

## Research Paper

### Effect of Pearlitizing on the as Cast and as Heat-Treated Microstructure of Hadfield Steels

Milad Khayat<sup>1</sup>, Shahram Kheirandish<sup>2</sup>, \*Majid Abbasi<sup>3</sup>

1. MSc., Department of Metallurgy, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
2. Professor, Department of Metallurgy, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

**Citation:** Khayat M, Kheirandish Sh, Abbasi M. Effect of Pearlitizing on the as Cast and as Heat-Treated Microstructure of Hadfield Steels. Metallurgical Engineering. 2016; 19(1):13-21. <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.29729.1036>

 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.29729.1036>

## ABSTRACT

In this paper, the effects of pearlitizing on the as cast and as heat-treated microstructures of austenitic manganese steel (named Hadfield steel) were evaluated. The samples with different contents of carbon and manganese were produced using induction furnace and precision casting method. The as-cast, annealed, and solution treated microstructural studies were performed by optical microscopy, X-ray diffraction, ferritescopy and field emission scanning electron microscopy. The microstructural results showed that the as cast and annealed microstructures of the steel in room temperature consist of austenite matrix, carbide and ferrite. Fine examination by scanning electron microscope shows that the ferrite and carbide phases are formed as pearlitic colonies. It was also observed that the increase in carbon content and annealing heat treatment are more facilitated the pearlitizing. By applying the final heat treatment (solution and quenching in water), pearlite colonies convert to new fine austenite grains and then the austenite grains sizes are decreased.

**Key words:** Hadfield steel, Pearlitizing, Grain size, Heat treatment

■.....■

\* *Corresponding Author:*

Majid Abbasi, PhD

**Address:** Department of Materials Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

**Tel:** +98 (11) 32310968

**E-mail:** abbasim@nit.ac.ir

## اثر پرلیت‌زایی بر ریزساختار ریختگی و عملیات حرارتی شده فولاد هادفیلد

میلاذ خیاط<sup>۱</sup>، شهرام خیراندیش<sup>۲</sup>، \*مجید عباسی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد، گروه متالورژی صنعتی، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲- استاد، گروه متالورژی صنعتی، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

### چکیده

در این مقاله، اثر پرلیت‌زایی بر ریزساختار ریختگی و عملیات حرارتی شده فولاد آستنیتی منگنزی موسوم به هادفیلد بررسی شد. نمونه‌های با مقادیر مختلف کربن و منگنز با استفاده از کوره القایی آزمایشگاهی و به روش ریخته‌گری دقیق تولید شدند. مطالعات ریزساختاری در شرایط ریختگی، آنیل شده و عملیات محلولی و تندسرمايي شده در آب به وسیله میکروسکپ نوری، پراش اشعه ایکس، فریت‌سنجی و میکروسکپ الکترونی روبشی گسیل میدان، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعات میکروسکپی نشان داد که ریزساختار ریختگی و آنیل شده این فولاد در دمای محیط شامل زمینه آستنیتی به همراه کاربید و فریت در مرز یا به طور جزئی در درون دانه‌های آستنیت است. بررسی‌های دقیق میکروسکپ الکترونی روبشی نشان داد که فازهای فریت و کاربید در اغلب موارد به صورت کلونی‌های پرلیتی تشکیل می‌شود. همچنین مشاهده شد که افزایش مقدار کربن و انجام عملیات حرارتی آنیل، پرلیت‌زایی را بیشتر تسهیل می‌کند. با انجام عملیات حرارتی نهایی انحلالی و تندسرمايي در آب، کلونی‌های پرلیت به دانه‌های آستنیت جدید و فرعی تبدیل شده و از این طریق می‌تواند سبب ریزتر شدن دانه‌های آستنیت شوند.

واژه‌های کلیدی: فولاد هادفیلد، پرلیت‌زایی، اندازه دانه، عملیات حرارتی

### ۱. مقدمه

در گذشته مشخص شد که ریزساختار فولاد هادفیلد در حالت ریختگی، شامل دانه‌های آستنیت و رسوب‌های مرزدانه‌ای کاربرد است. چنین ریزساختاری منجر به کاهش چقرمگی در آن می‌شود. برای رفع این مشکل پس از ریخته‌گری، عملیات آنیل محلولی و سپس سرمایش در آب انجام می‌گیرد. انجام چنین عملیاتی منجر به انحلال کاربیدهای مرزدانه‌ای شده و ریزساختار نهایی شامل دانه‌های تک فاز آستنیت است [۱۵-۱۳].

اغلب قطعات مقاوم به سایش در صنعت به روش ریخته‌گری تولید می‌شود. قطعات ریختگی بزرگ از فولاد هادفیلد دارای دانه‌های درشت آستنیت است که می‌تواند خواص مکانیکی را کاهش دهد. بنابراین مساله اصلی در تولید قطعات ریختگی از این فولاد، کنترل اندازه دانه‌های آستنیت است. در فولادهای کربنی ساده می‌توان با انجام عملیات حرارتی نرمالیزینگ و کنترل استحاله یوتکتوئیدی، دانه‌بندی را یکنواخت و ریزتر کرد.

ولی دانه‌بندی ریختگی این فولاد به طور معمول با انجام عملیات حرارتی تغییر نمی‌کند و به شدت تابع شرایط انجماد و ریخته‌گری است. لذا هدف اصلی و نوآوری این تحقیق امکان‌سنجی تشکیل پرلیت در ریزساختار ریختگی و آنیل شده و سپس بررسی تغییر دانه‌بندی با

فولاد هادفیلد توسط رابرت هادفیلد در سال ۱۸۸۲ معرفی شد. این یک فولاد آستنیتی با ۱/۴-۱ درصد وزنی کربن و ۱۴-۱۰ درصد وزنی منگنز است. مقدار بالای منگنز و کربن منجر به پایداری فاز آستنیت در دمای محیط می‌شود. این ساختار سبب ایجاد خواص منحصر به فردی نظیر چقرمگی و انعطاف‌پذیری بالا همراه با کارسختی و مقاومت به سایش بسیار زیاد می‌شود [۱].

فولاد هادفیلد، امروزه در صنایع معدنی، نفت و گاز، حفاری، فولادسازی، خطوط راه آهن و ... عموماً به شکل قطعات ریختگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. محصولات نوردی آن به عنوان صفحات یا ورق‌های مقاوم به سایش نیز استفاده می‌شود. به عنوان نمونه در معدن برای ساخت مته‌های حفاری و چکش‌های سنگ‌شکن و در صنایع نظامی برای ساخت کلاه‌خود استفاده می‌شود [۸-۲]. چون این فولاد دارای مقاومت بالایی سایشی فلز-فلز است از آن در تولید چرخ دنده‌ها نیز استفاده می‌شود [۹]. در سال‌های اخیر، تلاش‌هایی برای بهبود استحکام تسلیم نسبتاً پایین این فولاد، بهبود قابلیت ماشین‌کاری، جوش‌پذیری و مقاومت به سایش آن انجام شده است [۱۲-۱۰].

\* نویسنده مسئول:

دکتر مجید عباسی

نشانی: بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مواد.

تلفن: +۹۸ ۲۲۳۱۰۹۶۸ (۱۱)

پست الکترونیکی: abbasim@nit.ac.ir

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژها.

کد نمونه	عنصر	کربن	منگنز	آهن
نمونه ۱		۱	۱۰	باقیمانده
نمونه ۲		۱/۲	۱۲	باقیمانده
نمونه ۳		۱/۴	۱۰	باقیمانده

انجام عملیات حرارتی محلولی و تندسرمایی (عملیات حرارتی نهایی) است.

## ۲. مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، از سه فولاد هادفیلد با ترکیب نشان داده شده در جدول شماره ۱ استفاده شد. عملیات ذوب در کوره القایی با ظرفیت ۲۵ کیلوگرم تحت اتمسفر آرگون و با استفاده از قراضه‌های فولادی کم کربن و فرومنگنز انجام شد. قالب از پوسته سرامیکی به روش ریخته‌گری دقیق و با استفاده از مدل مومی ساخته شد. پس از ریخته‌گری، ترکیب شیمیایی فولادها به روش کوانتومتری تعیین شد.

پس از انجام عملیات ریخته‌گری از هر فولاد دو قطعه، به مدت یک ساعت در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  تحت عملیات محلولی قرار گرفت تا تمام کاربیدهای مرزدانه‌ای آن حل شوند. سپس یکی از قطعات در آب متلاطم و دیگری در درون کوره سرد شد.

ریزساختار فولاد در هر سه حالت ریختگی، آنیل شده و پس از عملیات محلولی و تندسرمایی در آب مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام حکاکی از محلول نایتال ۵٪ و پس از آن از هییدروکلریک اسید ۳۷٪ استفاده شد. برای تعیین فازهای تشکیل شده از آنالیز پراش اشعه ایکس استفاده شد. زاویه شروع و پایان در این آنالیز به ترتیب ۱۰ و  $100^{\circ}$  درجه بود. گام‌های تغییر زاویه در این آزمایش  $0.02^{\circ}$  درجه و زمان هر گام  $0.5$  ثانیه بود. شدت جریان مورد استفاده ۳۰ mA و آند در این آزمون از جنس مس بود. در ادامه برای بررسی‌های بیشتر ریزساختاری از میکروسکپ روبشی الکترونی گسیل میدان با ولتاژ کاری ۳۰ KV استفاده شد.

برای تعیین کسر حجمی فریت پرلیتی از آنالیز فریت‌سنجی به روش مغناطیسی استفاده شد. با توجه به اختلاف بسیار زیاد نفوذپذیری مغناطیسی بین فریت و سمنتیت، دستگاه پاسخی از سمنتیت دریافت نمی‌کند [۱۶، ۱۷].

## ۳. نتایج و بحث

### ریزساختار ریختگی

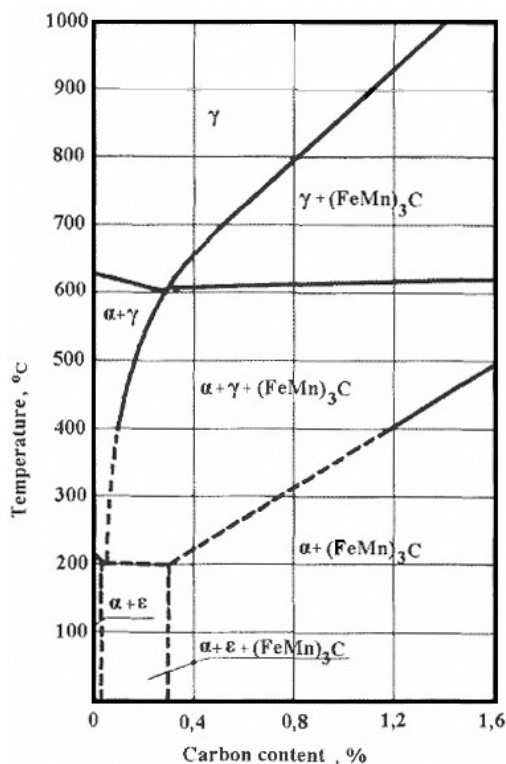
تصویر شماره ۱ تصاویر میکروسکپ نوری از نمونه‌های مورد استفاده در حالت ریختگی را نشان می‌دهد. در این تصاویر، زمینه

آستنیتی به رنگ روشن به وسیله شبکه پیوسته کاربیدهای مرزدانه‌ای به رنگ تیره احاطه شده است. این شکل نشان می‌دهد که افزایش کربن، افزایش رسوب‌گذاری کاربیدهای مرزدانه‌ای را به همراه دارد.

در تصویر شماره ۱-الف، شبکه کاربیدهای مرزدانه‌ای در برخی نقاط پیوسته نیست و کاربیدها در این شکل در تمامی نقاط دیده نمی‌شوند. در مقابل مطابق تصویر شماره ۱-ب، با افزایش کربن، رسوب کاربیدهای مرزدانه‌ای بیشتر از تصویر شماره ۱-الف شده است. در تصویر شماره ۱-ج، کاربیدهای مرزدانه‌ای علاوه بر مرزهای دانه‌ها، به درون دانه‌ها نیز رشد کرده‌اند. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش کربن، اندازه دانه‌های آستنیت کاهش یافته است.

تصویر شماره ۲، نمودار دوتایی آهن-کربن را در حضور ۱۳ درصد وزنی منگنز، نشان می‌دهد. با توجه به این شکل و محدوده ترکیب فولادهای هادفیلد، این فولادها، فولادهای هایپرئوتکتوئید هستند و در حین سرد شدن آرام از دماهای محدوده تک‌فاز آستنیت، رسوب کاربیدهای پرویوتکتوئید در مرزهای آستنیت، انتظار می‌رود. حضور مقدار بالای منگنز در این فولاد، به پایداری آستنیت کمک می‌کند و دمای آغاز استحاله پرلیت را کاهش می‌دهد. با توجه به تصویر شماره ۲، آستنیت در ساختار این فولادها تا دماهای پایین پایدار است و این فولادها همواره در ساختارهای ریختگی خود، دارای مقدار زیادی آستنیت هستند [۱۸، ۱۹].

کاربیدهای پرویوتکتوئید در فولاد هادفیلد غنی از کربن و منگنز است [۲۲-۲۰، ۱۴]. برای رسوب‌گذاری کاربیدها در این فولاد، کربن و منگنز ابتدا باید در محلی مناسب تجمع کنند و شرایط را برای تشکیل رسوب کاربید فراهم آورند. بنابراین هرچه شرایط برای نفوذ کربن و منگنز بهتر باشد، سرعت رسوب‌گذاری و رشد کاربید بیشتر است. منگنز قدرت تحرک کمتری نسبت به کربن دارد و نفوذ برای آن مشکل‌تر از نفوذ کربن است. تصویر شماره ۲ نشان می‌دهد که با افزایش کربن، دمای آغاز رسوب‌گذاری کاربیدهای پرویوتکتوئید افزایش می‌یابد [۲]. افزایش دمای شروع رسوب‌گذاری، شرایط نفوذ بهتری را برای کربن و به خصوص منگنز فراهم می‌آورد. در نمونه ۳، بیشترین کسر حجمی کاربید مشاهده می‌شود. در این نمونه، رسوب‌گذاری کاربید از دمای بالاتری نسبت به دو نمونه دیگر آغاز می‌شود.



تصویر ۲. نمودار فازی آهن-کربن با ۳۱ درصد وزنی منگنز [۵].

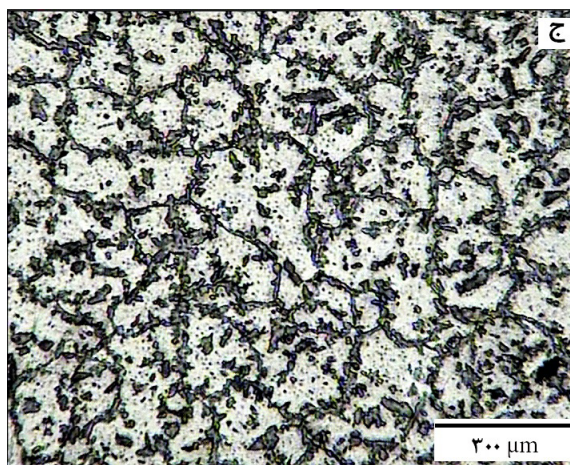
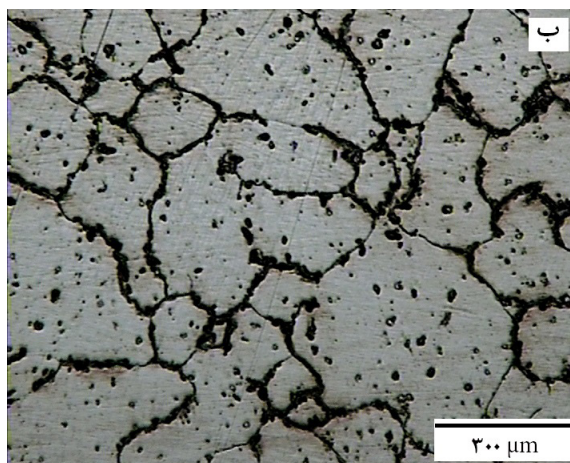
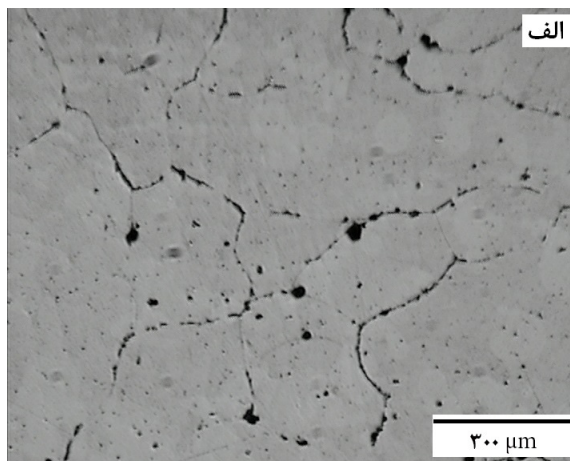
بنابراین در این نمونه شرایط بهتری برای نفوذ عناصر، جوانه‌زنی و رشد کاربید فراهم است. علاوه بر این با توجه به تصویر شماره ۲ و قانون اهرم برای تعادل فازها، مشاهده می‌شود با افزایش کربن، درصد فاز پرویوتکتوئید رسوب کننده از آستنیت افزایش می‌یابد.

#### مشاهده پرلیت

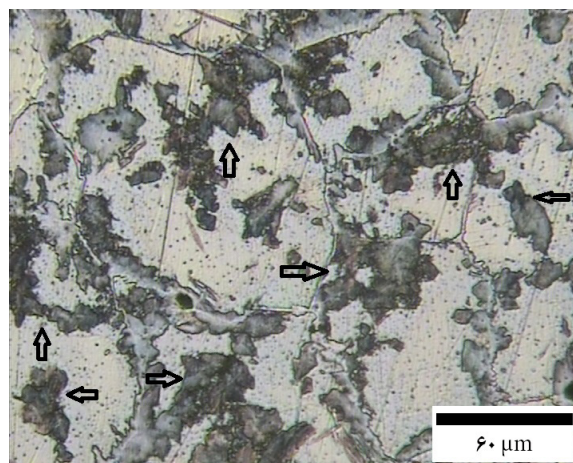
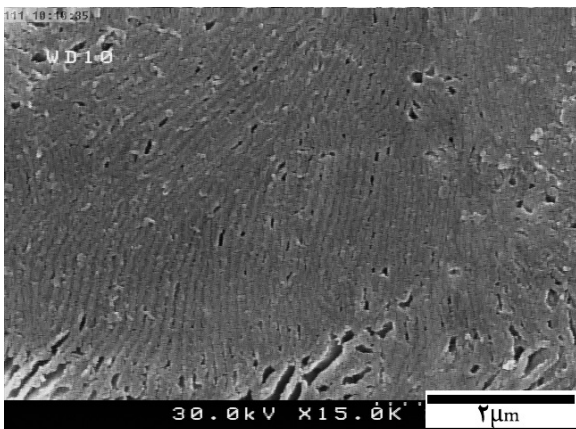
تصویر شماره ۳، ریزساختار نمونه ۳ در حالت ریختگی را با بزرگ‌نمایی بیشتر نسبت به تصویر شماره ۱ نشان می‌دهد. در این شکل، سه فاز مجزا قابل تشخیص است. زمینه آستنیتی فولاد، کاربید مرزدانه‌ای و فازهای تیره در مرز کاربید و آستنیت و درون دانه‌های آستنیت در تصویر مشخص شدند. تصویر شماره ۴، تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی گسیل میدان را از فاز تیره نشان می‌دهد. با توجه به نمودار فازی آهن کربن با ۱۳ درصد وزنی منگنز و ساختار لایه‌ای این فاز، می‌توان گفت که این فاز تیره رنگ پرلیت است.

#### ریزساختار آنیل شده

تصویر شماره ۵ ریزساختار نمونه‌های فولاد هادفیلد را در شرایط آنیل شده نشان می‌دهد. در این تصویر زمینه آستنیتی فولاد به رنگ روشن دیده می‌شود و مناطق تیره رنگ، فازهای رسوب کننده از آستنیت هستند. مرزهای دانه‌های آستنیت در تصاویر ۵-الف و ۵-ب به خوبی قابل رویت هستند. در حالی که در تصویر شماره ۵-ج، رسوب فازهای ثانویه تقریباً در تمام نقاط دیده می‌شوند و مرزدانه‌های آستنیت به راحتی قابل تشخیص نیستند.



تصویر ۱. تصاویر میکروسکپ نوری از ریزساختار ریختگی: الف) نمونه ۱ (ب) نمونه ۲ و ج) نمونه ۳.



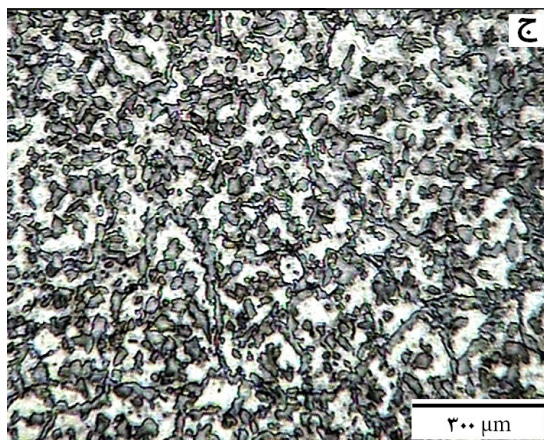
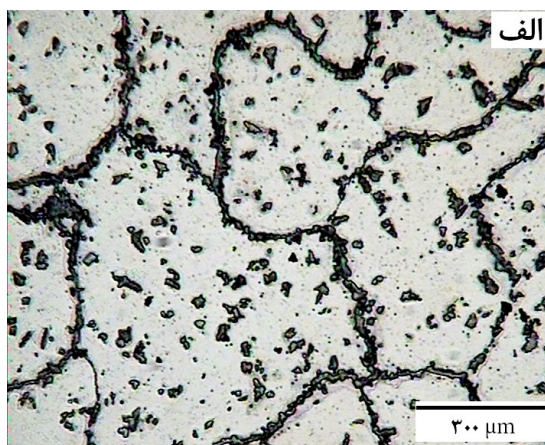
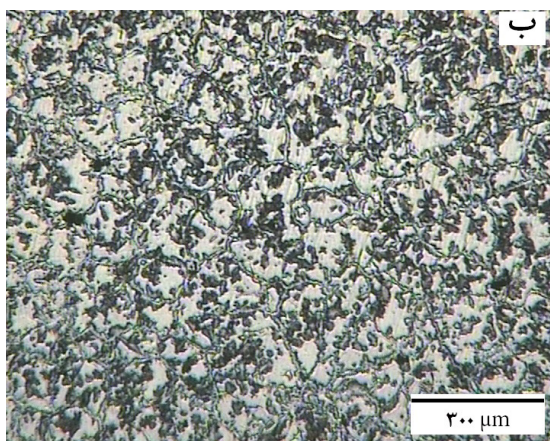
تصویر ۴. تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی گسیل میدان از تشکیل پریلیت در تصویر ۳.

تصویر ۳. تصویر میکروسکپ نوری از ریزساختار ریختگی نمونه ۲ (پیکان‌ها نشان‌دهنده کلونی‌های پریلیت است).

میزان کربن نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، در نمونه ۳ که بیشترین میزان کربن را دارا است، کسر حجمی فاز ثانویه برابر با ۷۵ و در نمونه ۱ که کمترین مقدار کربن را دارا است، کسر حجمی فاز ثانویه برابر با ۲۲ درصد است. با توجه به نمودار فازی آهن کربن در حضور ۱۳ درصد منگنز (تصویر شماره ۲)، در فولاد هادفیلد، حلالیت کربن در آستنیت با کاهش دما کاهش می‌یابد و همچنین، در نمونه‌های با

در تمام نمونه‌ها، رسوبات فاز ثانویه علاوه بر مرزدانه، در درون دانه‌ها نیز جوانه‌زنی کردند. با توجه به تصویر شماره ۵، افزایش میزان رسوب فازهای ثانویه با افزایش کربن در شرایط آنیل مشاهده می‌شود و در نمونه‌های دارای کربن بالاتر، آستنیت تبدیل نشده کمتری دیده می‌شود.

تصویر شماره ۶، کسر حجمی آستنیت استحاله نیافته را بر حسب



تصویر ۵. تصاویر میکروسکپ نوری از ریز ساختار پس از عملیات حرارتی آنیل در الف) نمونه ۱ ب) نمونه ۲ و ج) نمونه ۳.

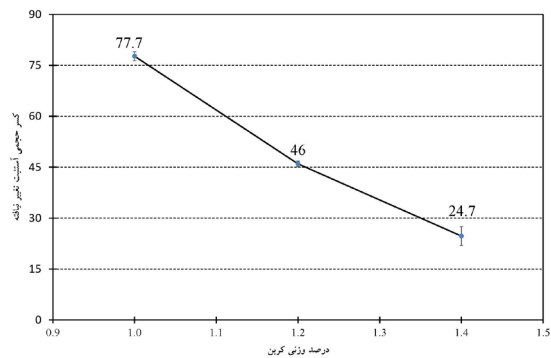
تصویر شماره ۷، نمودار حاصل از پراش اشعه ایکس را برای نمونه ۲ نشان می‌دهد. پیک‌های مربوط به فازهای آستنیت، فریت و سمنتیت در این نمودار قابل مشاهده هستند. با توجه به تصویر ۲، هاپریوتکتوئید بودن فولاد و عدم امکان تشکیل فازهایی نظیر بینیت، می‌توان گفت، فریت موجود در این فولاد، در لایه‌های پرلیت قرار دارد و به صورت منفرد ظاهر نمی‌شود.

تصویر شماره ۸، تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی گسیل میدان، از فازهای ثانویه تشکیل شده از آستنیت را نشان می‌دهد. ساختار لایه‌ای این رسوبات و مشاهده پیک فریت در آزمون پراش اشعه ایکس، تشکیل پرلیت را در شرایط آنیل در فولاد هادفیلد نیز تایید می‌کند.

### اثر کربن بر تشکیل پرلیت

برای بررسی احتمال تشکیل پرلیت و مقایسه بین میزان پرلیت تشکیل شده، از تعیین کسر حجمی فاز مغناطیسی تشکیل شده به وسیله آنالیز فریت‌سنجی استفاده شد. باید توجه شود فریت تشکیل شده در فولاد هادفیلد، در لایه‌های پرلیت قرار دارد و به صورت منفرد تشکیل نمی‌شود. نتایج این آزمایش برای نمونه‌های ریختگی و آنیل شده در تصویر شماره ۹ مشاهده می‌شود. با توجه به تصویر شماره ۹، افزودن کربن به فولاد هادفیلد، کسر حجمی فریت را در ساختارهای ریختگی و آنیل شده در این فولاد افزایش می‌دهد.

در سیستم Fe-C-Mn، منگنز عنصر جانشین است و قدرت نفوذ کمتری نسبت کربن دارد. در این سیستم عملاً توزیع منگنز بین فریت و سمانتیت، نرخ انجام واکنش را کنترل می‌کند [۳۴-۳۲، ۱]. تحقیقات انجام شده بر سیستم‌های Fe-Mn-C نشان می‌دهد که با افزایش کربن در این سیستم‌ها، واکنش پرلیتی از دماهای بالاتری آغاز می‌شود. با شروع استحاله پرلیتی از دماهای بالاتر، منگنز قدرت

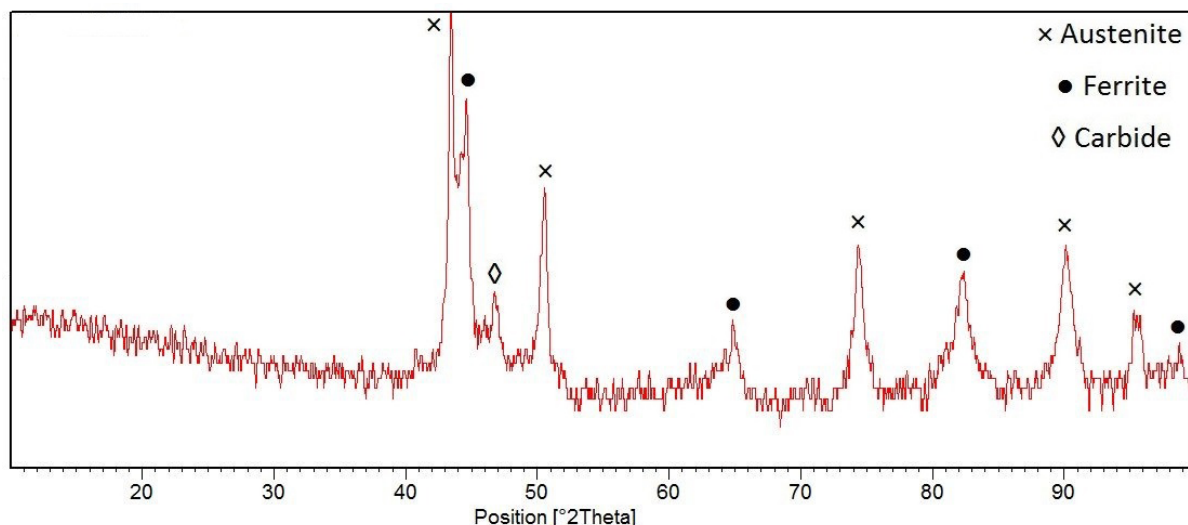


تصویر ۶. کسر حجمی آستنیت استحاله نیافته در نمونه‌های آنیل شده.

کربن بیشتر، دمای تشکیل کاربید از آستنیت، افزایش می‌یابد.

در حالت آنیل در نمونه ۳ که بیشترین مقدار کربن را دارا است، به دلیل شروع تجزیه آستنیت از دمای بالاتر نسبت به نمونه‌های ۲ و ۱ و شرایط نفوذ بهتر کربن، جوانه‌زنی و رشد فازهای ثانویه بیشتر است و آستنیت بیشتری نسبت به نمونه ۲ و نمونه ۱ تجزیه می‌شود. دمای شروع تجزیه آستنیت در نمونه ۲ نیز بیشتر از نمونه ۱ است که تجزیه بیشتر آستنیت را در نمونه ۲ نسبت به نمونه ۱ به همراه دارد.

در نمودار TTT فولاد هادفیلد، دماغه تشکیل پرلیت، در دمایی نزدیک  $600^{\circ}\text{C}$  قرار دارد و استحاله پرلیتی در این دما پس از ده دقیقه آغاز می‌شود [۲۳]. در شرایط آنیل، می‌توان احتمال تشکیل پرلیت را در نمونه‌های فولاد هادفیلد مطرح کرد. باید توجه شود، حتی در صورت حرارت دادن فولاد هادفیلد در دمای تشکیل پرلیت، همواره مقداری کاربید مجزا در آن تشکیل می‌شود. بنابراین رسوبات فازهای ثانویه در نمونه‌های آنیل شده، می‌توانند ترکیبی از کاربیدهای پرویوتکتوئید و پرلیت باشند.



تصویر ۷. نمودار پراش اشعه ایکس برای فولاد ۲.

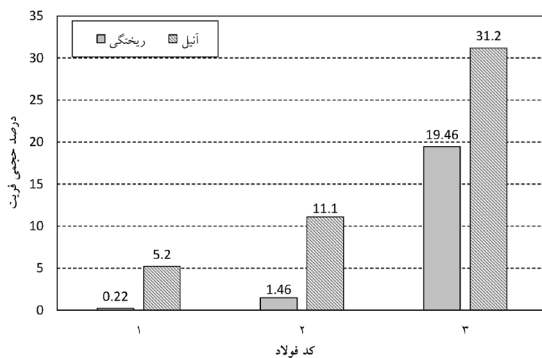
نمونه‌ها در حالت عملیات محلولی و آب‌دیده شده را نشان می‌دهد. ساختار تماماً آستنیتی نمونه‌ها، پس از عملیات محلولی مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  و زمان یک ساعت، برای انحلال کامل کاربیدهای مرزدانه‌ای مناسب است. مرزدانه‌های آستنیت به خوبی قابل رویت هستند.

نکته قابل توجه در ریزساختار نمونه‌های ۲ و ۳، وجود دانه‌های فرعی ریز در کنار مرزدانه‌ها و یا درون دانه‌ها است که آرایش فصل مشترک آن‌ها با دانه‌های اولیه آستنیت تطابق کاملی با قواعد کلی جوانه‌زنی و رشد دانه در پدیده‌های مختلف انجامد، استحاله‌ای فازی حالت جامد نظیر تبلور مجدد یا رشد دانه‌ها ندارد. مقایسه تصاویر میکروسکپ نوری در تصاویر ۱، ۳، ۵ و ۱۰ به خوبی نشان می‌دهد که این دانه‌های فرعی که ریزتر از دانه‌های اولیه آستنیت هستند، از تبدیل کلونی‌های پرلیت به آستنیت حاصل شده‌اند. جهت‌گیری کریستالی این آستنیت‌های جدید با آستنیت اولیه سبب ایجاد مرزهای جدید شده است. همچنین دوقلوبی‌های حرارتی به خوبی قابل مشاهده است.

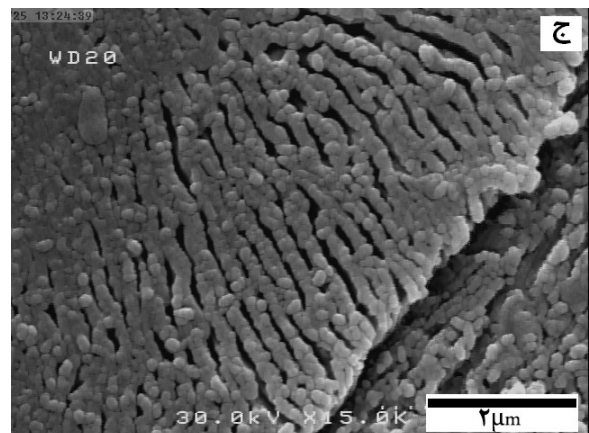
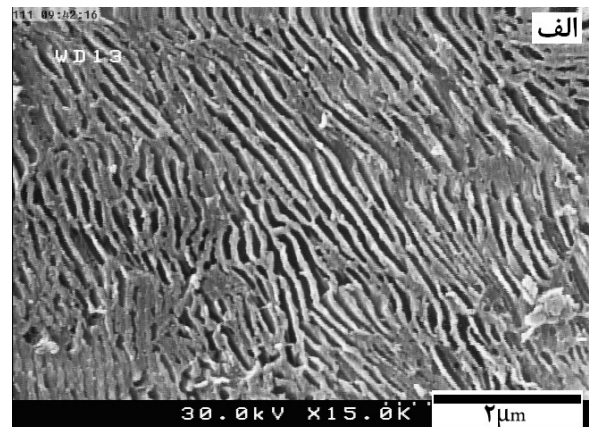
کربن و منگنز دو عنصر پایدارکننده آستنیت هستند و میزان بالای این دو عنصر در ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد، پایداری فاز آستنیت نسبت به مارتنزیت را افزایش می‌دهد و از ایجاد مارتنزیت جلوگیری می‌کند. در عملیات محلولی و سرمایش در آب، آستنیت تا دمای  $196^{\circ}\text{C}$  پایدار است و این دمای تشکیل مارتنزیت برای فولادهای هادفیلد است [۹].

به وسیله آنالیز فریت‌سنجی، کسر حجمی فاز مغناطیسی برای هر سه نمونه اندازه‌گیری شد و برای هر سه نمونه در حدود ۰/۱ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده عدم تشکیل مارتنزیت در هر سه نمونه است.

با توجه به تصاویر شماره ۱، ۵ و ۱۰ مشاهده شده است که اندازه دانه‌های آستنیت با افزایش کربن کاهش می‌یابد. این روند در هر سه شرایط ریختگی، آنیل شده و عملیات محلولی و تندسرمایی شده در آب مشاهده می‌شود.



تصویر ۹. اثر کربن بر میزان فریت در فولاد هادفیلد در شرایط ریختگی و آنیل.



تصویر ۸. تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی از نمونه‌های آنیل شده. (الف) نمونه ۱ (ب) نمونه ۲ و (ج) نمونه ۳.

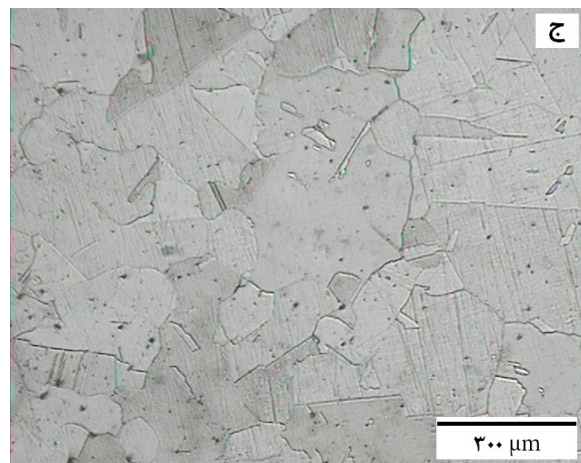
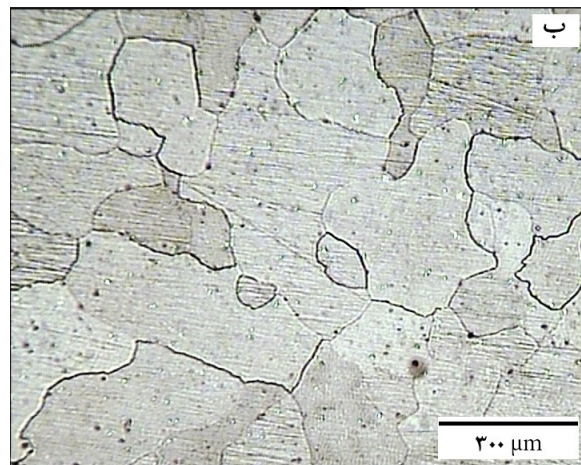
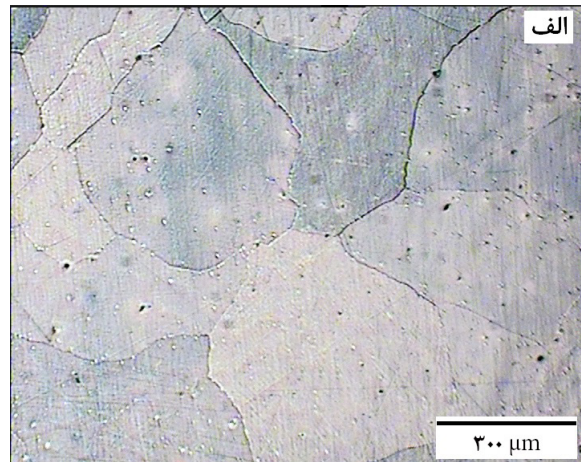
تحرك بیشتری دارد و از قدرت نفوذ بالاتری برخوردار است [۲۸، ۲۹]. بنابراین شرایط برای رشد جوانه‌های پرلیت تشکیل شده بهتر است. به همین دلیل در نمونه ۳ پرلیت بیشتری نسبت به نمونه ۲ و در نمونه ۲ نیز پرلیت بیشتری نسبت به نمونه ۱ تشکیل شده است.

#### ریزساختار بعد از عملیات محلولی

تصویر شماره ۱۰، تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار

#### ۴. نتیجه گیری

- ریزساختار ریختگی فولاد هادفیلد در دمای محیط شامل دانه‌های آستنیت، کاربیده‌های منفرد و کلونی‌های پرلیت ریز است.
- عملیات حرارتی آنیل شرایط تشکیل پرلیت در فولاد هادفیلد را تسهیل می‌کند.
- با افزایش مقدار کربن در فولاد هادفیلد مقدار کاربیده‌های مرزدانه‌های و کلونی‌های پرلیت در شرایط ریختگی و آنیل افزایش می‌یابد.
- با انجام عملیات حرارتی انحلالی و تندسرمایی در آب، کلونی‌های پرلیت سبب ایجاد دانه‌های فرعی ریز و جدید در دانه‌های قبلی آستنیت می‌شوند و از این طریق سبب ریزتر شدن دانه‌ها می‌شوند.



تصویر ۱۰. ریزساختار فولاد هادفیلد در شرایط تندسرمایی در آب مربوط به: (الف) نمونه ۱ (ب) نمونه ۲ و (ج) نمونه ۳.



## References

- [1] P. Rama Rao and V.V. Kutumbarao, "Developments in Austenitic Steels Containing Manganese", *International Materials Reviews*, Vol. 34, pp. 69-86, (1989)
- [2] A.K. Srivastava, K. Das, "Microstructural Characterization of Hadfield Austenitic Manganese Steel", *Journal of Material Science*, Vol. 43, pp. 5654-5658, (2008)
- [3] A. Chojecki and I. Telejko, "Cracks in High Manganese Cast Steel", *Archives of Foundry Engineering*, Vol. 9, pp. 17-22, (2009)
- [۴] م. عباسی، ش. خیراندیش، ی. خرازی، ج. حجازی، "بررسی تاثیر برخی عوامل اصلی بر رفتار سایشی فولاد هادفیلد"، *علوم و مهندسی سطح*، ۷، ۸۸۳۱، ۹۶-۰۸.
- [5] A. Goldberg, O.A. Ruano and O.D. Sherby, "Development of Ultrafine Microstructures and Superplasticity in Hadfield Manganese Steel", *Material Science and Engineering A*, Vol. 150, pp. 187-194, (1992)
- [۶] م. مهری، م. رواندوست، ع. صالحی، "بررسی اثر افزودن فروبور بر ریزساختار فولاد منگنزی هادفیلد"، *یازدهمین کنگره سالانه انجمن مهندسی متالورژی ایران*، (۱۳۸۱).
- [7] E.G. Moghaddam, N. Varahram and P. Davami, "On the Comparison of Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of High-Vanadium Austenitic Manganese Steels with the Hadfield Steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 532, pp. 260-266, (2012)
- [۸] ع. علی پور، س. حسین نژاد، ا. م. شکری، ع. علی پور جهانی، "بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی دو نوع فولاد هادفیلد ریختگی"، *چهارمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی و جامعه علمی ریخته گری ایران*، (۱۳۸۹).
- [9] ASM Handbook, Vol. 1, "Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys", *Austenitic Manganese Steel*, pp.1274-1302, (2005)
- [10] E. Bayraktar, F.A. Khalid and C. Levaillant, "Deformation and Fracture Behavior of High Manganese Austenitic Steel", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 147, pp. 145-154, (2004)
- [11] M. Abbasi, S. Kheirandish, Y. Kharrazi and J. Hejazi, "The Fracture and Plastic Deformation of Aluminum Alloyed Hadfield Steels", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 513-514, pp. 72-76, (2009)
- [12] R.W. Smith, A. DeMonte, W.B.F. Mackay, "Development of High-Manganese Steels for Heavy Duty Cast-to-Shape Applications", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153-154, pp. 589-595, (2004)
- [13] S. Kuyucak and R. Zavadil, "On the Heat Treatment of Hadfield's Austenitic Manganese Steels Part IV: Microstructure vs. Impact Toughness Relationship", *AFS Transactions*, Vol. 116, pp. 1281-1298, (2002)
- [14] S. Kuyucak, V.Y. Gertsma and R. Zavadil, "On the Heat Treatment of Hadfield's Austenitic Manganese Steels Part VIII: Studies on Microcharacterization", *AFS Transactions*, Vol. 129, pp. 1-10, (2004)
- [۱۵] م. رواندوست، م. نقوی، م. شاعری، "بررسی اثر کوئچ مستقیم بر ریزساختار فولاد منگنزی هادفیلد"، *یازدهمین کنگره سالانه انجمن مهندسی متالورژی ایران*، (۱۳۸۶).
- [16] J.E. Katz, Q.A. Kerns, B.R. Sandberg, "Digital Measurement of Ferrite Hysteresis Loops", *IEEE Trans. Nucl. Sci*, Vol. 16, pp. 546-550, (1969)
- [17] N. Fan, X. Ma, Z. Ju, J. Li, "Formation, Characterization and Magnetic Properties of Carbon-Encapsulated Iron Carbide Nanoparticles", *Materials Research Bulletin*, Vol. 43, pp. 1549-1554, (2008)
- [18] ASM Handbook, Vol. 9, "Metallography and Microstructures, Austenitic Manganese Steel", pp. 428-438, (2005)
- [19] M.X. Zhang and P.M. Kelly, "The Morphology and Formation Mechanism of Pearlite in Steels", *Materials Characterization*, Vol. 60, pp. 545-554, (2009)
- [20] W.C. Cheng and Y.C. Li, "The Coexistence of Two Different Pearlites, Lamellae of (Ferrite +M3C), and Lamellae of (Ferrite +M23C6) in a Mn-Al Steel", *Metallurgical and Materials Transaction A*, Vol. 43 A, pp. 1817-1825, (2012)
- [21] W.C. Cheng and S.M. Hwang, "A Eutectoid Reaction for the Decomposition of Austenite into Pearlitic Lamellae of Ferrite and M23C6 Carbide in a Mn-Al Steel", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 42A, pp. 1760-1766, (2011)
- [22] N.A. Razik, G.W. Lorier and N. Ridley, "An Investigation on Manganese Partitioning during the Austenite to Pearlite Transformation Using Analytical Electron Microscopy", *Acta Metallurgica*, Vol. 22, pp.1249-1258, (1974).
- [23] G.F. Vander Voort, "Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels", *ASM International*, pp. 205-206, (2007).
- [24] J.S. Kirkaldy and R.C. Sharma, "Stability Principles for Lamellar Eutectoid Reactions", *Acta Metallurgica*, Vol. 28, pp. 1009-1021, (1980).
- [25] A.S. Pandit and H. K.D.H. Bhadeshia, "Diffusion-Controlled Growth of Pearlite in Ternary Steels", *Proceeding of royal Society of London-A*, Vol. 476, pp. 2948-2961, (2011).
- [26] A.S. Paandit, "Theory of Pearlite Formation in Steel", *PhD Thesis*, University of Cambridge, (2011).