۳۳]. نکته قابل توجه‌ای که در نمودارهای موجود در شکل (۷) مشاهده می‌شود، خطی بودن تغییرات سختی و میکروسختی با تغییر آلومینیم در بازه ۳/۷ تا ۷/۵ درصد آلومینیم است. همان‌طور که اشاره شد، از دیگر اثرات آلومینیم، تغییر مورفولوژی پرلیت رسوب‌کرده با افزایش

### جدول ۵- سختی و ریزسختی نمونه‌های چدن نشکن مورد

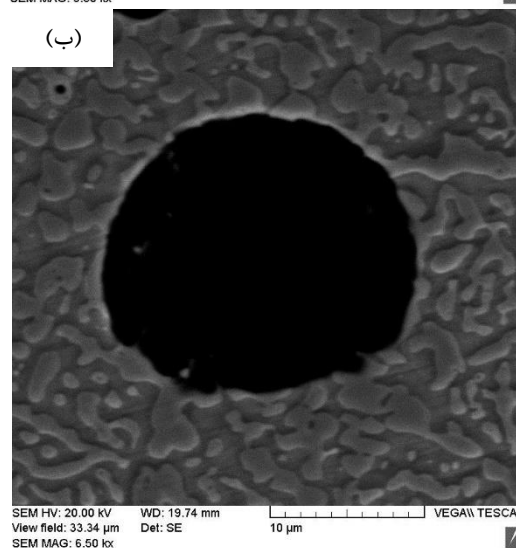
#### مطالعه

شماره آلیاژ	سختی (HV20)	ریزسختی فریت (HV0.025)	ریزسختی پرلیت (HV0.025)
۱	۲۵۱	۲۲۲	۳۵۳
۲	۴۰۷	۳۴۲	۴۹۳
۳	۴۸۲	۳۸۶	۵۳۱

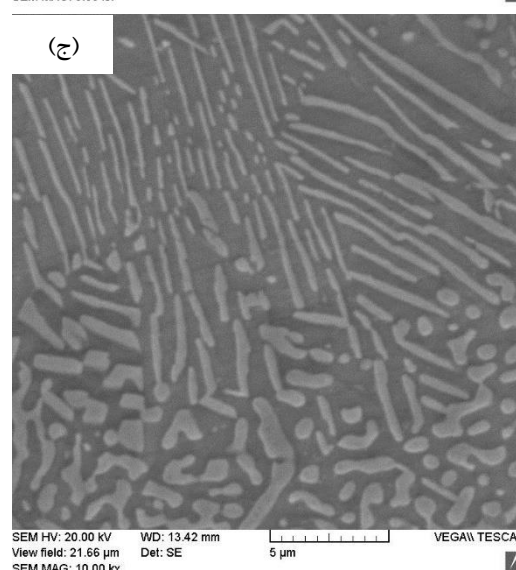
(الف)



(ب)



(ج)

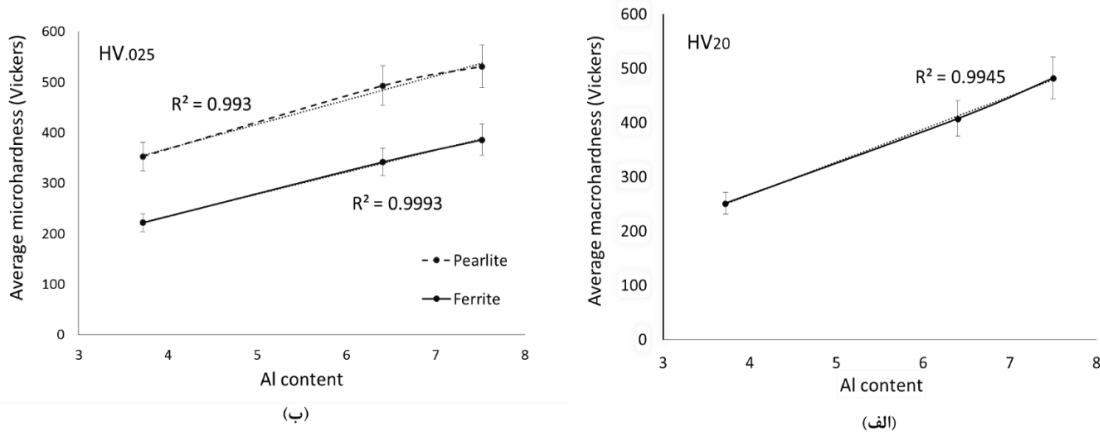


شکل ۶- تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از آلیاژ ۳: الف- نمای کلی از گرافیت کروی، پرلیت و فریت غیر معمولی ب- گرافیت کروی احاطه‌شده توسط پرلیت‌های غیر لایه‌ای، ج- نمایی از پرلیت‌های لایه‌ای

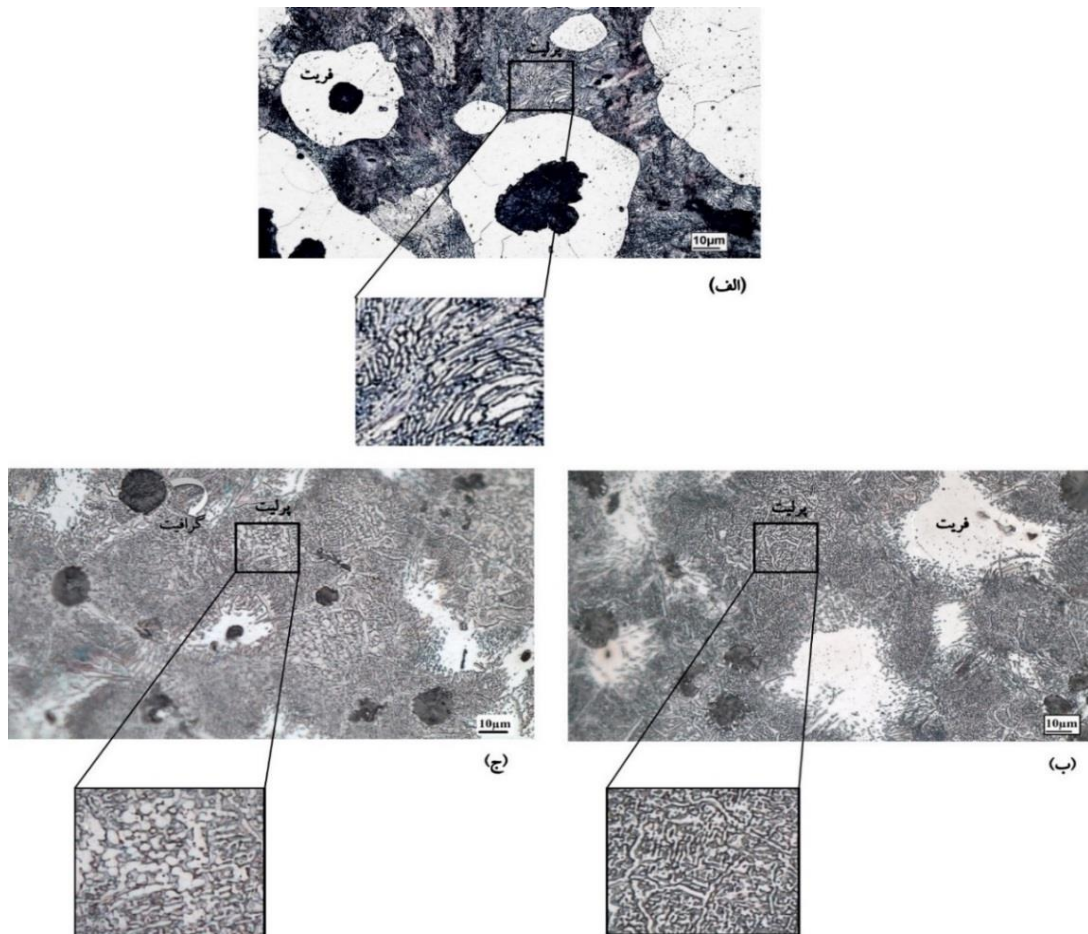


منجر به افزایش سختی فاز پرلیت می‌شود. در نهایت، افزایش سختی نمونه‌ها با افزایش میزان آلومینیم نیز به دلایل افزایش میزان پرلیت در ریزساختار و کاهش اندازه‌ی فازها به همراه افزایش میکروسختی فازهای فریت و پرلیت است.

مقدار آلومینیم حین انجماد است. همان‌گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، در آلیاژهای شماره (۲) و (۳)، کاربیدهای مشترک آهن-آلومینیم موجود در فاز پرلیت در برخی از نقاط، از حالت لایه‌ای به حالت غیرلایه‌ای تغییر شکل داده‌اند. میزان این تغییر حالت، با افزایش مقدار آلومینیم مشهودتر است. این عامل، در کنار عوامل ذکر شده،



شکل ۷- منحنی تغییرات (الف) سختی و (ب) میکروسختی فازهای موجود در چدن‌های نشکن مورد مطالعه



شکل ۸- ریزساختار چدن‌های با گرافیت کروی ریخته شده: (الف) ۳/۷ (ب) ۶/۴ و (ج) ۷/۵ درصد وزنی آلومینیم تغییر مورفولوژی پرلیت از حالت لایه‌ای به حالت غیر لایه‌ای با افزایش درصد آلومینیم

- [10] Haghdadi N., Bazaz B., Erfanian-Naziftoosi H.R., Kiani-Rashid A.R., Microstructural and mechanical characteristics of Al-alloyed ductile iron upon casting and annealing, *International Journal of Minerals*, 2012, 19, 812-820.
- [11] Zandira M., Boutorabi S.M.A., Fracture characteristics of austempered spheroidal graphite aluminum cast irons, *Journal of Iron and Steel Research International*, 2010, 17, 31-35.
- [12] Hellawell A., *Aluminium-Silicon Alloys and Cast Irons: Commercially Important Anomalous Alloys*, 1981, Chapter 5.
- [13] R. Elliott, *Cast Iron Technology*, Butterworth and Co. (Publishers) Ltd, London, 1988.
- [14] Boutorabi S.M.A., Young J. M., Kondic V., Ductile aluminum cast iron, *Cast Metals*, 1992, 5, 122-129.
- [۱۵] خرازی ی.، دیواندری م.، بررسی روش تولید و خواص چدن‌های پر آلومینیوم (۲۰ تا ۲۵٪)، *مجله بین‌المللی مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران*، ۱۳۶۹، (۱۱) ۲۳-۳۹.
- [16] Sołński M., Jakubus A., Kordas P., Skurka K., The effect of aluminium on graphitization of cast iron treated with cerium mixture, *Archives of Foundry Engineering*, 2014, 14, 95-100.
- [۱۷] کیانی رشید ع.ر.، گلغذار م.ع.، الگوی جدایش میکروسکوپی آلومینیوم (Al) و سیلیسیم (Si) در ریزساختار زمینه چدن‌ها با گرافیت کروی، *نشریه استقلال*، ۱۳۸۲، ۲۲، ۱۷۷-۱۸۸.
- [18] Moore W., Lord J.O., Gray cast iron machinability: quantitative measurements of graphite and pearlite effects, *AFS Transactions*, 1959.
- [19] Riposan I., Chisamera M., Stan S., Toboc P., Grasm G., White D., Ecob C., Hartung C., Benefits of residual aluminum in ductile iron, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, 20, 57-64.
- [20] Sołński M., Susek P., Hübner K., The low-aluminium cast iron of reduced silicon content treated with cerium mischmetal, *Archives of Foundry Engineering*, 2008, 8, 123-128.
- [21] Sołński M., Jakubus A., The influence of small amounts of aluminum on the effectiveness of cast iron spheroidization with magnesium, *Archives of Foundry Engineering*, 2013, 13, 80-83.
- [22] Riposan I., Chisamera M., Stan S., Skaland T., A new approach to graphite nucleation mechanism in gray irons, in *Proceedings of The AFS Cast Iron Inoculation Conference*, Schaumburg, Illinois, 2005, 31-41.
- [23] Shayesteh-Zeraati A., Naser-Zoshki H., Kiani-Rashid A.R., Microstructural and mechanical properties (hardness) investigations of Al-alloyed ductile cast iron, *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 500, 129-133.
- [۲۴] کیانی‌رشید ع.ر.، تاثیر آلومینیوم موجود بر نمودارهای فازی تعادلی Fe-C-Al-Si، *نشریه مهندسی متالورژی و مواد*، ۱۳۸۸، ۲۱، ۱۳۸۸.
- [25] Kiani-Rashid A.R., Influence of austenitizing conditions and aluminum content on microstructure and properties of ductile irons, *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 470, 323-327.
- [26] Boutorabi S.M.A., Ph.D. Thesis, University of Birmingham, May 1991.

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق، تاثیر آلومینیوم بر ریزساختار و خواص مکانیکی این دسته از آلیاژها را به شرح ذیل نشان می‌دهد.

۱- با افزایش درصد آلومینیوم در محدوده مورد آزمایش در پروژه حاضر، اندازه کره‌های گرافیت کاهش و تعداد آن‌ها افزایش یافته و فاز فریت زمینه کاسته شده و فاز پرلیت افزایش می‌یابد.

۲- ریزسختی فازهای پرلیت و فریت، با افزایش میزان آلومینیوم افزایش پیدا می‌کند. تشکیل فریت حاوی عنصر آلومینیوم و دانهریز شدن فریت از جمله عوامل سخت‌تر شدن این فاز محسوب می‌شود. ظریف‌تر شدن تیغه‌های سمنتیت همراه با افزایش سختی فریت موجود در لایه‌های پرلیت، رسوب کاربید  $\epsilon$  با ترکیب  $Fe_3AlC_x$  و همچنین تغییر مورفولوژی پرلیت از حالت لایه‌ای به حالت غیرلایه‌ای از جمله عواملی است که با سخت‌تر شدن این فاز در اثر افزایش آلومینیوم در چدن‌های با گرافیت کروی مرتبط است.

۳- سختی -ماکرو- نمونه‌ها با افزایش میزان آلومینیوم، افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش میزان پرلیت در ساختار و کاهش اندازه‌ی فازها است.

#### مراجع

- [1] Mostafavi S.M., Boutorabi S.M.A., As-cast acicular ductile aluminum cast iron, *Journal of Iron and Steel Research International*, 2009, 16, 23-28.
- [2] Liu, X., Takamori S., Osawa Y., and Yin F., Damping characteristics of cast irons with aluminum addition, *Journal of Materials Science*, 2005, 40, 5565-5567.
- [3] Rundman K.B., *Metal Casting*, Department of Material Science and Engineering Michigan Technology University, 2000, 17-19.
- [4] Silman G.L., Makarenko K., *Graphitized Cast Irons*, Metal Science and Heat Treatment, 2014, 56, 63-69.
- [5] Everest A.B., The influence of aluminum on an iron-carbon alloy, *Foundry Trade Journal*, 1927, 169-173.
- [6] Petitbon E.V., Wallace J.F., Aluminum alloyed gray properties at room and elevated temperature, *AFS Cast Metal Research Journal*, 1973, 127-134.
- [7] Carlberg T., Fredrickson H., Influence of silicon and aluminum on the solidification of cast iron, solidification and casting of metal, *Metal Society*, 1977, 115-124.
- [۸] دیواندری م.، بررسی روش تولید و خواص چدن‌های پر آلومینیوم (۲۰ تا ۲۵٪)، *پایان‌نامه ارشد، دانشکده مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران*، ۱۳۶۸.
- [9] Sidjanin L., Smallman R., Young J., Electron microstructure and mechanical properties of silicon and aluminum ductile irons, *Acta Metallurgica*, 1994, 49, 3149-3156.

[۲۷] وره‌رام ن، اثر دانه‌بندی آلیاژ کروی‌کننده در ساختار میکروسکوپی و تعداد گرافیت، ریخته‌گری، ۱۳۶۴، ۷(۲۴) ۱-۱۰.

[۲۸] پورآرین ا، دیواندروی م، بررسی تاثیر ماده کروی‌کننده بر مورفولوژی گرافیت در فرایند ریخته‌گری منیزیم در راهگاه توپر، ریخته‌گری، ۱۳۹۰، ۳۰(۹۷) ۴۰-۵۰.

[۲۹] ملکی س، دیواندروی م، خرازی ی، تاثیر دمای ریخته‌گری و سرعت سرد شدن بر روی ساختار و خواص مکانیکی در چدن نشکن تولیدشده به روش منیزیم در راهگاه (in-mold)، ششمین همایش علمی-دانشجویی مهندسی مواد و متالورژی، ۱۳۸۵، ۱۵۳-۱۵۷.

[30] Cast iron, determining of features of graphite precipitates, Polish Standard PN-EN ISO 945.

[۳۱] عجمی ب، دیواندروی م، عربی ح، بررسی تاثیر مدل فومی بر روی مورفولوژی گرافیت در صفحه‌های ریخته شده به روش منیزیم در راهگاه توپر، پنجمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران و جامعه علمی ریخته‌گری ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۰.

[۳۲] بافتی ح، حبیب‌الله‌زاده ع، محمدنژاد م، تاثیر عامل حلالیت و فاصله راهباره از محفظه واکنش بر تولید چدن نشکن در فرایند افزودن منیزیم در راهگاه، دومین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران و جامعه ریخته‌گران ایران، ۱۳۸۷، ۱-۹.

[33] Aleksandrov N., Il'icheva L., Structure of cast iron alloys containing aluminum, Metal Science and Heat Treatment, 1963, 5, 646-650.

[34] Haque M., Young J., Production of spheroidal graphite aluminum cast iron and the factors affecting it, Journal of Materials Processing Technology, 1995, 55, 186-192.

[۳۵] خادم‌حسینی ر، دیواندروی م، بوتراپی س.م.ع، مطالعات SEM بر روی ریزساختار چدن نشکن آستمپر در سیستم‌های Fe-C-Si و Fe-C-Si-Al، اولین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی و انجمن ریخته‌گری ایران، ۱۳۸۶.

[۳۶] خالوان م.م، اثر مقدار آلومینیم بر ساختار چدن نشکن تولید شده به روش منیزیم در راهگاه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۶.

