



## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

## مقاله پژوهشی:

بررسی تاثیر جوانه‌زایی  $CeO_2$  و  $Hf$  بر ریزساختار و سختی فولاد آستنیتی منگیزیسید میثم سجادی<sup>۱\*</sup>، سید محمد علی بوترابی<sup>۲</sup>، مهدی محمدعلیها<sup>۳</sup>، صابر بالی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران،

۲- استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران،

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنایع و معادن ایران،

۴- کارشناس ارشد مهندسی مواد، بخش تحقیق توسعه، شرکت ریخته‌گری بهریز فولادان

\* نویسنده مکاتبه کننده: s\_sajjadi@metalleng.iust.ac.ir

## چکیده:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵

فرآیند ریزدانه‌سازی با اعمال روش‌های عملیات حرارتی نمی‌تواند به طور موثری برای فولادهای تک فاز آستنیتی از جمله فولادهای هادفیلد به کار گرفته شود. دیگر روش‌های جوانه‌زنی مانند روش‌های ترمومکانیکی، انرژی، هزینه و پیامدهای زیست محیطی بیشتری به همراه دارند. در این مقاله عوامل جوانه‌زای مبتنی بر عناصر کمیاب خاکی (REM) و به طور خاص  $CeO_2$  و  $Hf$  به صورت ریختگی و با مقادیر ۰، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد وزنی  $CeO_2$  و همچنین ۰ و ۰/۰۵ درصد وزنی  $Hf$  در یک دمای بارریزی ثابت به یک فولاد هادفیلد ریختگی افزوده شد. بررسی‌های میکروسکوپ نوری، XRD و SEM به منظور تحلیل ریزساختار مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان از تاثیر مقدار جوانه‌زا بر اندازه‌ی دانه‌های آستنیت، جدایش، کاهش ۴۲/۸۰٪ فاصله‌ی بین لایه‌های پرلیت نسبت به نمونه‌ی پایه، کاهش میکروحفرات انقباضی و افزایش سختی این فولادها علی‌رغم تغییر اندک خواص مکانیکی داشت. بررسی اندازه دانه، کاهش ۶/۳۸٪ اندازه دانه در نمونه‌ی حاوی  $CeO_2$  wt٪ ۰/۱ نسبت به نمونه‌ی پایه را نشان می‌دهد. تغییرات مقدار سختی در فولادهای جوانه‌زنی شده نسبت به فولاد پایه شاهد افزایش ۸۰/۹۵ درصدی در حالت ریختگی است که این شاخصه با توجه به لزوم دارا بودن خواص بالای ضد ساییدگی در این فولادها به شکل ویژه‌تری حائز اهمیت است.

## واژه‌های کلیدی:

فولاد هادفیلد،

اندازه دانه،

ریخته‌گری،

REM،

جوانه‌زنی،

جدایش

## ارجاع به این مقاله:

سید میثم سجادی، سید محمد علی بوترابی، مهدی محمدعلیها، صابر بالی، بررسی تاثیر جوانه‌زایی  $CeO_2$  و  $Hf$  بر ریزساختار و سختی فولاد آستنیتی منگیزی، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، پاییز ۱۴۰۰، جلد ۵، شماره ۳، صفحات ۱۶۵-۱۷۴.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2022.314453.1144

## ۱- مقدمه

طی ریخته‌گری بهبود بخشید. علاوه بر این مقدار جدایش آلیاژی و حفرات بین درندریتی که می‌تواند به طور خاص برای چقرمگی ناچ مخرب باشد را نیز کاهش داد. اما باید اشاره کرد که دشواری ذاتی در جوانه‌زنی فولادهای تک فاز و به طور خاص فولادهای آستنیتی این است که به تعداد کمی جوانه‌زای قابل دسترس برای این فولادها محدود می‌شود [۲]. جوانه‌زنی در آلیاژهای ریخته‌گری شامل جوانه‌زنی غیرهمگن فاز اولیه از مذاب با استفاده از جوانه‌زا درست قبل از ریخته‌گری (بارریزی) می‌شود. عامل جوانه‌زا باید هسته‌های پایدار در دماهای ریخته‌گری تولید کند که انطباق شبکه‌ی خوبی با فازی که می‌خواهد جوانه بزند داشته باشند و همچنین دارای انرژی فصل مشترک کم بوده و

بیشتر توسعه‌ی جوانه‌زاهای برپایه‌ی عناصر کمیاب خاکی، بر محور آلیاژهای آستنیتی استوار شده‌اند. این امر به مقدار زیادی به دلیل مکانیزم‌های استحکام بخشی بسیار محدود شده در این آلیاژها، باعث افزایش علاقه به دیگر مکانیزم‌های استحکام بخشی از جمله جوانه‌زایی شده است. این روش که در آن ناخالصی‌های غیرفلزی به عنوان عامل جوانه‌زا عمل می‌کنند امروزه تحت عنوان متالورژی ذرات پراکنده یا مهندسی ناخالصی‌ها شناخته می‌شود [۱]. در این روش با هزینه‌هایی به مراتب کمتر از دیگر روش‌ها می‌توان استحکام و چقرمگی فولادهای ریختگی آستنیتی را به طور قابل توجهی با ریزکردن آستنیت اولیه در

آزمایش شده است [۵، ۱۳، ۱۴]. متاسفانه پیشرفت قابل توجهی علی‌رغم این تلاش‌ها گزارش نشده است. از این‌رو، در پژوهش پیش رو با توجه به نیاز صنعت و همچنین مطالعات کم صورت گرفته بر روی تاثیر عناصر کمیاب خاکی بر خواص فولادهای آستنیتی به ویژه فولادهای آستنیتی منگیزی هادفیلد، به بررسی جوانه‌زایی دو جوانه‌زای  $CeO_2$  و Hf و تاثیر آن‌ها بر ریزساختار و ماکروساختار و به دنبال آن خواص سختی فولاد آستنیتی منگیزی هادفیلد پرداخته شده است. طبق بررسی‌های صورت گرفته توسط Haakonsen [۱۵]،  $CeO_2$  در جوانه‌زنی غیرهمگن آستنیت موثر بوده است. همچنین بررسی‌های Venturelli [۱۶] نشان از موثر بودن Hf در فرآیند جوانه‌زنی و بهبود خواص مکانیکی فولاد هادفیلد می‌دهد. علاوه بر این  $CeO_2$  و Hf دارای نقطه‌ی ذوب بالا، پایداری ترمودینامیکی در دمای بالا و وزن مخصوص مناسب هستند (جدول ۲)، از این رو می‌توانند برای عمل کردن به عنوان مکان‌های موثر جوانه‌زنی مستعد باشند. مطالعات بسیاری نقش عنصر سریم در جوانه‌زنی را مورد بررسی قرار داده‌اند با این حال، با توجه به واکنش پذیری بالای سریم با اکسیژن، گوگرد و فسفر در مذاب فولاد و به دنبال آن تشکیل ترکیبات اکسیدی، فسفیدی و سولفیدی گوناگون در ساختار، مطالعه‌ی هر کدام از این ترکیبات و تاثیرات متقابل آن‌ها بر یکدیگر امری دشوار خواهد بود. بنابراین درک نقش واقعی هر کدام از ترکیبات در تغییرات ریزساختار به شدت محدود خواهد شد. در تحقیق پیش رو، سعی شد تا با بررسی یکی از این ترکیبات اکسیدی به تنهایی یعنی  $CeO_2$ ، به تاثیرهای این ترکیب بر ریزساختار و سختی فولاد منگیزی آستنیتی هادفیلد در حالت ریخته‌گری، پرداخته شود. با توجه به این که همواره مشخصه‌های حالت ریختگی فولاد تعیین کننده‌ی خواص آن فولاد در مراحل پس از عملیات‌های ثانویه خواهد بود، این پژوهش بر تاثیر افزودنی‌های  $CeO_2$  و Hf بر ساختار ریخته‌گری فولاد هادفیلد متمرکز گردید.

## ۲- مواد و روش پژوهش

### ۲-۱- فرآیند ذوب و جوانه‌زنی

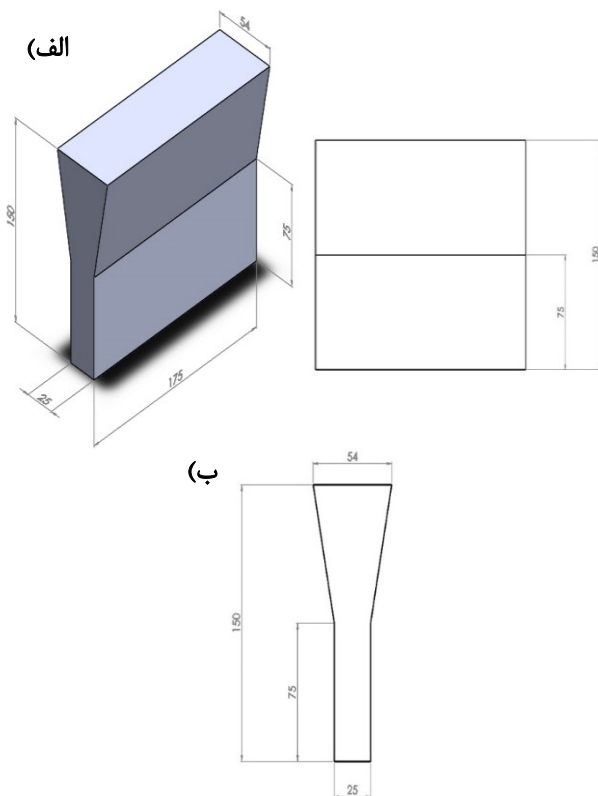
به منظور بررسی تاثیر افزودنی‌های جوانه‌زای  $CeO_2$  و Hf بر فولاد منگیزی آستنیتی هادفیلد یک مذاب از این فولاد با استفاده از یک کوره‌ی القایی فرکانس متوسط با ظرفیت ۵۰۰kg تهیه شد و ترکیب شیمیایی مذاب فولاد متناسب با استاندارد ASTM A128 (Grade B2) کنترل شد. مواد شارژ شده به کوره و درصد وزنی آن‌ها عبارتند از: ۸۲/۶ قراضه، ۱۵ فرومگنز، ۱/۸ فروکروم و ۰/۶ فروسیلیسیم. همچنین به ازای هر ۱۰۰kg ذوب

هسته قابلیت ترشوندگی سطح خوبی برای مذاب داشته باشد [۳]. به علاوه مطابق با تئوری جوانه‌زنی غیرهمگن کلاسیک، برای بهبود نرخ جوانه‌زنی و به دنبال آن افزایش بازدهی جوانه‌زنی، انرژی فصل مشترک بین عامل جوانه‌زا و هسته‌های شکل گرفته بر روی عوامل جوانه‌زا، نیاز است که تا جای ممکن کم باشد. عموماً چند عامل بر انرژی فصل مشترک تاثیر می‌گذارند، از جمله‌ی این عوامل می‌توان به انطباق اتمی کریستالوگرافیکی و اختلاف در الکترونگاتیویته بین عوامل جوانه‌زا و فازهای جوانه‌زده اشاره کرد. از آن جایی که محاسبه‌ی انرژی فصل مشترک به صورت دقیق نسبتاً مشکل است، انطباق اتمی کریستالوگرافی معمولاً برای ارزیابی پتانسیل جوانه‌زایی ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. در دهه‌های اخیر، چندین مدل برای بررسی و تخمین پتانسیل جوانه‌زایی توسعه داده شدند و تعدادی از آن‌ها در ارزیابی بازدهی جوانه‌زایی موفق بوده‌اند. این مدل‌ها شامل، روش عدم انطباق شبکه [۵، ۶]، تئوری فعالیت الکترواستاتیک [۷]، [۸] و مدل اتصال (انطباق) لب به لب (E2EM) [۹-۱۱] می‌شوند. درجه‌ی انطباق اتمی یا عدم انطباق شبکه بین هسته‌ی دارای پتانسیل و آستنیت متبلور شده را می‌توان بر اساس مدل اساسی عدم انطباق صفحه‌ای [۱۲] Bramfitt به صورت رابطه (۱) محاسبه کرد:

$$\delta_{(hkl)_n}^{(hkl)_s} = \sum_{i=1}^3 \frac{\left| \frac{d_{[uvw]_s} \cos \theta - d_{[uvw]_n}}{d_{[uvw]_n}} \right|}{3} \times 100 \quad (1)$$

که در آن  $\delta$  عدم انطباق یا عدم ثبات شبکه (lattice disregistry)،  $(hkl)_s$  صفحه‌ی با کم‌ترین اندیس مربوط به زمینه،  $[uvw]_s$  جهت با کم‌ترین اندیس در صفحه‌ی  $(hkl)_s$ ،  $(hkl)_n$  صفحه‌ی با کم‌ترین اندیس در جامد جوانه زده،  $[uvw]_n$  جهت با کم‌ترین اندیس در  $(hkl)_n$ ،  $d_{[uvw]_n}$  فاصله‌ی بین اتمی در جهت  $[uvw]_n$ ،  $d_{[uvw]_s}$  فاصله‌ی بین اتمی در جهت  $[uvw]_s$  و  $\theta$  زاویه بین  $[uvw]_s$  و  $[uvw]_n$  است.

برخی از ناخالصی‌های غیرفلزی که به صورت آزمایشگاهی پایداری آنها برای هسته‌گذاری غیرهمگن برای جوانه‌زنی فاز آستنیت ثابت شده است، شامل TiN، سولفیدها و اکسیدهای فلزات کمیاب خاکی (REM) می‌شوند. در سال‌های اخیر، تلاش‌های فراوانی از طریق افزودن مقادیر مشخصی از کاربیدها ( $TiC$ ،  $ZrC$ ،  $NbC$ )، نیتربدها ( $AlN$ ،  $TiN$ ،  $VN$ ) و اکسیدها ( $CaO$ ،  $Ce_2O_3$ ،  $Al_2O_3$ ) به مذاب برای یافتن یک روش موفق برای جوانه‌زنی و تلقیح در فولادهای آستنیتی با منگنز بالا



شکل ۱- الف و ب) طرح نمونه‌های Y-block ریختگی (ابعاد به میلی متر)،  
ج) محل قرارگیری نمونه‌های کشش و متالوگرافی استخراج شده.

## ۲-۲- آماده سازی و آزمایش‌ها

پس از فرآیند ریخته‌گری، بلوک‌ها در دمای محیط سرد شدند سپس برای تهیه و آماده سازی نمونه‌های متالوگرافی و سختی سنجی هر کدام از بلوک‌های ریخته‌گری شده به وسیله‌ی دستگاه اره نواری A25 و با استفاده از تیغه‌ی مدل M52 برش داده شدند. مکان نمونه‌های استخراج شده برای همه‌ی بلوک‌های ریخته‌گری شده یکسان انتخاب شد. نمونه‌های متالوگرافی از هر بلوک برش داده شده و سپس سنباده‌زنی و پولیش شدند و در نهایت با محلول اچانت نایتال ۲٪ اچ شده و توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند. علاوه بر این ترکیب شیمیایی هر کدام از نمونه‌ها توسط دستگاه کوانتومتری به گونه‌ای که در جدول (۳) آورده شده است، تعیین شد. بررسی‌های فازی نیز با استفاده از XRD مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور تعیین سختی بلوک‌ها از ماکروسختی سنجی و همچنین از میکروسختی سنجی با نیروی ۱۰۰ gr به منظور تعیین سختی فازها استفاده شد. مطالعه‌ی ترکیبات ایجاد شده، مورفولوژی کاربیدها و تغییرات ریزساختاری در نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل TESCAN VEGA//XMU مجهز به طیف‌سنج پراش انرژی پرتو (EDX) صورت گرفت.

مقدار ۵۰ gr آلومینیم به منظور اکسیژن‌زدایی به مذاب افزوده شد.

در جدول (۱)، ترکیب شیمیایی فولاد مذاب کوره قبل از بارریزی و افزودن آلومینیم و اندازه‌گیری شده توسط کوانتومتری آورده شده است. از آنجا که قالب‌های Y-block برای شبیه‌سازی شرایط ریخته‌گری نهایی محصولات ریختگی ایده‌آل هستند، از یک مدل Y-block مطابق (شکل ۱-الف، ب) برای قالب‌گیری با استفاده از ماسه سیلیس و گاز CO<sub>2</sub> استفاده شد. چهار قالب تهیه و برای بارریزی، پیشگرم شدند. به منظور تهیه نمونه‌ی فولاد هادفیلد پایه (نمونه ۱) مذاب کوره ابتدا به یک پاتیل به ظرفیت ۲۰ kg ریخته شد و سپس عملیات بارریزی در دمای ۱۴۲۰ °C صورت گرفت. این دما به طور ثابت به عنوان دمای بارریزی برای هر چهار نمونه در نظر گرفته شد.

برای تهیه‌ی نمونه‌ی ۲ حاوی ۰/۰۵wt.% CeO<sub>2</sub> قبل از بارریزی مذاب در پاتیل، اکسید سریم به مقدار ۰/۰۵ درصد وزنی در کف پاتیل قرار داده شد و توسط ماسه چراغی به منظور محبوس شدن پودرهای اکسید در حین بارریزی و انجماد در مذاب پوشانده شد. سپس مذاب کوره درون پاتیل ریخته شد و عملیات بارریزی در قالب صورت گرفت. جزئیات پودر اکسید سریم در جدول (۲) آورده شده است.

نمونه‌ی ۳ به صورت مشابه ریخته‌گری شد اما این بار با مقدار ۰/۱ wt.% افزودنی CeO<sub>2</sub> در کف پاتیل. بلوک ۴ نیز با فرآیندی مشابه با نمونه‌های دیگر با افزودنی ۰/۰۵wt.% CeO<sub>2</sub> تهیه شد. در تمامی نمونه‌ها در مرحله درست قبل از بارریزی در قالب، مذاب درون پاتیل به خوبی توسط یک میله‌ی فولادی هم زده شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مذاب کوره قبل از تخلیه به پاتیل (درصد وزنی).

Fe	Co	Al	Ni	Mo	Cr	S	P	Mn	Si	C	بقیه
۹۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۲- مشخصات پودر اکسید سریم و هافنیم.

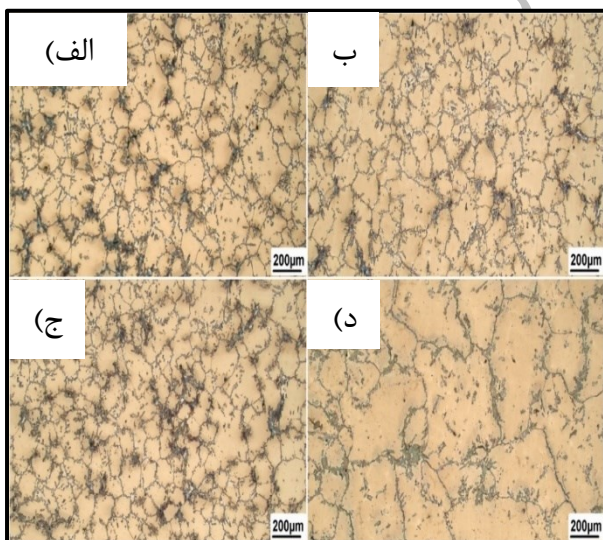
افزودنی	متوسط اندازه ذره (μm)	نقطه ذوب (°C)	وزن مخصوص (g.m/v)	خلوص (%)
CeO <sub>2</sub>	۵	۲۴۰۰	۷۲،۱۵	۹۹
Hf	۳	۲۲۳۳	۱۳۳،۱	۹۹،۸

جدول ۳- ترکیب شیمیایی نمونه‌های ریخته‌گری شده با و بدون افزودنی‌ها (درصد وزنی).

Fe	Co	Al	Ni	Mo	Cr	S	P	Mn	Si	C	شماره ذوب	نمونه
Bal.	۰/۰۳	۰/۱۹۵	۰/۰۵	<۰/۰۰۰۸۴	۱/۱۸	۰/۰۱	۰/۰۳	۱۱/۷	۰/۷۵	۱/۲۷	۱	بدون افزودنی
Bal.	۰/۰۳	۰/۱۲۹	۰/۰۵	۰/۰۱۲۵	۱/۱۷	۰/۰۱	۰/۰۳	۱۱/۷	۰/۷۵	۱/۲۷	۲	۰/۰۵ wt.% CeO <sub>2</sub>
Bal.	۰/۰۳	۰/۱۱۷	۰/۰۵	۰/۰۳۲	۱/۱۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۱۱/۸	۰/۷۲	۱/۲۸	۳	۰/۱ wt.% CeO <sub>2</sub>
Bal.	۰/۰۳	۰/۱۲۴	۰/۰۵	۰/۰۳۳۷	۱/۱۹	۰/۰۳	۰/۰۳	۱۱/۸	۰/۷۰	۱/۲۸	۴	۰/۰۵ wt.% Hf

Arvola و همکارانش با استفاده از بررسی‌های EBSD گزارش می‌کنند که برخلاف آنچه عموماً تصور می‌شود که صرفاً ذرات جواهرزای قرار گرفته در مرکز دانه‌های آستنیتی عامل جواهرزایی هستند، حضور ذرات جواهرزا در مرز دانه‌ها و حتی در محل اتصالات سه تایی دانه، عامل جواهرزایی قوی برای دانه‌های آستنیتی هستند [۱۸].

مطابق (شکل ۴) مقدار ذرات اکسید سریم در نمونه‌ی حاوی CeO<sub>2</sub> ۰/۱ wt.% بیش تر از نمونه‌ی دارای CeO<sub>2</sub> ۰/۰۵ wt.% است که این موضوع را احتمالاً عامل اصلی تفاوت اندازه‌ی دانه در نمونه‌های ۲ و ۳ می‌توان دانست. با این وجود، در این زمینه Haakonsen نیز تاثیر مقادیر مختلف جواهرزای EGR را بر اندازه‌ی دانه آستنیت در یک فولاد منگیزی آستنیتی را بررسی کرد، نتایج نشان داد که برای مشاهده‌ی تاثیر ریزدانه‌گی به یک مقدار بهینه حاوی حدود ۰/۰۵ wt.% سریم نیاز است [۱۵].



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های:

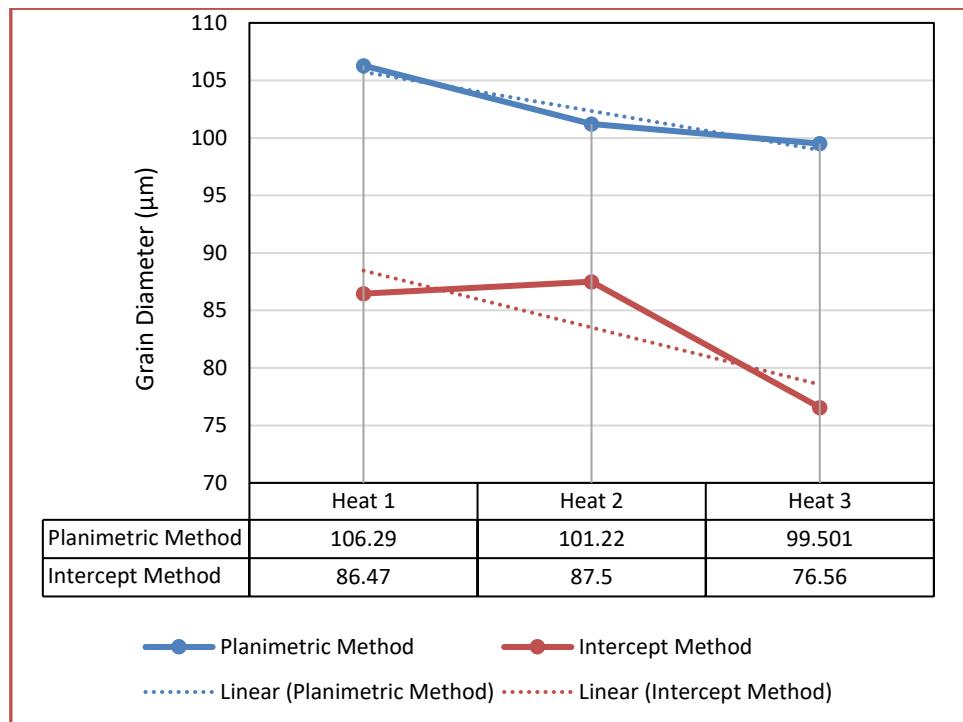
الف) فولاد هادفیلد بدون افزودنی (پایه)، ب) فولاد با CeO<sub>2</sub> ۰/۰۵ wt.%،ج) فولاد با CeO<sub>2</sub> ۰/۱ wt.% و د) فولاد با Hf ۰/۰۵ wt.%

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی اندازه دانه

چندین محقق نقش موثر سولفیدها، کاربیدها و اکسیدهای عناصر کمیاب خاکی (REM) بر ریزساختار و جواهرزایی فولادهای آستنیتی را گزارش کرده‌اند. در این بین از CeO<sub>2</sub> به عنوان یکی از اکسیدهای REM موثر در جواهرزایی فولادهای آستنیتی یاد شده است [۱۵]. در یک مطالعه‌ی مشابه از ۰/۱ wt.% Ti به همراه ۰/۰۳ wt.% N به منظور جواهرزایی یک فولاد هادفیلد مورد استفاده قرار گرفت، که نتایج نشان از افزایش اندازه دانه و همچنین افزایش کسر ساختار ستونی در نمونه‌های جواهرزایی شده نسبت به نمونه‌ی پایه می‌دهد [۱۷]. بنابراین به نظر می‌رسد برخلاف نقش موثر TiN در ریزدانه کردن فولادهای زنگ نزن آستنیتی [۲، ۱۸]، این ترکیب نمی‌تواند در جواهرزایی فولاد آستنیتی هادفیلد موثر باشد. با این حال، همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپ نوری ارائه شده در شکل (۲) مشاهده می‌شود، در مطالعه‌ی پیش رو، کاهش اندازه دانه در نمونه‌ی حاوی CeO<sub>2</sub> ۰/۱ wt.% نسبت به نمونه‌ی پایه مشهود است. با این حال به منظور بررسی کمی اندازه‌ی دانه در نمونه‌های جواهرزایی شده با CeO<sub>2</sub> و Hf و نقش این افزودنی‌ها بر میانگین اندازه‌ی دانه، مطابق با استاندارد ASTM E112 محاسبات اندازه دانه به روش Intersect و Planimetric صورت گرفت. نتایج مطابق جدول (۴)، کاهش ۱۱/۴۶٪ میانگین اندازه دانه در روش Intersect و کاهش ۶/۳۸٪ در روش Planimetric را برای نمونه‌ی حاوی CeO<sub>2</sub> ۰/۱ wt.% نسبت به نمونه‌ی پایه نشان می‌دهند (شکل ۳).

با استفاده از بررسی تصاویر SEM و همچنین آنالیز EDS صورت گرفته (شکل ۹) محل قرارگیری CeO<sub>2</sub> در ساختار مطابق (شکل ۴) هم در مرز دانه‌ها و هم در مرکز دانه‌ها بوده است که این موضوع در مطالعات Arvola که روی اثر TiN بر جواهرزایی یک فولاد آستنیتی متمرکز بوده نیز گزارش شده است [۱۸].

شکل ۳- نمودار تغییرات اندازه دانه نمونه‌های حاوی  $\text{CeO}_2$  در مقایسه با نمونه پایه.

جدول ۴- میانگین اندازه دانه اندازه گیری شده توسط دو روش Planimetric و Intercept.

Grain Diameter ( $\mu\text{m}$ )					Method	ASTM E112
Heat 4	Heat 3	Heat 2	Heat 1			
۲۴۱/۲۰۵	۹۹/۵۰۱	۱۰۱/۲۲	۱۰۶/۲۹	Planimetric Method		
۱۱۳/۰۷	۷۶/۵۶	۸۷/۵	۸۶/۴۷	Intercept Method		

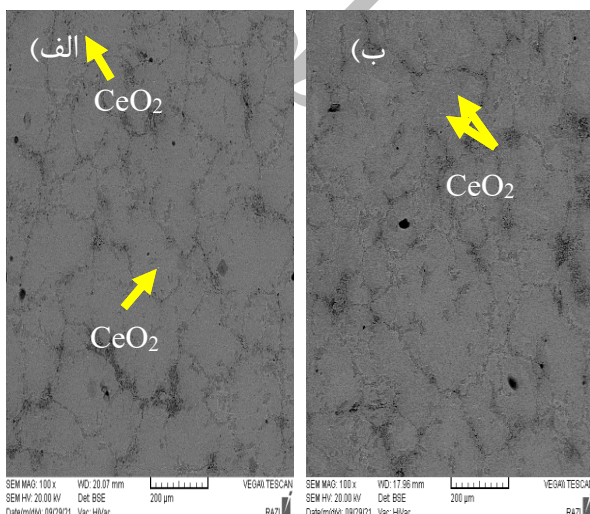
کاربید نوع پیوسته، لایه‌ای و سوزنی شکل در همه‌ی نمونه‌ها مشاهده می‌شود، اما کاربید ریز و پراکنده شده در زمینه‌ی آستنیتی صرفاً در نمونه‌های ۲ و ۳ مشاهده شد، که به‌طور مستقیم نشان از اثر عناصر جوانه‌زای  $\text{CeO}_2$  در ساختار است.

برخلاف نمونه‌های حاوی اکسید سریم، نمونه‌ی فولاد هادفیلد دارای  $0.05 \text{ wt.} \% \text{ Hf}$ ، به اندازه‌ی دانه‌های آستنیتی بزرگتری منجر شد. این موضوع را می‌توان ناشی از افزایش انحلال کربن در زمینه‌ی آستنیت در اثر حضور ذرات Hf در ریزساختار و بنابراین کاهش کاربید و افزایش میانگین اندازه‌ی دانه‌های آستنیتی دانست.

### ۳-۲- بررسی ریزساختار

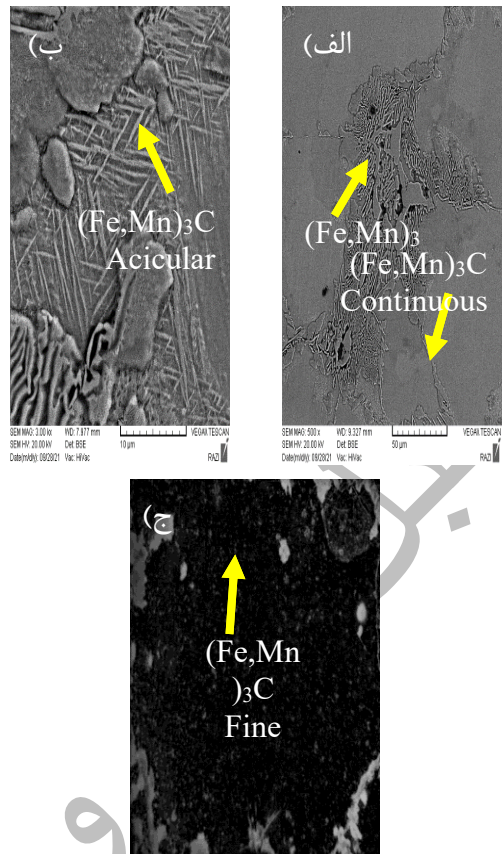
مطابق مطالعات صورت گرفته، حضور عناصر Fe و Mn در فولاد آستنیتی منگنزی هادفیلد سبب تشکیل کاربیدهای  $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$  در ساختار ریختگی می‌شود [۱۶، ۱۹]. این موضوع در مطالعه‌ی پیش رو، با استفاده از بررسی‌های EDS انجام شده نیز مشخص شد. با توجه به (شکل ۵)، مورفولوژی این کاربیدها را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد:

- (۱) کاربیدهای پیوسته در مرز دانه‌ها،
- (۲) کاربیدهای ریز و همگن در زمینه‌ی آستنیت،
- (۳) کاربیدهای سوزنی شکل و
- (۴) کاربیدهای لایه‌ای در ساختار پرلیت.

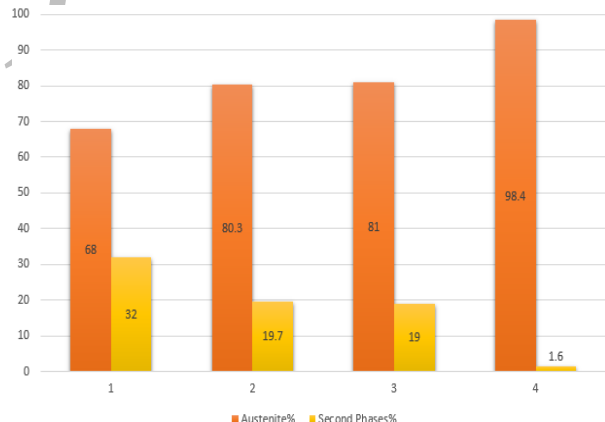
شکل ۴- تصاویر SEM توزیع ذرات  $\text{CeO}_2$  در ساختار (الف) فولاد حاوی  $0.05 \text{ wt.} \% \text{ CeO}_2$  و (ب) فولاد حاوی  $0.1 \text{ wt.} \% \text{ CeO}_2$

در واقع حضور ذرات CeO<sub>2</sub> با وجود کاهش فاز کاربید در ریزساختار (شکل ۶) باعث تبدیل مورفولوژی کاربیدها به کاربیدهای ریز و پراکنده شده در زمینه‌ی آستنیت شدند. علاوه بر این با توجه به این که میکرو حفرات انقباضی به صورت اشکال نامنظم و در مرزها ظاهر می‌شوند و در مقابل میکرو حفرات گازی عمدتاً به شکل کروی مشاهده می‌شوند، مورفولوژی و نوع میکرو حفرات موجود در ریزساختار مورد تحلیل قرار گرفت.

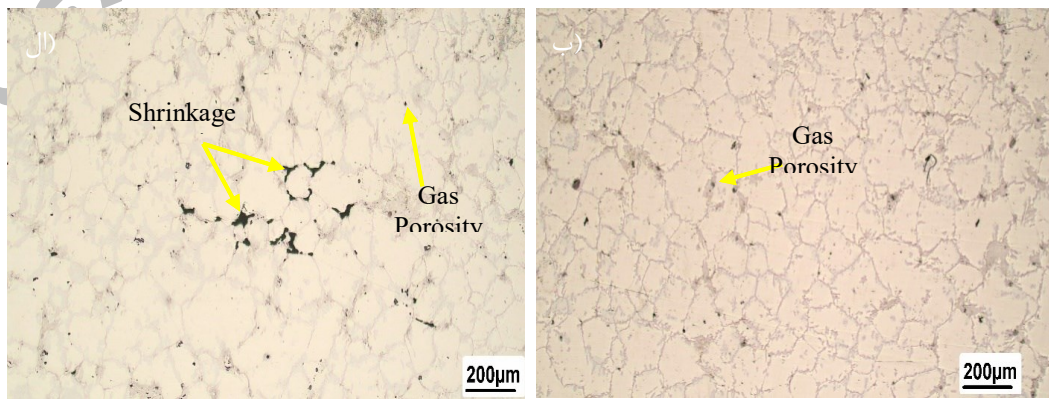
همان طور که در (شکل ۷) مشاهده می‌شود، میکرو حفرات انقباضی با افزودن ۰/۱ wt.% CeO<sub>2</sub> جوانه‌زا به ساختار در نمونه‌ی ۳، کاهش یافته است که این موضوع را می‌توان مرتبط به انبساط ناشی از حضور ذرات اکسید سریم در زمینه و همچنین عمل کردن ذرات اکسید سریم به عنوان موانعی برای انقباض زمینه‌ی آستنیتی دانست. علاوه بر این حضور کاربیدهای ریز و پراکنده شده به صورت هموزن در ساختار آستنیت به دنبال افزودن اکسید سریم نیز می‌تواند عامل دیگری برای کاهش ریز حفرات انقباضی در ساختار باشد. به علاوه، ذرات اکسید سریم با ایجاد مکان‌های مناسب برای جوانه‌زنی کاربیدهای پیچیده‌ی Fe، Mn و Cr ناخالصی‌های پیچیده را مطابق (شکل ۸) تولید می‌کنند که در کنار فوق تبرید اعمال شده ناشی از حضور ذرات CeO<sub>2</sub> در ساختار، باعث کاهش اندازه دانه، کاهش جدایش و کاهش فاصله‌ی بین لایه‌ای پرلیت از ۰/۵۶ μm در نمونه‌ی پایه به ۰/۳۲ μm در نمونه‌ی ۳ مطابق (شکل ۹) می‌شوند. فاصله‌ی بین لایه‌ای پرلیت اندازه گیری شده توسط نرم‌افزار Image J و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) کاهش ۴۲/۸۰٪ را در نمونه‌ی ۳ نشان می‌دهد. حضور کاربیدهای نوع ریز و پراکنده در زمینه‌ی آستنیت در نمونه‌های ۲ و ۳ باعث افزایش قابل توجه میکروسختی زمینه شده است (شکل ۱۱). افزودن ۰/۱wt.% CeO<sub>2</sub> ماکروسختی را از مقدار ۲۵۳/۶۶ HV به مقدار ۴۵۹HV در نمونه‌ی ۳ افزایش داده که بالاترین افزایش به میزان ۸۰٪/۹۵ را دارد (شکل ۱۱).



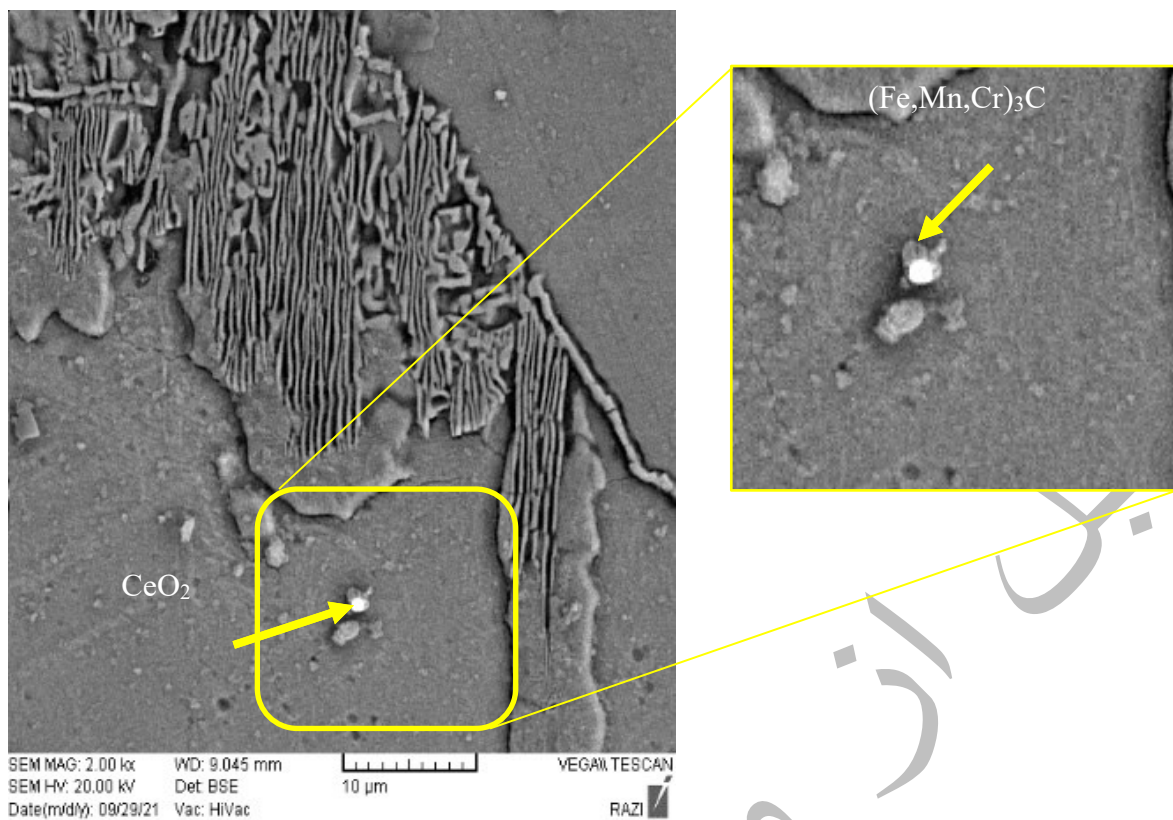
شکل ۵- مورفولوژی کاربیدها در ریزساختار فولاد هادفیلد. الف و ب) تصاویر SEM مربوط به نمونه‌ی ۱ و ج) تصویر میکروسکوپ نوری از زمینه‌ی آستنیت نمونه‌ی ۳.



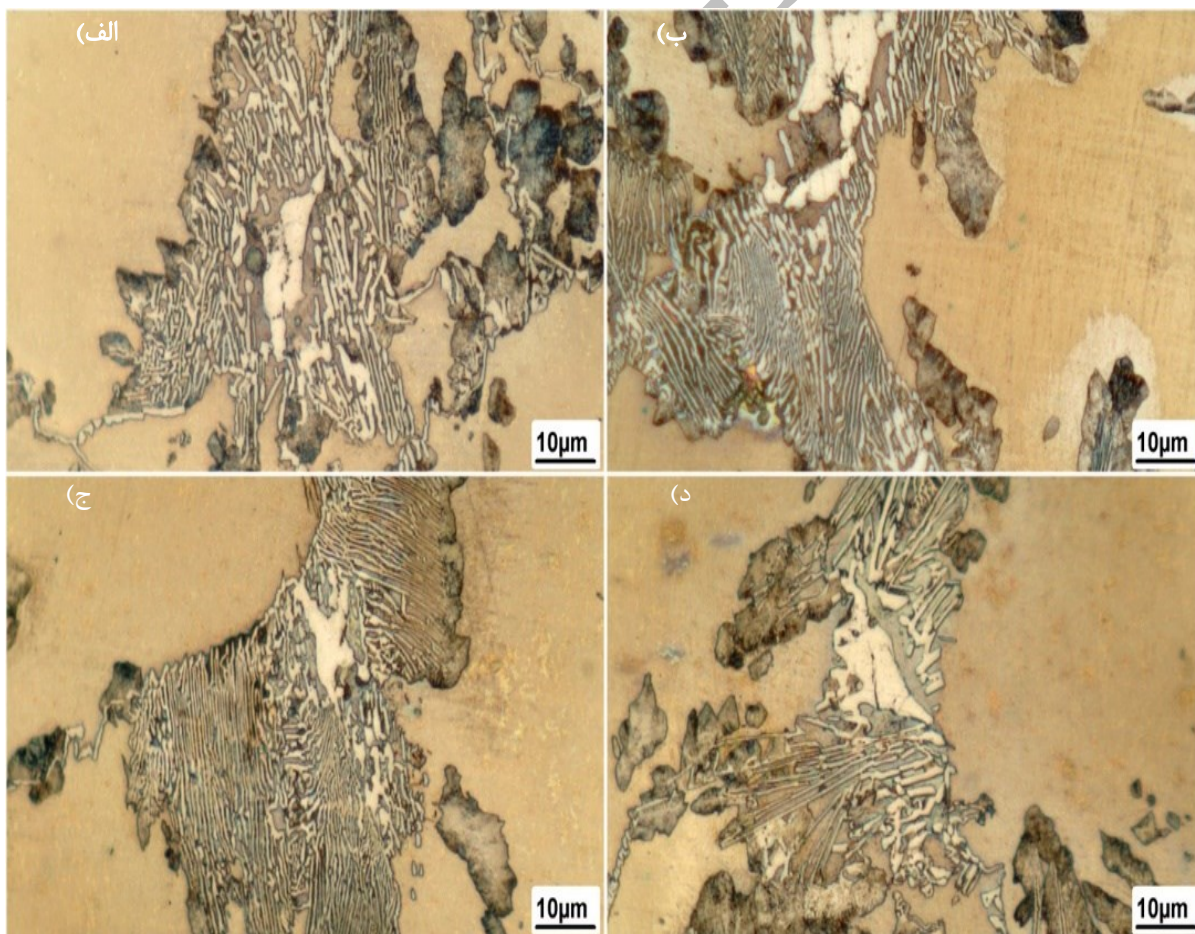
شکل ۶- درصد فازهای آستنیت و کاربید در ریزساختار، محاسبه شده توسط نرم‌افزار Expert High Score



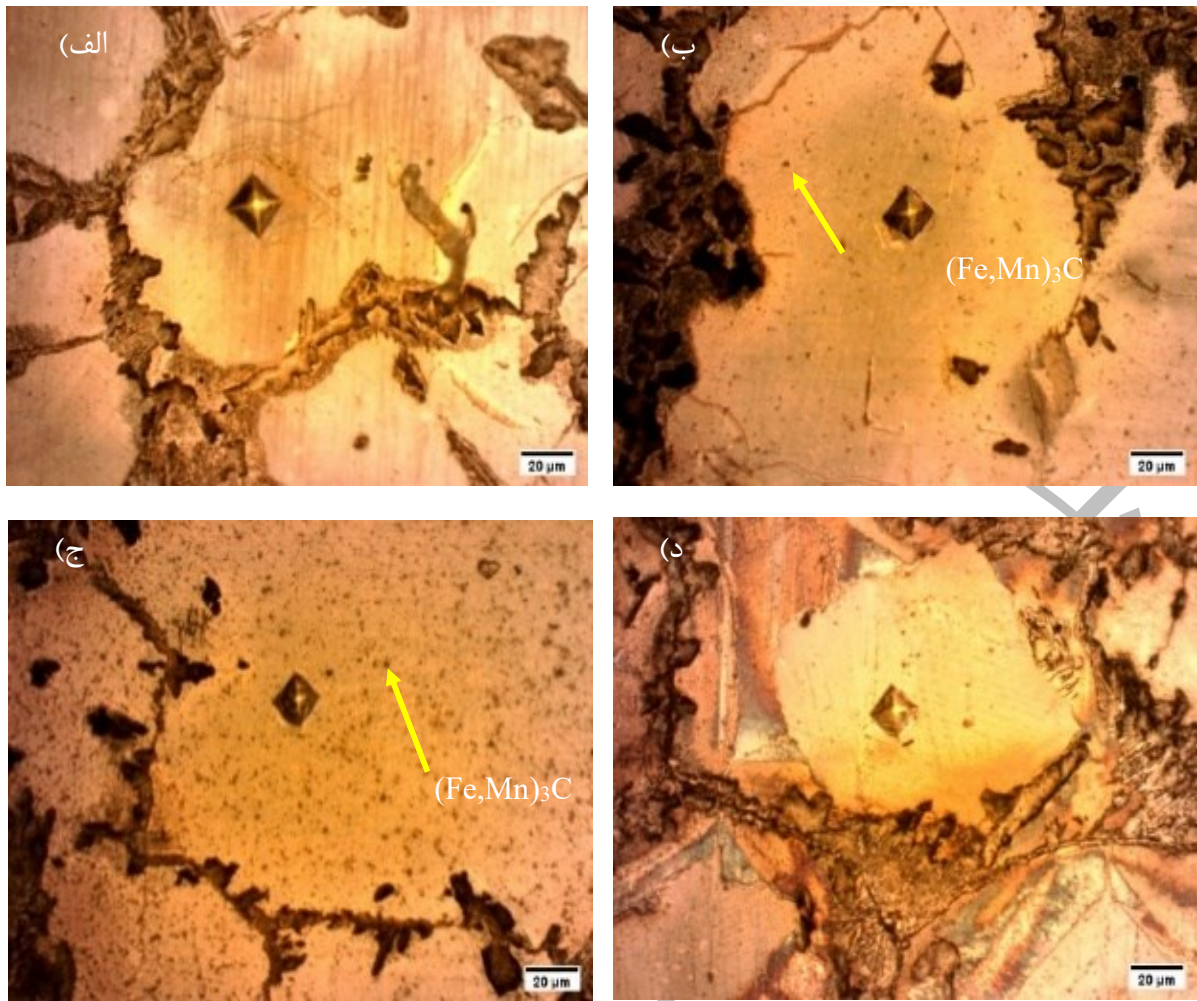
شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ نوری: الف) نمونه‌ی فولاد هادفیلد پایه و ب) نمونه‌ی فولاد هادفیلد حاوی ۰/۱ wt.% CeO<sub>2</sub>



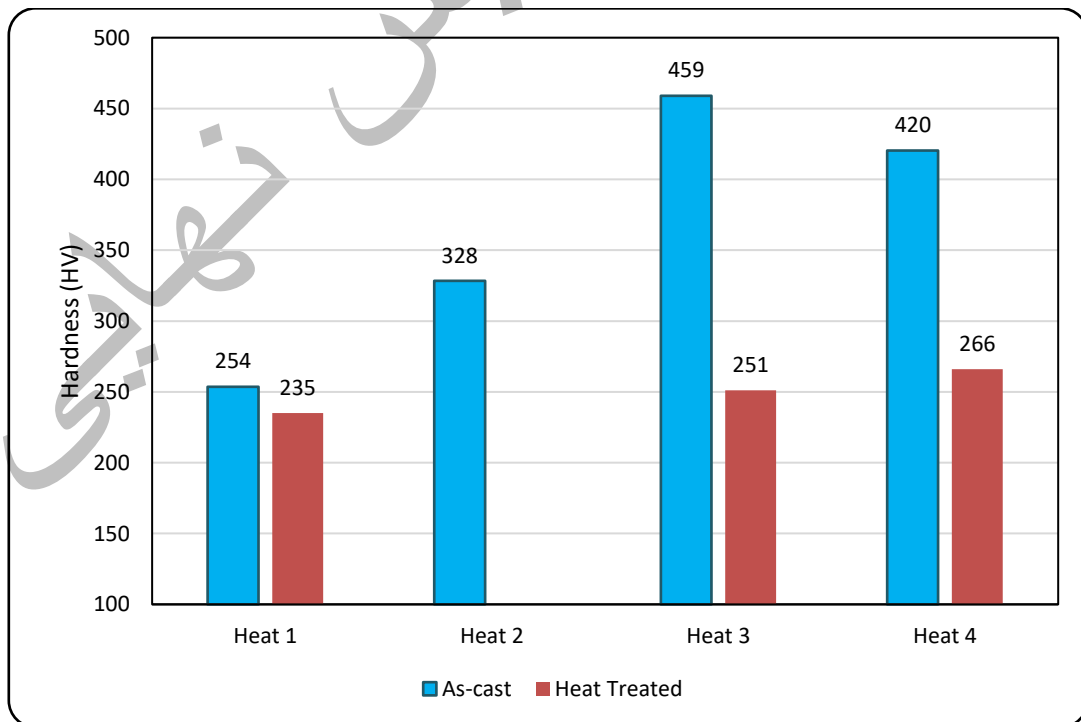
شکل ۸- رسوب کاربیدها روی ذرات  $CeO_2$  و تشکیل ناخالصی‌های پیچیده.



شکل ۹- تاثیر افزودنی‌های  $CeO_2$  و Hf بر ساختار پرلیت. نمونه‌ی: (الف) پایه، نمونه‌های حاوی (ب)  $CeO_2$  ۰/۰۵wt.% (ج)  $CeO_2$  ۰/۱wt.% و (د) Hf ۰/۰۵wt.%.



شکل ۱۰- تاثیر ذرات کاربید  $(Fe,Mn)_3C$  بر میکروسختی: الف) پایه، نمونه‌های حاوی ب)  $CeO_2$  ۰/۱wt.%، ج)  $CeO_2$  ۰/۵wt.% و د)  $Hf$  ۰/۵wt.%.



شکل ۱۱- نمودار تغییرات ماکروسختی نمونه‌های مختلف با و بدون افزودنی در دو حالت ریختگی و عملیات حرارتی شده.



- [5] Bramfitt B. L., The effect of carbide and nitride additions on the heterogeneous nucleation behavior of liquid iron, *Metallurgical Transactions*, 1970, 1(7) 1987-1995.
- [6] Turnbull D., Vonnegut B., Nucleation catalysis, *Industrial and Engineering Chemistry*, 1952, 44(6) 1292-1298.
- [7] Tiller W., Takahashi T., The electrostatic contribution in heterogeneous nucleation theory: Pure liquids, *Acta Metallurgica*, 1969, 17(4) 483-496.
- [8] Yu H.R., The empirical electron theory of solids and molecules, *Chinese Science Bulletin*, 1978, 23(4) 217-224.
- [9] Zhang X.M., Kelly P., Edge-to-edge matching model for predicting orientation relationships and habit planes the improvements, *Scripta Materialia*, 2005, 52(10) 963-968.
- [10] Kelly P., Zhang X.M., Edge-to-edge matching a new approach to the morphology and crystallography of precipitates, In *Materials Forum*, 1999, 23, 41-62.
- [11] Zhang X.M., Kelly P.M., Crystallographic features of phase transformations in solids, *Progress in Materials Science*, 2009, 54(8) 1101-1170.
- [12] Bramfitt B., Planar lattice disregistry theory and its application on heterogistry nuclei of metal, *Metallurgical Transactions*, 1970, 1(7) 1987-1995.
- [13] Tuttle R., Examination of steel castings for potential nucleation phases, *International Journal of Metalcasting*, 2010, 4(3) 17-25.
- [14] Suito H., Ohta H., Morioka S., Refinement of solidification microstructure and austenite grain by fine inclusion particles, *ISIJ International*, 2006, 46(6) 840-846.
- [15] Haakonsen F., Solberg J.K., Klevan O.S., Van der Eijk C., Grain refinement of austenitic manganese steels, *Aistech 2011 Proceedings*, 2011, 2, 763-771.
- [16] Venturelli B. N., Albertin E., Azevedo C.R.D.F., The effect of the austenite grain refinement on the tensile and impact properties of cast Hadfield steel, *Materials Research*, 2018, 21.
- [17] Fernandes P.E.G., Santos L.A., Effect of titanium and nitrogen inoculation on the microstructure, mechanical properties and abrasive wear resistance of Hadfield steels, *Rem-International Engineering Journal*, 2019, 73, 77-83.
- [18] Arvola D.A., Lekakh S.N., Omalley R.J., Bartlett L.N., Two inoculation methods for refining as-cast grain structure in austenitic 316L steel, *International Journal of Metalcasting*, 2019, 13(3) 504-518.
- [19] Sabzi M., Farzam M., Hadfield manganese austenitic steel: A review of manufacturing processes and properties, *Materials Research Express*, 2019, 6(10) 1065c2.

#### ۴- نتیجه‌گیری

ذرات  $\text{CeO}_2$  و  $\text{Hf}$  به یک فولاد آستنیتی منگنزی در طی فرآیند ریخته‌گری افزوده شد. با مطالعه‌ی ساختار ریختگی نمونه‌ها نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- افزودنی‌های  $\text{CeO}_2$  بدون تغییر در ترکیب شیمیایی و آلیاژی‌سازی باعث کاهش میانگین اندازه دانه‌ی آستنیت در ریزساختار فولاد هادفیلد از  $96/38 \mu\text{m}$  به  $88/03 \mu\text{m}$  شد.
- ۲-  $\text{Hf}$  برخلاف  $\text{CeO}_2$  باعث افزایش اندازه دانه‌های آستنیت شد.
- ۳- با افزودن مقدار  $0/1 \text{wt.}\%$   $\text{CeO}_2$  به فولاد در نمونه‌ی ۳، میکروخفرت انقباضی کاهش یافت.
- ۴- ماکروسختی و میکروسختی نمونه‌های جوانه‌زنی شده با  $\text{CeO}_2$  به دنبال تشکیل کاربیدهای ریز و پراکنده شده در زمینه‌ی آستنیت افزایش یافت.
- ۵- به ترتیب در نمونه‌های  $0/1 \text{wt.}\%$   $\text{CeO}_2$ ،  $0/1 \text{wt.}\%$   $\text{CeO}_2$  و نمونه‌ی دارای افزودنی  $\text{Hf}$ ، کاهش جدایش عناصر آلیاژی مشاهده شد.
- ۶- فاصله‌ی بین لایه‌ای پرلیت در نمونه‌ی ۳ تا  $42/80\%$  نسبت به نمونه‌ی پایه کاهش نشان می‌دهد.

#### مراجع

- [1] Mu W., Shibata H., Hedström P., Jönsson P.G., Nakajima K., Combination of in situ microscopy and calorimetry to study austenite decomposition in inclusion engineered steels, *Steel Research International*, 2016, 87(1) 10-14.
- [2] Arvola D.A., Emmendorfer M.C., Omalley R.J., Lekakh S. N., Bartlett L. N., Effect of grain refining on properties of a cast superaustenitic stainless steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(3) 1382-1390.
- [3] Bartlett L.N., Avila B.R., Grain refinement in lightweight advanced high-strength steel castings, *International Journal of Metalcasting*, 2016, 10(4) 401-420.
- [4] Ji Y., Zhang M.X., Ren H., Roles of lanthanum and cerium in grain refinement of steels during solidification, *Metals*, 2018, 8(11) 884.

IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

## Founding Research Journal

Research Paper:

### The Effect of $\text{CeO}_2$ and Hf Additives as a Grain Refinement on the Microstructure and Hardness of Hadfield Austenitic Manganese Steel

Seyed Meysam Sajjadi<sup>1\*</sup>, Seyed Mohammad Ali Boutorabi<sup>2</sup>, Mehdi Mohammadaliha, Saber Bali<sup>4</sup>

1. Ph.D. Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
2. Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran, Iran
3. M.Sc. Student, Iran University of Industrials and Mines, Tehran, Iran
4. M.Sc. in Materials Engineering, R@D department, Behriz Fooladan Casting Company, [info@behrizfooladan.com](mailto:info@behrizfooladan.com)

\* Corresponding author: [s\\_sajjadi@metaleng.iust.ac.ir](mailto:s_sajjadi@metaleng.iust.ac.ir)**Paper history:**

Received: 14 November 2021

Accepted: 25 January 2022

**Abstract:**

The fine-graining process by applying heat treatment methods, cannot be effectively applied to austenitic single-phase steels, including Hadfield steels, Other grain refining methods, such as thermomechanical methods, need more energy, cost, and more environmental consequences. In this paper, REM-based inoculations (Rare Earth Metals) and specifically  $\text{CeO}_2$  and Hf with values of 0, 0.05, and 0.1 wt% of  $\text{CeO}_2$ , as well as 0 and 0.05 wt% of Hf, were added into an austenitic high Mn Hadfield cast steel. The results showed the effect of inoculation amount on austenite grain size, segregation, reduction of shrinkage microporosity, pearlite layer spacing, and increase in hardness of these steels despite small changes in mechanical properties. Changes in the amount of hardness in inoculated steels compared to base steels led to an increase of 80.95% in the as-cast condition, which is a particularly important feature due to the need for high anti-wear properties in these steels.

**Keywords:**Hadfield Steel,  
Grain Size,  
REM,  
Inoculation,  
Segregation.**Please cite this article using:**

Seyed Meysam Sajjadi, Seyed Mohammad Ali Boutorabi, Mehdi Mohammadaliha, Saber Bali, The Effect of  $\text{CeO}_2$  and Hf Additives as a Grain Refinement on the Microstructure and Hardness of Hadfield Austenitic Manganese Steel, in Persian, Founding Research Journal, 2021, 5(3) 165-174.

DOI: 10.22034/FRJ.2022.314453.1144

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