

## تأثیر افزودن ۶/۲ درصد آلومینیوم بر ریزساختار و خواص مکانیکی چدن خاکستری

### هیپوئوتکتیک

حمید سازگار<sup>۱\*</sup> و علیرضا کیانی‌رشید<sup>۲</sup>

### چکیده

چدن خاکستری یکی از مهم‌ترین مواد مهندسی می‌باشد که در صنایع کاربردهایی گوناگون دارد. با توجه به نیاز به کاهش وزن در سازه‌های صنعتی، روز به روز کاربرد این ماده رو به کاهش می‌باشد و پیش‌بینی می‌شود که با سبک‌تر شدن این محصول، کاربرد آن افزایش یابد. بدین‌منظور، به چدن خاکستری ذوب شده به وسیله کوره دوار، ۶/۲ درصد آلومینیوم درون بوته مذاب اضافه شده است. پس از ریخته‌گری مذاب تولیدی در قالب ماسه خشک، تعیین ترکیب شیمیایی و بوژه درصد آلومینیوم، بررسی‌های ریزساختاری به وسیله میکروسکوپ نوری و الکترونی، بررسی‌های خواص مکانیکی شامل سختی‌سنجی، آزمون کشش و آزمون فشار و بررسی‌های فازی به وسیله تحلیل‌گر تفرق اشعه ایکس (XRD) انجام شد. نتایج حاکی از آن است که افزودن آلومینیوم به چدن خاکستری سبب کاهش مقدار ورقه‌های گرافیت می‌شود و یک فازی ثانویه حاوی مقادیر زیاد کربن و آلومینیوم در زمینه‌ی حاوی مقادیر زیاد آهن و سیلیسیم ایجاد می‌کند. ایجاد چنین فازهایی و کاهش درصد گرافیت منجر به افزایش سختی و کاهش استحکام کششی و فشاری می‌شود.

واژه‌های کلیدی: چدن خاکستری، آلومینیوم، ریزساختار، خواص مکانیکی.

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

\*- نویسنده مسئول مقاله: hamid.sazegaran@gmail.com

## پیشگفتار

چدن‌ها دسته‌ای از مواد مهندسی می‌باشند که به علت ارزان بودن و ویژگی‌های جالب توجه، کاربردهایی گسترده دارند. چدن خاکستری پُرکاربردترین ماده فلزی در بین چدن‌هاست و علت آن این است که خواص مفیدی همانند قابلیت پُرکنندگی خوب قالب، قابلیت ماشینکاری خوب، نقطه ذوب پایین در بین آلیاژهای آهنی، مقاومت به خوردگی خوب، قابلیت جذب ارتعاشات مکانیکی، توانایی میرایی مکانیکی و هزینه نهایی نسبتاً پایین را دارا می‌باشد. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی چدن‌های خاکستری وابسته به ریزساختار آن‌ها بویژه نوع، نحوه توزیع و پراکندگی ورقه‌های گرافیتی می‌باشد [۱].

افزایش استحکام کششی، مقاومت در برابر شوک‌های حرارتی و مقاومت در برابر لایه‌ای شدن در دماهای بالا و همچنین، بهبود قابلیت ماشینکاری به عنوان مهم‌ترین مزایای افزودن آلومینیوم به چدن‌ها بشمار می‌روند و کاربرد این دسته از چدن‌ها در ساخت مانیفولد‌های خروج گاز، بدنه توربوشاژرها، رتور ترمزهای صفحه‌ای، بوش سیلندر، میل سوپاپ‌ها و رینگ پیستون‌ها را سبب می‌شود [۲]. این در حالی است که چدن‌های حاوی آلومینیوم، به گونه‌ای گسترده مورد استفاده قرار نگرفته‌اند و دلیل آن مواجه شدن با مشکلات زیادی در هنگام ریخته‌گری می‌باشد [۳-۶]. تشکیل حفرات انقباضی یکی از مهم‌ترین مشکلات ریخته‌گری در چدن‌های نشکن آلومینیوم‌دار می‌باشد [۷]. عملیات حرارتی یکی از فرآیندهای موثر بر ریزساختار در چدن‌های حاوی آلومینیوم محسوب می‌شود و می‌تواند سبب ایجاد محصولات مختلفی براساس استحاله فاز آستنیت گردد [۸ و ۵]. فرآیند آستمپرینگ چند مرحله‌ای تاثیرات مفید فراوانی بر مقاومت در برابر سایش چدن‌های کرومی حاوی آلومینیوم دارد [۹].

افزودن آلومینیوم به چدن سبب ایجاد تغییر در دماهای تحولات فازی می‌شود. افزودن ۲ درصد آلومینیوم به مقدار  $16^{\circ}\text{C}$  دمای تشکیل پرلیت را افزایش می‌دهد و افزودن ۶ درصد آلومینیوم این دما را  $96^{\circ}\text{C}$  افزایش خواهد داد [۱۰]. افزایش مقدار آلومینیوم در چدن‌های

آلومینیوم‌دار سبب کاهش مقدار کاربیدهای بین‌دانه‌ای<sup>۱</sup> و افزایش گرافیت‌های کرمی‌شکل می‌گردد [۱۱]. افزودن آلومینیوم به چدن‌های نشکن موجب کاهش فریت آزاد و کاربید می‌شود و این در حالی است که کسر حجمی پرلیت را افزایش خواهد داد و با افزایش درصد آلومینیوم، فواصل بین لایه‌های پرلیت کاهش می‌یابد [۱۲].

کیانی رشید<sup>۲</sup> و همکارش [۱۳] تحولات فازی در چدن‌های آلومینیوم‌دار را به وسیله دیلاتومتري مورد بررسی قرار داده‌اند. براساس یافته‌های آن‌ها، در چدن‌های حاوی ۰/۴۸ درصد آلومینیوم، استحاله مارتنزیتی در بالاتر از  $200^{\circ}\text{C}$  رخ می‌دهد، در چدن‌های حاوی ۴/۸۸ درصد آلومینیوم این دما برابر  $196^{\circ}\text{C}$  می‌باشد و در چدن‌های حاوی ۶/۱۶ درصد آلومینیوم هیچ‌گونه تحولی مشاهده نمی‌شود. مصطفوی کاشانی<sup>۳</sup> و همکارش [۱۴] پژوهشی در مورد چدن‌های نشکن آلومینیوم‌دار انجام داده‌اند. آن‌ها بیان داشتند که آلومینیوم شدیداً گرافیت‌زا می‌باشد و رفتاری مشابه سیلیسیم در چدن‌های نشکن از خود نشان می‌دهد. بررسی‌های فراوانی بر روی چدن‌های گرافیت‌کروی انجام شده است [۱۵-۱۸]. اما متأسفانه مطالعات چندانی در مورد افزودن آلومینیوم به چدن‌های خاکستری وجود ندارد. هدف از این پژوهش افزودن ۶/۲ درصد آلومینیوم به چدن خاکستری هیپوپوتکتیک و بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی آن می‌باشد.

## مواد و روش آزمایش‌ها

جهت انجام آزمایش‌های ریخته‌گری از چدن خاکستری هیپوپوتکتیک تجاری و آلومینیوم خالص تجاری استفاده شد. تهیه مذاب به وسیله کوره دوار صورت گرفت. مذاب با دمای  $1400^{\circ}\text{C}$  تولید شد و ریخته‌گری در قالب ماسه‌ای خشک انجام شد. جهت بررسی تاثیرات درصد‌های زیاد آلومینیوم بر روی ریزساختار، هیچ‌گونه مواد تلقیحی و جوانه‌زا به مذاب افزوده نشد. انتقال مذاب از کوره تا قالب توسط بوتله گرافیتی انجام گرفت. دو قالب ماسه خشک تهیه شد که پس از انجام فرآیند ریخته‌گری،

<sup>1</sup> - Intercellular Carbides

<sup>2</sup> - A.R. Kiani-Rashid

<sup>3</sup> - S. M. Mostafavi Kashani

### نتایج و بحث

در شکل ۱ نتایج بدست آمده از متالوگرافی نمونه‌های A و B پیش از اچ ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، هر دو نمونه دارای گرافیت‌های ورقه‌ای از نوع A می‌باشند. با مقایسه دو شکل، آشکار است که در نمونه B مقدار گرافیت‌ها کم‌ترند و این احتمال می‌رود که با افزودن مقدار ۶/۲ درصد آلومینیوم، مقدار انحلال کربن در زمینه افزایش یابد و در نتیجه، گرافیت‌های ورقه‌ای کاهش یابند. در پژوهش مصطفوی کاشانی و همکارش [۱۵] و همچنین، در پژوهش کیانی رشید [۱۹] اظهار شده است که آلومینیوم به شدت گرافیت‌زا می‌باشد که با نتایج بدست آمده از این پژوهش همخوانی ندارد. گفتنی است که هر دو پژوهش چدن‌های نشکن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ورقه‌های گرافیتی موجود در نمونه آلومینیوم‌دار به نسبت ظرفیت‌تر از نمونه بدون آلومینیوم می‌باشند که این امر نیز بر انحلال کربن در زمینه تاکید دارد.

در شکل ۱-ب به نسبت شکل ۱-الف نواحی تیره‌رنگ بیش‌تری مشاهده می‌شود که به احتمال زیاد، به تشکیل اکسید آلومینیوم و یا ایجاد کاربیدهای مختلط آلومینیوم و آهن ارتباط پیدا می‌کنند. ذرات اکسیدی و کاربیدهای سخت معمولاً در فرآیند پولیش از زمینه فلزی جدا می‌شوند و حفره‌ای خالی به جای می‌گذارند. با این استدلال، در نمونه B، با افزودن آلومینیوم اکسید آلومینیوم یا کاربیدهای مختلط ایجاد می‌گردد و نواحی تیره‌رنگ بیش‌تری در تصاویر متالوگرافی مشاهده خواهد شد.

در شکل ۲، تصاویر متالوگرافی نمونه‌های اچ شده به مدت ۲ ثانیه در محلول نایتال ۲ درصد به تصویر کشیده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، نمونه A دارای ساختار کاملاً پرلیتی می‌باشد، اما نمونه B دارای ریزساختاری متشکل از دو فاز متفاوت است. در ریزساختار نمونه آلومینیوم‌دار دو فاز مشاهده می‌شود که یکی به صورت دندریتی درون دیگری رشد یافته است. ایجاد فاز ثانویه در ریزساختار نمونه B می‌تواند تاثیر فراوانی بر خواص مکانیکی آن داشته باشد.

در شکل ۳، تصاویر متالوگرافی نمونه‌های اچ شده نشان داده شده است. این شکل نیز وجود ریزساختار کاملاً

دو نمونه با نام‌های A و B تولید گردید. نمونه A، بدون آلومینیوم و به عنوان نمونه شاهد و نمونه B، آلومینیوم‌دار می‌باشد. افزودن آلومینیوم به مذاب جهت تولید نمونه B درون بوته گرافیتی پس از ریخته‌گری نمونه A صورت گرفت. نمونه‌های ریخته‌گری به صورت استوانه‌ای با قطر ۲۵ mm و ارتفاع ۲۵۰ mm تولید شدند. نتایج آنالیز ترکیب شیمیایی نمونه A و B در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به توضیح است جهت تعیین درصد آلومینیوم نمونه B، آنالیز کمی توسط اسپکترومتری جذب اتمی انجام شد و درصد آلومینیوم برابر ۶/۲ درصد وزنی مشخص گردید.

نمونه‌های ریخته شده در ابعاد مناسب جهت انجام متالوگرافی برش زده شدند و عملیات مانت گرم بر روی آنها انجام شد. نمونه‌ها پس از سمباده‌زنی و پولیش کاری، پیش از اچ و پس از اچ (به وسیله محلول نایتال ۲ درصد) به وسیله میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند. تعداد دیگری از نمونه‌ها بدون استفاده از مانت توسط محلول نایتال ۲ درصد اچ شدند و جهت بررسی به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (LEO 1450VP) مورد استفاده قرار گرفتند. جهت شناسایی فازهای ایجاد شده از اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده به وسیله پرتو الکترونی (EDX) استفاده گردید.

بمنظور شناسایی فازهای موجود در ریزساختار، آنالیز فازی به وسیله دستگاه XRD مدل Philips Analytical X-Ray B.V. انجام گرفت. در این آزمایش، ماده آند از جنس مس می‌باشد و مولد دستگاه، جریانی به صورت ۴۰kV و ۳۰mA تولید می‌کند. دیفرکتومتر دستگاه از نوع PW3710 می‌باشد. آزمایش‌های خواص مکانیکی انجام شده شامل سختی‌سنجی ویکرز به وسیله دستگاه سختی‌سنج VICKERS-ARMSTAONGS، آزمایش فشار و آزمایش کشش به وسیله دستگاه Zwick مدل Z250 با ظرفیت ۲۵۰kN و براساس استاندارد ASTM E 8M می‌باشند.

فازهای موجود ارائه شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز وجود فاز زمینه و فاز ثانویه را اثبات می‌نمایند.

براساس آنالیز EDX روی فاز زمینه و فاز ثانویه (شکل ۵-ج) مشخص می‌گردد که فاز ثانویه دارای مقادیر آلومینیوم و کربن بالاتری نسبت به فاز زمینه می‌باشد. این احتمال می‌رود که نفوذ کربن به درون فاز ثانویه منجر به کاهش مقدار ورقه‌های گرافیت می‌شود که در توافق با نتایج متالوگرافی پیش از این می‌باشد. افزون بر این، مشاهده می‌گردد که درصد سیلیسیم در فاز زمینه به نسبت فاز ثانویه بیشتر می‌باشد. مشاهده می‌شود که افزایش درصدهای زیاد آلومینیوم به چدن سبب تغییرات شدیدی در ریزساختار می‌گردد و منجر به از بین رفتن ریزساختار پرلیتی و ایجاد یک ریزساختار شبه‌دندریتی می‌گردد. احتمال می‌رود که فاز زمینه، فریت با مقادیر زیادی سیلیسیم به عنوان عنصر آلیاژی باشد که شبکه مکعبی مرکز حجمی (BCC) دارد. حضور مقادیر زیاد سیلیسیم در فاز فریت زمینه منجر به افزایش سختی زمینه می‌شود.

بمنظور شناسایی دقیق فازهای موجود در ریزساختار چدن آلومینیوم‌دار، آنالیز XRD انجام شد که در شکل ۶ نتایج بدست آمده ارائه شده است. بر اساس شکل، پیک‌های ظاهر شده دو فاز را نشان می‌دهند که یکی مربوط به آهن با ساختار مکعبی مرکز حجمی می‌باشد که فاز فریت زمینه می‌باشد و فاز دوم ترکیبی از سه عنصر آلومینیوم، آهن و سیلیسیم با استکیومتری  $Al_{0.7}Fe_3Si_{0.3}$  می‌باشد. بر اساس آنالیز EDX، این احتمال وجود دارد که در هنگام جوانه‌زنی و رشد فاز ثانویه، کربن به درون آن نفوذ می‌کند و این فاز دارای مقادیر زیادی کربن نیز خواهد بود که در آنالیز XRD قابل شناسایی نمی‌باشد. نتایج بدست آمده با نتایج بدست آمده از تصاویر میکروسکوپی نوری و الکترونی روبشی کاملاً انطباق دارند.

نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها خواص مکانیکی شامل سختی‌سنجی، آزمایش فشار و آزمایش کشش در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، افزودن ۶/۲ درصد آلومینیوم به چدن خاکستری هیپوئوتکتیک منجر

پرلیتی نمونه A و وجود ساختاری دندریتی نمونه B را تایید می‌کند. در نمونه A (در شکل ۳-الف) فاز آستدیت که یوتکتیک سه‌تایی آهن، فسفر و فسفید آهن می‌باشد، مشاهده می‌شود. فاز آستدیت دارای نقطه ذوب پایینی در حدود ۹۴۰ تا ۹۸۰°C می‌باشد و لذا، جزء آخرین فازهایی است که منجمد می‌شود. به همین دلیل است که این فاز همیشه در مرز دانه‌ها تجمع می‌کند و این امر باعث کاهش خواص مکانیکی می‌شود [۱]. در نمونه A مشاهده می‌شود که فاز آستدیت بر روی ورقه گرافیت جوانه‌زنی کرده و در امتداد مرزها رشد می‌یابد. این گونه جوانه‌زنی و رشد در تمامی تصاویر بدست آمده آشکارا مشاهده می‌شود. افزون بر فاز آستدیت، نوعی آخال نیز در این شکل مشاهده می‌شود که براساس رنگ خاکستری، می‌توان اظهار داشت که از نوع آخال‌های سولفیدی است. در شکل ۳-ب، سه فاز شامل فاز زمینه، فاز ثانویه که در قسمت‌هایی از فاز زمینه جوانه‌زنی و به صورت دندریتی رشد یافته و هم‌چنین، ورقه‌های گرافیت مشاهده می‌شود. در بررسی‌های ریزساختاری هیچ‌گونه فاز آستدیت در نمونه B مشاهده نمی‌شود که به احتمال زیاد، حضور مقادیر زیاد آلومینیوم به تشکیل نشدن این فاز منجر می‌شود. هر چه مقدار آستدیت کمتر و توزیع آن یکنواخت‌تر باشد، خواص مکانیکی بهتر می‌شود و در نمونه B به علت نبود این فاز، می‌توان انتظار داشت که خواص مکانیکی به نسبت نمونه A بهتر باشد و این در حالی است که حضور فاز ثانویه تشکیل شده در ریزساختار نمونه B می‌تواند منجر به تغییر در خواص مکانیکی شود.

همان گونه که در شکل ۳-ب مشاهده می‌شود، اچ شدن مناسب نمونه B در مدت زمان ۲ ثانیه رخ نداده است و جهت برطرف شدن این مسئله، پس از پولیش دوباره، نمونه آلومینیوم‌دار به مدت ۱۷ ثانیه اچ می‌شود و شکل ۴ تصاویر بدست آمده در بزرگنمایی‌های گوناگون را نشان می‌دهد. در این اشکال، وجود فاز زمینه و یک فاز دندریتی که درون زمینه رشد یافته است، مشاهده می‌گردد. فاز ثانویه به گونه یکنواخت در تمامی قسمت‌های زمینه توزیع یافته است. در شکل ۵ تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به ریزساختار نمونه B اچ شده و هم‌چنین، نتایج EDX

✓ افزودن ۶/۲ درصد آلومینیوم به چدن خاکستری هیپویوتکتیک سبب تغییر ریزساختار از یک ریزساختار کاملاً پرلیتی به ریزساختاری شامل یک فاز فریت غنی از سیلیسیم و یک فاز ثانویه که به صورت دندریتی رشد یافته است، می‌شود. فاز ثانویه دارای ترکیب شیمیایی به صورت  $Al_{0.7}Fe_3Si_{0.3}$  می‌باشد.

✓ با افزودن آلومینیوم، سختی به میزان ۱۷/۵ درصد افزایش می‌یابد که به تشکیل فاز ثانویه پراکنده شده در زمینه فریتی ارتباط پیدا می‌کند.

✓ ایجاد فاز ثانویه  $Al_{0.7}Fe_3Si_{0.3}$ ، استحکام فشاری را کاهش و تاثیر چندانی بر مدول الاستیک فشاری ندارد.

✓ با افزودن ۶/۲ درصد آلومینیوم، استحکام کششی، مدول الاستیک کششی و انرژی جذب شده تا نقطه شکست هر کدام به ترتیب به مقدار ۴۳/۳، ۳۱/۲ و ۴۰/۵ درصد کاهش می‌یابند.

### سپاسگزاری

این مقاله نتیجه طرح پژوهشی با کد ۲/۲۱۸۴۸ در جلسه ۲۷۳ مورخ ۱۳۹۱/۰۳/۰۹ در دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد و با حمایت مالی معاونت محترم پژوهشی انجام شده است.

به افزایش سختی می‌گردد. این افزایش سختی تقریباً ۱۷/۵ درصد می‌باشد که مقدار قابل توجهی است. افزایش سختی در نمونه B را می‌توان به ریزساختار شامل زمینه فریتی و فاز ثانویه با استکیومتری  $Al_{0.7}Fe_3Si_{0.3}$  که به صورت دندریتی رشد یافته است، ارتباط داد. تغییرات ریزساختاری در نمونه چدن خاکستری آلومینیوم‌دار سبب افزایش مدول الاستیک فشاری به مقداری ناچیز و کاهش استحکام فشاری به میزان ۳۱/۵ درصد می‌گردد. با افزودن آلومینیوم، استحکام کششی، مدول الاستیک کششی و انرژی جذب شده تا نقطه شکست براساس سطح زیر منحنی تنش- کرنش هر کدام به ترتیب به میزان ۴۳/۳، ۳۱/۲ و ۴۰/۵ درصد کاهش می‌یابند. تفاوت‌های ایجاد شده در خواص مکانیکی را می‌توان به تغییرات ریزساختاری بویژه تغییر در مقدار ورقه‌های گرافیت پراکنده شده در زمینه و ایجاد فاز ثانویه حاوی درصد بالای آلومینیوم و کربن، ارتباط داد. این انتظار وجود داشت که با افزودن آلومینیوم به چدن خاکستری هیپویوتکتیک خواص مکانیکی بهبود یابد، اما بالا بودن سختی فاز ثانویه پراکنده شده در زمینه فاز فریت و ترد بودن آن به احتمال زیاد، سبب ایجاد تمرکز تنش می‌گردد که در نتیجه، خواص مکانیکی را کاهش می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

در پژوهش انجام شده مقدار ۶/۲ درصد آلومینیوم به چدن خاکستری هیپویوتکتیک افزوده و نتایج زیر بدست آمده است.

### References

- 1- C.F. Walton, and T.J. Opar, Iron Casting Handbook, Iron Casting Society Inc., New York, 57, 1981.
- 2- D.L. Sponseller, W.G. Sholz, D.F. Rundle, AFS Trans. 84 (305), 353-368, 1976.
- 3- M. Ghoshy, and V. Kondic, the Metals Society, 562-568, 1983.
- 4- R. Elliott, and Cast Iron Technology, Butterworths & Co. (Publishers) Ltd., London, 1988.
- 5- A.R. Kiani-Rashid, The influence of aluminum heat treatment conditions on

- austempered ductile irons, Ph.D. Thesis, University of Leeds, UK, 2000.
- 6- A.R. Kiani-Rashid and D.V. Edmonds, Int. J. Eng. 15, 261-272, 2002.
- 7- M.M. Haque, Journal of Materials Processing Technology 191, 360-363, 2007.
- 8- A.R. Kiani-Rashid, Journal of Alloys and Compounds 474, 490-498, 2009.
- 9- E. Kutelia, N. Khidasheli, O. Tsurtsumia, and G. Beradze, Procedia Engineering 2, 1219-1224, 2010.
- 10- H.T. Angus, Cast Iron, Physical and Engineering Properties, Butterworths & Co. (Publishers) Ltd., London, 1978.

- 11- D.M. Stefanescu, and Martinez, AFS Trans. 39, 39–46, 1982.
- 12- A. Shayesteh Zeraati, H. Naser Zoshki, and A.R. Kiani Rashid, Journal of Alloys and Compounds 500, 129–133, 2010.
- 13- A.R. Kiani Rashid, and D.V. Edmonds, Materials Science and Engineering A 481–482, 752–756, 2008.
- 14- S. M. Mostafavi Kashani, and S. M. A. Boutorabi, Journal of Iron and Steel Research, International, 16 (6) 23-28, 2009.
- 15- M. Zandira, and S. M. A. Boutorabi, Journal of Iron and Steel Research, International, 17(2): 31-35, 2010.
- 16- S. Seifeddine, and I. L. Svensson, Materials and Design 31, S6–S12, 2010.
- 17- M. M. Haque, and J. M. Young, Journal of Materials Processing Technology 55, 186-192, 1995.
- ۱۸- افشین قناعی، حسین ادریسی، حسین مناجاتی‌زاده و محمدحسین حسن‌نیا، بررسی اثر دمای تبلور دوباره بر خواص پخت سختی فولادهای فوق کم کربن، مجله مواد نوین، جلد ۳، شماره ۳، بهار ۱۳۹۲.
- 19- A.R. Kiani Rashid, Journal of Alloys and Compounds 470, 323–327, 2009.

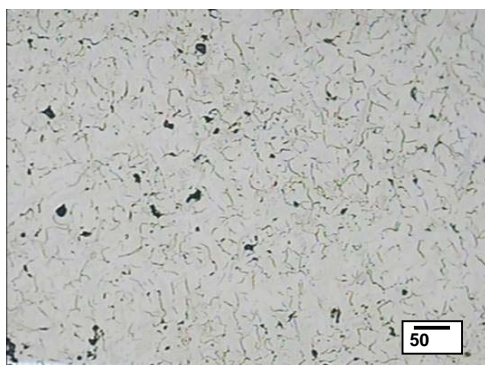
### پیوست‌ها

جدول ۱- ترکیب شیمیایی نمونه‌های A و B (درصد وزنی).

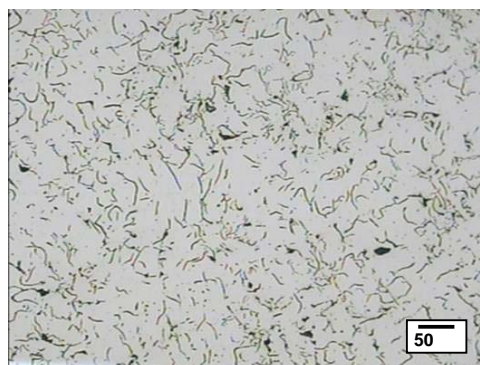
نمونه	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Co	Ti	V	Fe
A	۲/۷۷۱	۱/۹۷۲	۰/۳۴۶	۰/۱۲۳	۰/۲۶۲	۰/۰۷۶	۰/۰۵۲	۰/۰۱۶	۰/۰۰۴	۰/۳۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۱۲	باقیمانده
B	۲/۶۱۲	۱/۸۵۹	۰/۳۲۳	۰/۱۱۴	۰/۲۴۷	۰/۰۷۱	۰/۰۴۹	۰/۰۱۵	۶/۲۰۲	۰/۲۸۵	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۱۱	باقیمانده

جدول ۲- نتایج آزمایش‌های خواص مکانیکی چدن‌های مورد بررسی.

نمونه	سختی (HV)	خواص فشاری		خواص کششی	
		استحکام (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	استحکام (MPa)	مدول الاستیک (GPa)
A	۲۴۲	۸۰	۱۰۰	۱۹۴/۰	۹/۲۳
B	۲۸۴	۵۴/۷	۱۰۳	۱۰۹/۷	۶/۳۵

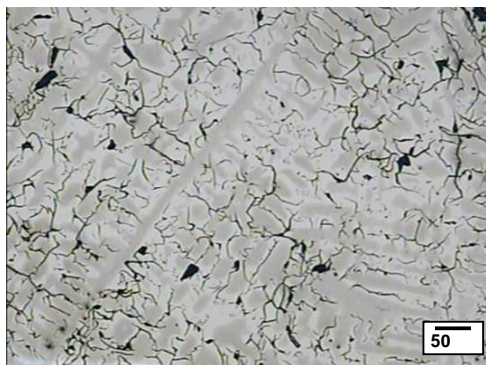


ب



الف

شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌ها قبل از اچ، الف) نمونه A و ب) نمونه B.

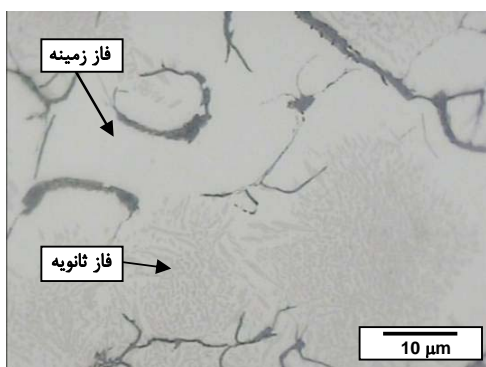


ب

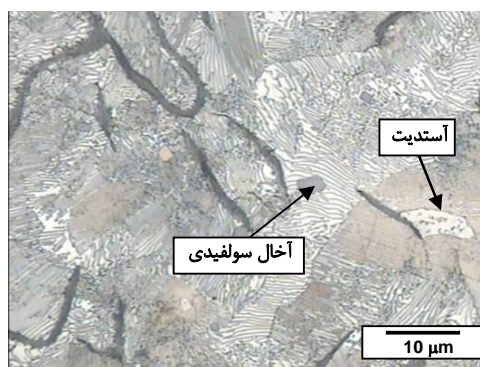


الف

شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های اِچ شده در نایتال ۲ درصد به مدت ۲ ثانیه، الف) نمونه A و ب) نمونه B.

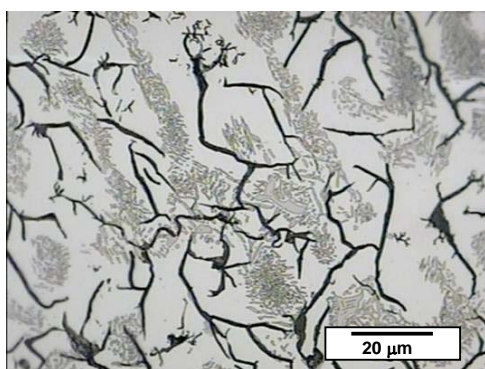


ب

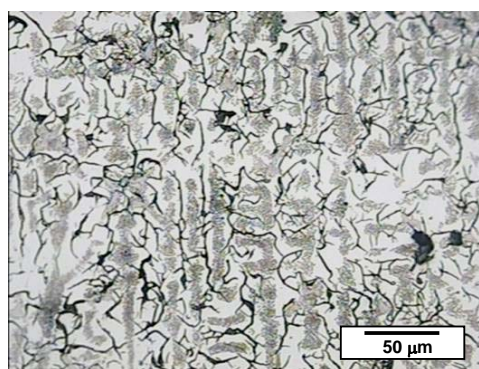


الف

شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های اِچ شده در نایتال ۲ درصد به مدت ۲ ثانیه، الف) نمونه A و ب) نمونه B.



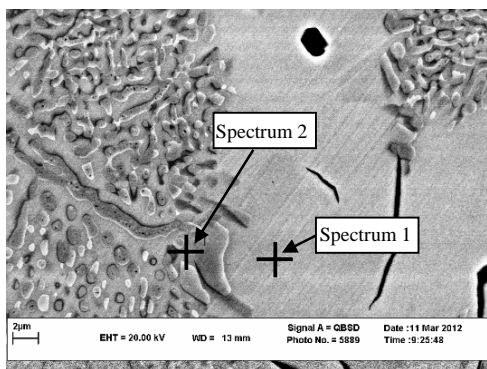
ب



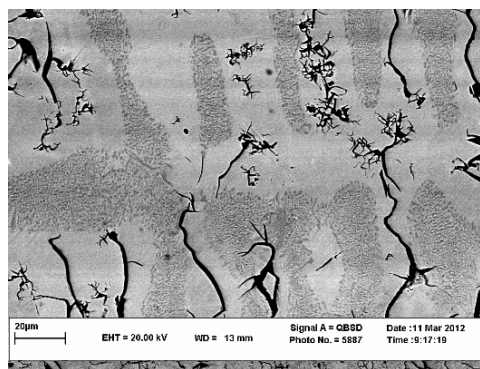
الف

شکل ۴- تصاویر بدست آمده از نمونه B پس از اِچ به مدت ۱۷ ثانیه در نایتال ۲ درصد، الف: در بزرگنمایی پایین تر و ب: در بزرگنمایی بالاتر.

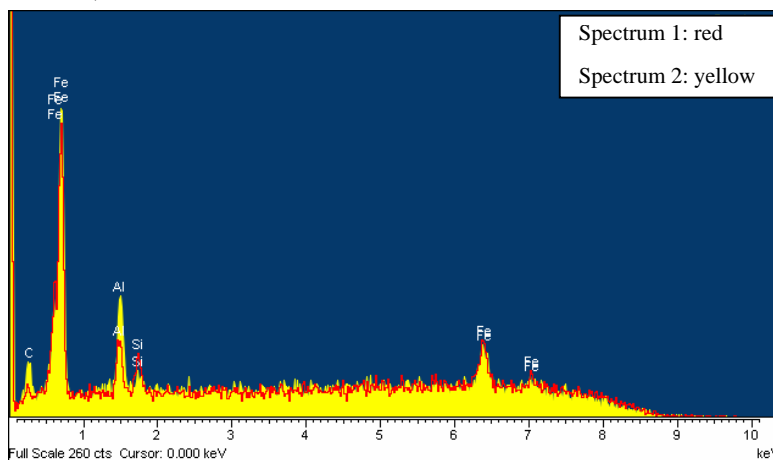




ب

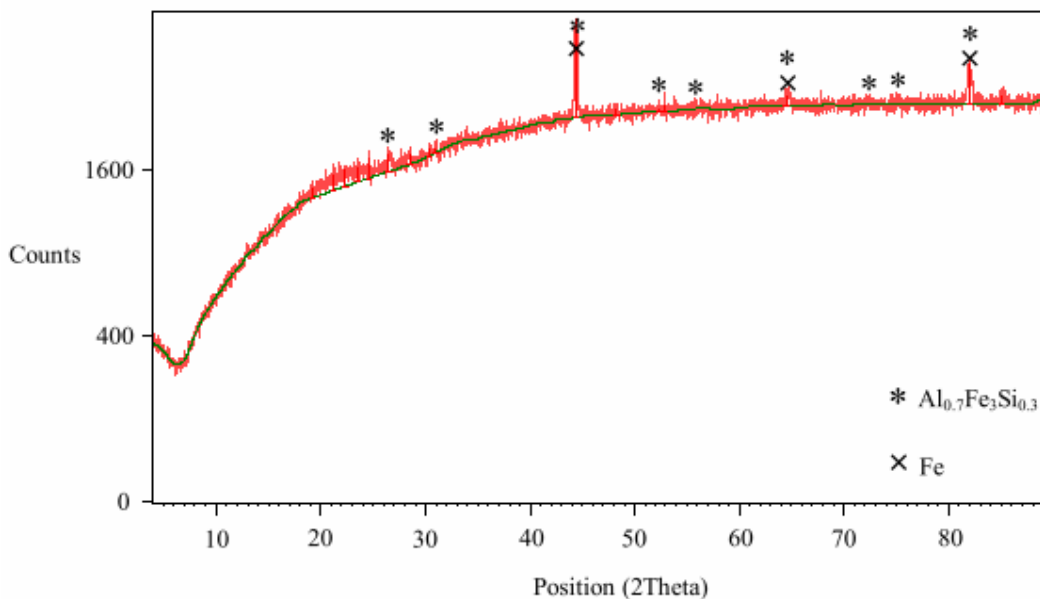


الف



ج

شکل ۵- الف: تصویر SEM نمونه B در بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر، ب: تصویر SEM نمونه B در بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر، ج: آنالیز EDX فاز زمینه و فاز ثانویه در محل‌های مشخص شده بر روی شکل قسمت ب.



شکل ۶- نتایج بدست آمده از آنالیز XRD نمونه چدن خاکستری آلومینیوم‌دار.