

## بررسی اثر تنگستن و عملیات حرارتی بر ریز ساختار و رفتار سایشی چدن نایه‌دار ۴

علی کریمی طاقانکی<sup>۱</sup>، تقی دلالی اصفهانی<sup>۲\*</sup>، حمید غیور<sup>۱</sup>، فضل الله شاه محمدیان<sup>۱</sup>

### چکیده

سایش از مهم‌ترین عوامل تخریب قطعات و ماشین آلات صنعتی، به ویژه در صنعت معدن و راه سازی است. یکی از معمول ترین و پرکاربردترین آلیاژها در صنایع نامبرده، چدن های نایه‌دار ۴ می باشد. در پژوهش حاضر به بررسی افزودن تنگستن به چدن نایه‌دار ۴ و اثر آن بر مورفولوژی، ساختار و مقاومت به سایشی پرداخته شده است. در این راستا نمونه‌هایی حاوی ۰، ۰/۳، ۰/۷ و ۱/۱ درصد وزنی تنگستن از طریق ریخته گری تهیه و عملیات حرارتی شدند. سپس اثر تنگستن بر ساختار و رفتار سایشی آلیاژهای گوناگون در هر دو حالت ریختگی و عملیات حرارتی شده مورد بررسی قرار گرفتند. ساختار نمونه ها توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفتند و جهت بررسی توزیع عنصر کروم و تنگستن در فازهای مختلف موجود در ریزساختار از آنالیز EDS استفاده شد. نتایج نشان داد که تنگستن در فازهای موجود در چدن نایه‌دار ۴ حل شده و کاربیدهای استخوان ماهی و اسفنجی مانند تنگستن بواسطه جدایش بلند دامنه تنگستن در حین انجماد و نیز به واسطه واکنش یوتکتیک تشکیل می‌شوند. هم چنین با انجام عملیات حرارتی؛ کاربیدهای تنگستن در کاربیدهای یوتکتیک حل شده و قسمت‌های مختلف فاز زمینه از نظر پتانسیل جوانه زنی کاربیدهای ثانویه حالت همگن تری پیدا می‌کنند. علاوه بر این توزیع رسوبات کاربید ثانویه ریز تر و یکنواخت تر می شود و کسر سطحی کاربیدها را ۴/۲۳ درصد افزایش و قطر متوسط کاربیدها از ۴۷/۲ به ۲۰/۶ میکرومتر کاهش داد. در نتیجه سبب بهبود خواص سایشی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تنگستن، چدن نایه‌دار ۴، ریخته‌گری، سایش، عملیات حرارتی.

<sup>۱</sup> - مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

<sup>۲</sup> - استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان

\*-نویسنده مسئول مقاله: t.isfahani@gut.ac.ir

## پیشگفتار

چدن نایه‌دار در سال ۱۹۵۰ و از طریق واکنش یوتکتیک بین عناصری مانند کروم، نیکل، کربن و سیلیسیوم گسترش یافت. چدن نایه‌دار ۴، چدنی با زمینه مارتنزیتی و کاربیدهای توزیع شده در آن است که کربن آن در محدوده ۲/۵ تا ۳/۶ درصد متغیر می‌باشد. در چدن نایه‌دار ۴ عنصر نیکل در محدوده ۴/۵ تا ۷ درصد و کروم در محدوده ۷/۵-۱۱ درصد است. چدن‌های نایه‌دار ۴ به دلیل واکنش یوتکتیک، دارای سیالیت بهتر و نقطه‌ی ذوب پایین‌تری (حدود ۵۲ درجه سانتی‌گراد) نسبت به چدن‌های پرکروم هستند [۱-۳]. چدن‌های نایه‌دار ۴ در زمینه‌های گوناگونی همچون فرآوری مواد معدنی، تولید سیمان و صنایع تولید کاغذ که پایداری در محیط ساییده از نیازهای اساسی آن‌ها است، کاربرد دارند. مقاومت در برابر سایش و چقرمگی خوب در کنار قیمت تولید نسبتاً پایین سبب شده است تا کاربرد این آلیاژها برای موارد خاصی نظیر زره آسیاب‌ها، صفحات داخلی بدنه سنگ شکن‌های فکی، تجهیزات پمپاژ، غلطک نوارهای نقاله مورد استفاده و در فرآوری موادی همچون کانی‌ها، ذغال سنگ و سیمان و ... مورد استفاده قرار گیرند. متالورژی و کاربرد چدن‌های نایه‌دار ۴ تقریباً مشابه چدن‌های پرکروم است. مشخصه‌ای که سبب ارجحیت بارز چدن نایه‌دار ۴ در مقایسه با چدن‌های پرکروم می‌شود، قابلیت سختی‌پذیری بالای آن‌هاست [۴].

عملیات حرارتی، نقشی بسیار با اهمیت در چدن‌های پر کروم دارد. به گونه‌ای که انتخاب عملیات حرارتی مناسب به منظور حصول ریز ساختار مطلوب و هم چنین خواص مکانیکی و سایشی مورد نظر از بیش‌ترین اهمیت برخوردار است. اگر چه در اغلب موارد عملیات حرارتی برای حصول ساختار مارتنزیتی و افزایش مقاومت سایشی به کار می‌رود، لیکن شواهدی در ارتباط با رفتار سایشی خوب آستنیت در شرایط سایش خراشیدنی نیز وجود دارد. برخی از محققین عقیده دارند که آستنیت از چقرمگی مناسب و قابلیت کارسخت شدن و تغییرشکل پلاستیک برخوردار بوده و استحکام فصل مشترک بین کاربیدها و آستنیت، بالا می‌باشد. مطالعات دیگر هم چنین خاطر نشان ساخته است که آستنیت در حین کارسخت

شدن می‌تواند به فاز سخت مارتنزیت استحاله یافته و در نتیجه قسمتی از انرژی سایش به این طریق جذب شده و مقاومت سایشی افزایش می‌یابد [۵ و ۶].

برای حصول مقاومت بالا در برابر سایش، این آلیاژ باید حاوی ساختاری از کاربیدهای اولیه پخش شده در زمینه‌ای عاری از پرلیت باشد. برای تولید چنین ساختاری عناصر آلیاژی باید سختی‌پذیری مناسبی جهت اجتناب از استحاله تشکیل پرلیت، طی سرد شدن در محدوده بحرانی فراهم کند [۷-۹]. شرایط گفته شده برای سایش تحت بار زیاد بوده و در حالتی که سایش تحت بار کم وجود دارد، عملیات حرارتی فرایندی اجتناب‌ناپذیر برای دست‌یابی به ساختار زمینه مارتنزیتی می‌باشد. بررسی‌ها نشان دادند که حتی تحت بهترین سیکل‌های عملیات حرارتی، وجود مقداری آستنیت باقی مانده در این نوع چدن‌ها اجتناب‌ناپذیر است [۱۰ و ۱۱]. جین جو و یونگفا در سال ۱۹۸۶، مقاومت سایشی چدن نایه‌دار ۴ و چدن پر کروم را با هم مقایسه کرده‌اند، بر طبق نتایج آن‌ها مقاومت سایشی چدن پر کروم بالاتر از چدن نایه‌دار ۴ می‌باشد [۱۲]. هم‌چنین جین جو و یونگفا در سال ۱۹۹۳، تاثیر عناصر سیلیسیوم، بور، رنیوم و مولیبدن بر مقاومت سایشی چدن نایه‌دار ۴ را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق عنوان شده است که با افزودن ۱/۵ درصد وزنی سیلیسیوم خواص سایشی بهینه می‌گردد در حالی که افزودن عناصر بور، رنیوم و مولیبدن باعث افزایش مقاومت سایشی شده است [۱۳]. مسعود بهرامی و همکارانش امکان بهبود رفتار سایشی چدن نایه‌دار ۴ را مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. طبق گزارش آن‌ها افزایش تیتانیوم تا ۱/۳ درصد باعث افزایش ۴ تا ۸۰ درصد مقاومت سایشی می‌شود [۱۴]. در تحقیق ارائه شده توسط بیدلا اثر تیتانیوم بر چدن حاوی ۱۶ درصد کروم مورد بررسی قرار گرفته است و تایید شده است که افزایش تیتانیوم از ۰/۱۹ تا ۰/۸۳ درصد سبب بهبود رفتار سایشی می‌شود [۱۵]. موسوی و همکارانش تاثیر تنگستن بر خواص سایشی-خوردگی چدن پرکروم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌ها نشان داد افزایش تنگستن سبب افزایش سختی زمینه و در نتیجه افزایش مقاومت سایشی و خوردگی چدن‌های پرکروم می‌شود [۱۶]. هم‌چنین شفاعتی و

صورتی که دما در زمان ریخته‌گری ۱۴۲۰-۱۴۷۰ درجه سانتی‌گراد بود.

چهار عدد Y بلوک طبق استاندارد ASTM A536-84 ریخته‌گری شد. یک Y بلوک بدون اضافه کردن تنگستن در حالی که به سه Y بلوک دیگر بسته به میزان تنگستن مورد نیاز در هر نمونه، فرو تنگستن اضافه شد. در جدول ۲ ترکیب شیمیایی نمونه‌های تولید شده آمده است. ترکیب شیمیایی با استفاده از دستگاه کوانتومتری Foundry master PRO و مطابق استاندارد ASTM E415-99a بدست آمد.

نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد عملیات حرارتی و در هوا خنک شدند و سپس تحت عملیات تمپر به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. ریزساختار آلیاژها در حالت ریختگی و پس از عملیات حرارتی توسط میکروسکوپ نوری طبق استاندارد ASTM E883 و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند. برای اچ کردن ریزساختار از محلول نایتال دو درصد استفاده شد.

آزمون مقاومت به سایش ماسه خشک و چرخ ساینده طبق استاندارد ASTM G65-00 با استفاده از روش A (یک نمونه برای هر آلیاژ) و در حالت عملیات حرارتی انجام گرفت. در روش A، دبی جریان ماسه باید بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ گرم در دقیقه و زمان انجام تست ۳۰ دقیقه، نیروی اعمالی به نمونه ۱۳۰ نیوتن و تعداد دور چرخ ۶۰۰۰ دور در دقیقه می‌باشد. در ادامه، میزان کاهش وزن هر نمونه با زمان و سطح ساییده شده مورد بررسی قرار گرفت.

همکارانش بررسی ریزساختار چدن‌های سفید پر کروم حاوی تنگستن را مورد بررسی قرار دادند و عنوان کردند که افزایش تنگستن سبب تشکیل کاربیدهای یوتکتیک تنگستن در حالت ریخته‌گری می‌شود [۱۷]. یوفو سان و همکارانش تاثیر تنگستن بر ریز ساختار و خواص چدن پر کروم را مورد بررسی قرار دادند و عنوان کردند که با افزایش تنگستن سختی افزایش یافته و مقاومت به سایش بیش از ۲ برابر شده است [۱۸].

به طور کلی فلزاتی که مقاومت به سایش بالا به همراه مقاومت به ضربه مناسبی دارند، طی سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفتند. یکی از خصوصیات بارز چدن نایهارد ۴ در مقایسه با چدن‌های پر کروم، سختی پذیری بالا، مقاومت به شکست و چقرمگی بالاتر آن‌هاست؛ اما در مقابل، چدن پر کروم مقاومت به سایش بیشتری دارد. هدف از این پژوهش، افزایش مقاومت سایشی چدن نایهارد ۴ با افزودن تنگستن و انجام عملیات حرارتی و دست یابی همزمان به مقاومت به سایش بالاتر همراه به مقاومت به ضربه مناسب است.

## مواد و روش‌ها

نمونه‌های مورد نیاز در این پژوهش در شرکت فرافن و به روش ریخته‌گری تهیه شدند. مذاب مورد نیاز از ذوب کردن قراضه‌های چدن نایهارد، ورق‌های استیل و فولادهای ساختمانی در کوره‌ی القایی و سپس افزودن عناصر آلیاژی نظیر کربن، کروم، نیکل، منگنز و ... به منظور جبران میزان سوخته شده در حین ریخته‌گری، تهیه شدند تا اینکه ذوب مورد نیاز در محدوده‌ی استاندارد ASTM A532 قرار گیرد. محدوده عناصر آلیاژی در جدول ۱ آمده است. جهت ایجاد شرایط یکسان، دمای ذوب‌ریزی به وسیله‌ی دستگاه پیرومتر کنترل گردید. به

جدول ۱- محدوده آنالیز عنصری چدن نایهارد ۴ (درصد وزنی) [۳]

نام عنصر	کربن، %	منگنز، %	سیلیسیوم، %	کروم، %	نیکل، %	مولیبدن، %	گوگرد، %	فسفر، %
درصد وزنی	۲/۵-۳/۶	حداکثر ۲	حداکثر ۲	۷-۱۱	۴/۵-۷	حداکثر ۱.۵	حداکثر ۰.۵	حداکثر ۰/۱

جدول ۲ - آنالیز نمونه های ریخته‌گری شده با درصد های ۰، ۰/۳، ۰/۷ و ۱/۱ تنگستن

آلیاژ	کربن %	کروم %	نیکل %	منگنز %	سیلیسیوم %	مولیبدن %	گوگرد %	فسفر %	تنگستن %
W-0	۳/۱	۸/۱۳	۵/۱۱	۰/۷	۱/۱۴	۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰
W-3	۳/۱۳	۸/۳	۴/۹۳	۰/۸	۱/۲۰	۰/۱۵	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۳
W-7	۳/۱۶	۸/۱۹	۵/۲۴	۰/۷	۱/۱۲	۰/۱۴	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۷
W-11	۳/۲۱	۸/۲۲	۵/۰۹	۰/۷۲	۱/۱۸	۰/۲	۰/۰۲	۰/۰۰۹	۱/۱

## نتایج و بحث

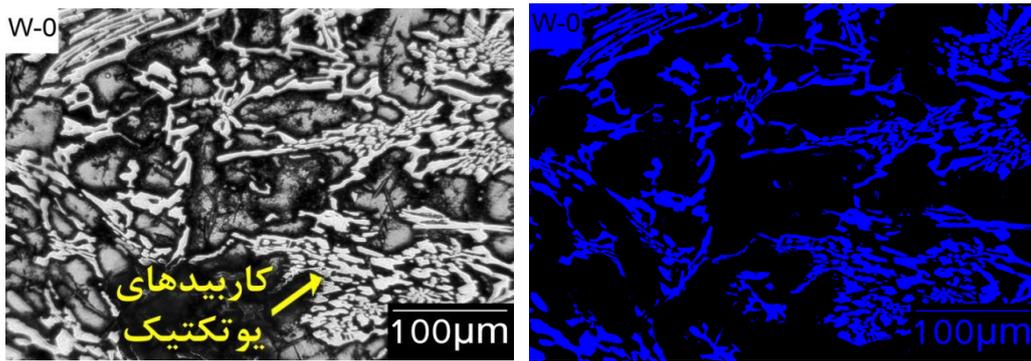
### بررسی ریز ساختار مشاهده شده توسط میکروسکوپ نوری (الف) ریز ساختار ریختگی

در شکل ۱ ریز ساختار نمونه‌های ریختگی و تصاویر تحلیل‌گر تصویر (Image Analyzer) [۱۹]، نشان داده شده است. در تصاویر تحلیل‌گر تصویر، برای تشخیص بهتر کاربیدهای یوتکتیک موجود در ریز ساختار، توسط نرم‌افزار کاربیدهای یوتکتیک با رنگ آبی مشخص شده است. با استفاده از روش‌های تحلیل‌گر تصویر، کسر سطحی کاربیدهای یوتکتیک و اندازه قطر کاربیدها در نمونه‌های ریخته‌گری شده بدست آمد که در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۳ قابل مشاهده است که با افزایش مقدار تنگستن در آلیاژها، قطر متوسط کاربیدها کاهش و میزان کسر سطحی کاربیدها از نمونه بدون تنگستن تا نمونه حاوی ۱/۱ درصد تنگستن، به میزان ۴/۲۳ درصد افزایش یافته است. از آنجایی که این کاربیدها به عنوان حفاظت کننده از زمینه در مقابل مواد

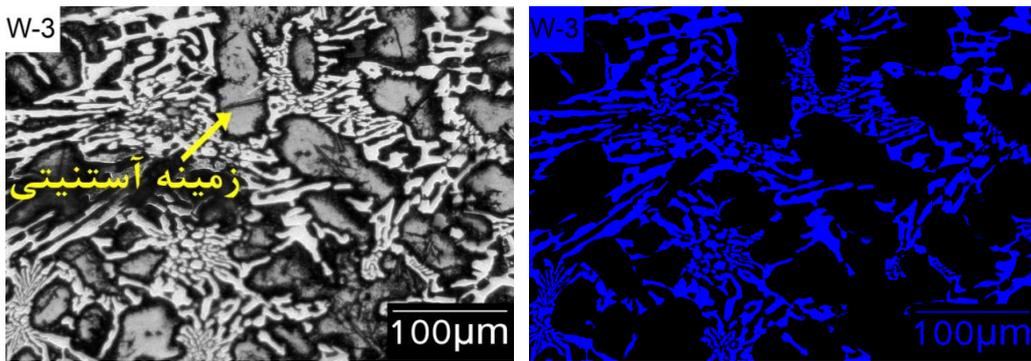
ساینده عمل می‌کنند با افزایش کسر سطحی این کاربیدها انتظار می‌رود که مقاومت به سایش آلیاژ نیز افزایش یابد.

با توجه به تصاویر متالوگرافی گرفته شده توسط میکروسکوپ نوری که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند، می‌توان دید که با افزایش تنگستن، کاربیدهای یوتکتیک از حالت ضخیم به حالت ریزتر تبدیل می‌شوند و کاربیدهای یوتکتیک حالت ظریف تری به خود می‌گیرند. این تغییرات به وجود آمده در ریز ساختار، باعث یک پارچه شدن ساختار و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی خواهد شد.

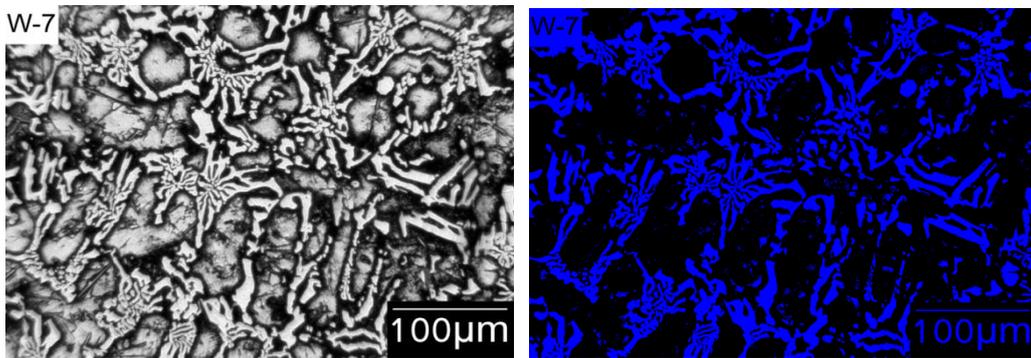
ریزساختار این چدن‌ها تاثیر بسیار مهمی بر خواص مکانیکی و مقاومت سایشی دارد. با توجه به شکل ۱ می‌توان مشاهده کرد که ریز ساختار همه آلیاژها به طور عمده شامل کاربید یوتکتیک  $M_7C_3$  در زمینه آستنیتی هستند و فاز کاربید اولیه کمتر به چشم می‌خورد، این موضوع نشان می‌دهد که آلیاژهای مورد بررسی به ترکیب یوتکتیک نزدیک هستند.



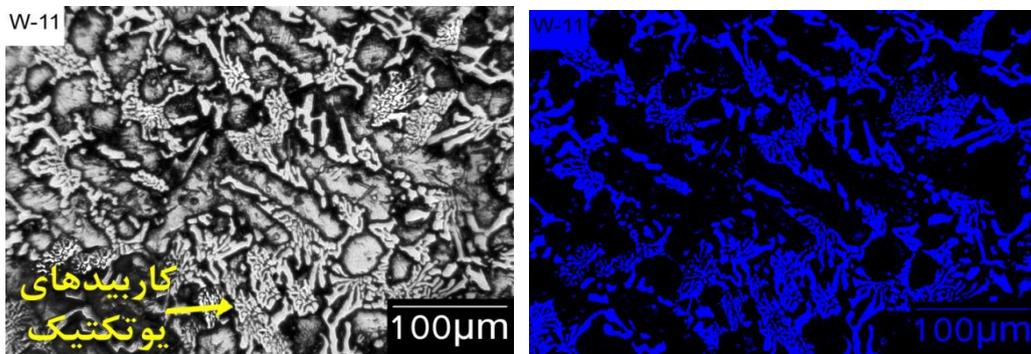
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱- ریزساختار متالوگرافی و تصاویر تحلیل گر تصویر نمونه‌های ریخته‌گری شده حاوی الف (۰، ب) ۰/۳، ج) ۰/۷ و د) ۱/۱٪ تنگستن

جدول ۳ - کسر سطحی و اندازه قطر کاربیدهای یوتکتیک بدست آمده در نمونه های ریخته‌گری شده، توسط نرم افزار تحلیل گر تصویر

آلیاژ	درصد تنگستن	متوسط اندازه قطر کاربید ( $\mu\text{m}$ )	کسر سطحی کاربید
W-0	۰	۴۷/۲	۲۵/۱۷
W-3	۰/۳	۳۸/۳	۲۶/۱۱
W-7	۰/۷	۲۹/۱	۲۸/۳
W-11	۱/۱	۲۰/۶	۲۹/۴

### ب) ریز ساختار حاصل از عملیات حرارتی

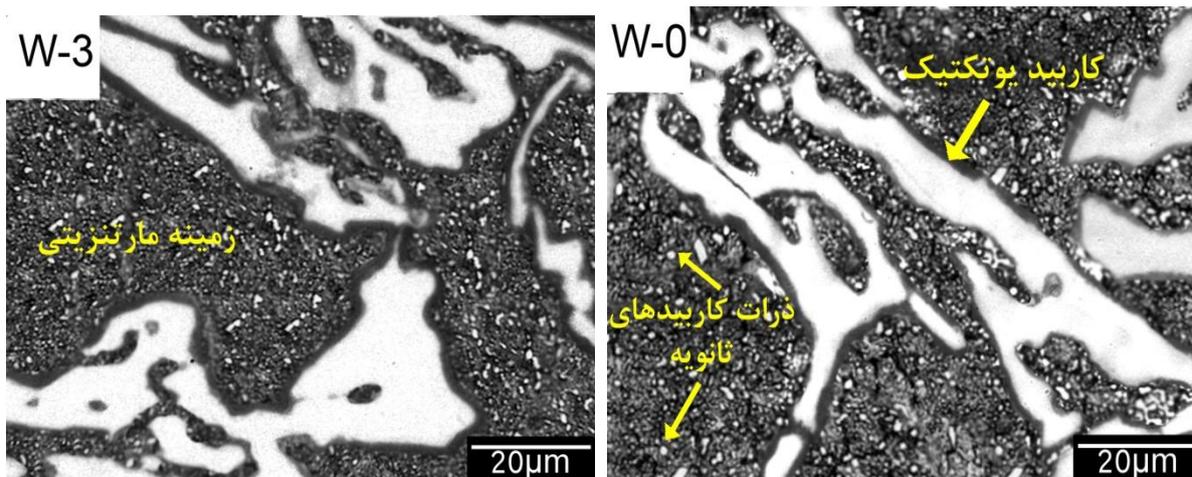
شکل ۲ ریز ساختار متالوگرافی چهار نمونه عملیات حرارتی شده را نشان می‌دهد. عملیات حرارتی با هدف تبدیل زمینه آستنیتی به مارتنزیت و رسوب کاربیدهای ثانویه در زمینه انجام می‌شود، تا در نتیجه سبب بهبود خواص مکانیکی قطعات ساخته شده گردد.

با قرار گرفتن نمونه‌ها در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، چون در این دما فاز کاربید ثانویه در زمینه آستنیتی پایدار است، فاز زمینه آستنیت غنی از عناصر آلیاژی تجزیه شده و به فاز آستنیت با غلظت کم‌تر عناصر آلیاژی و کاربید ثانویه تجزیه می‌شود. سپس در طی کوئچ کردن، فاز آستنیت با غلظت پایین‌تر از عناصر آلیاژی به مارتنزیت تبدیل می‌شود. همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، ساختار شامل فازهای کاربید (نواحی روشن) و زمینه است که حاوی تیغه‌های مارتنزیت، کاربید ثانویه کروم (ذرات روشن)، کاربید تنگستن و احتمالاً در بعضی نواحی، آستنیت باقی مانده است. کاربیدهای یوتکتیک حین انجماد تشکیل خواهند شد. در حالی که کاربیدهای ثانویه در طی سرد شدن پس از انجماد یا هنگام عملیات حرارتی تشکیل می‌گردند. پس از عملیات حرارتی نمونه‌ها، زمینه دچار تغییرات عمده می‌شود و ذرات ریزی در زمینه مشاهده می‌گردد. این ذرات

کاربیدهای ثانویه هستند که از فاز آستنیت غنی از عناصر آلیاژی تشکیل شده‌اند. این کاربیدها به صورت کروی، در درون آستنیت جوانه زده و رشد می‌کنند. اندازه و میزان کاربیدها به زمان و دمای عملیات حرارتی بستگی دارد. کاربیدهای ثانویه در تصاویر اچ شده، سفید رنگ دیده می‌شوند؛ اما به دلیل اندازه کوچکشان در بزرگ نمایی کم، به صورت نقاط سیاه / روشن دیده خواهند شد.

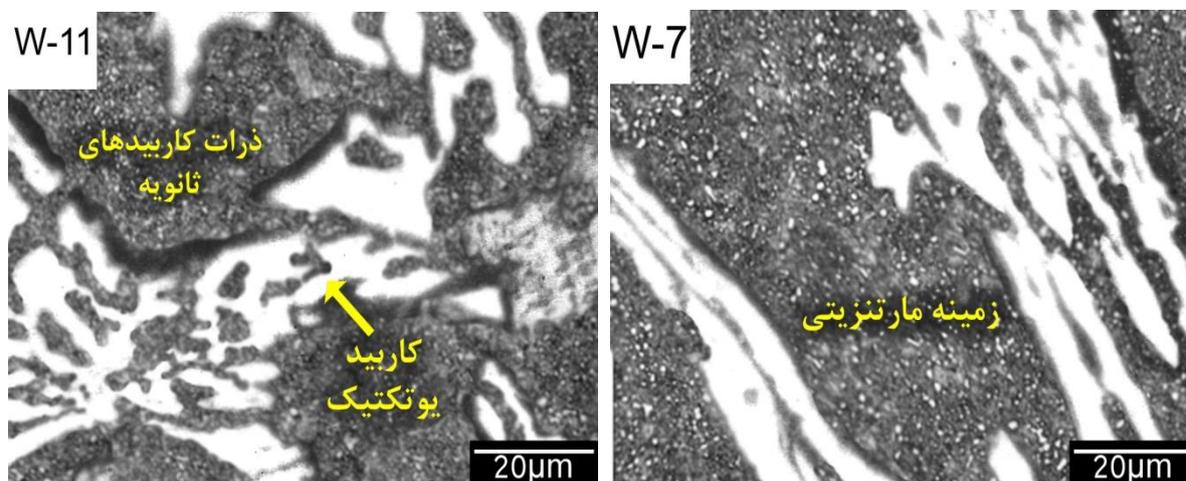
با توجه به شکل ۲ افزایش تنگستن باعث ریز شدن کاربیدهای ثانویه و هم‌چنین ظریف‌تر شدن مارتنزیت گردیده است، که در نمونه‌های حاوی ۰/۷ و ۱/۱ درصد تنگستن این اثر قابل مشاهده است و می‌تواند باعث بهبود خواص مکانیکی آلیاژ شود. مارتنزیت اولیه مورفولوژی بشقابی دارد که با توجه به کاهش کربن در زمینه و به دلیل جذب کربن توسط تنگستن به مارتنزیت لایه‌ای تبدیل می‌گردد. هم‌چنین با افزایش تنگستن میانگین اندازه قطر کاربید کم‌تر می‌گردد.

به طور کلی با مشاهده ساختار متالوگرافی هر چهار نمونه می‌توان گفت که با عملیات حرارتی، ساختار همگن‌تری به دست می‌آید و در نتیجه خواص مکانیکی بهتری مورد انتظار است. نمونه‌های حاوی تنگستن نسبت به نمونه بدون تنگستن دارای ساختاری با کاربید ریزتر و یک پارچه‌تر هستند.



(ب)

(الف)



(د)

(ج)

شکل ۲- ریزساختار متالوگرافی نمونه‌های ریخته‌گری و عملیات حرارتی شده حاوی الف)، ب) ۳/۰، ج) ۷/۰ و د) ۱۱/۱: تنگستن

الکترونی روبشی نیز مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. کاربیدهایی که به صورت متخلخل یا استخوان ماهی شکل می‌باشند، در تصاویر نمونه ۱/۱ درصد تنگستن به وضوح قابل تشخیص هستند. نتایج EDS نشان داد که این کاربیدها حاوی مقادیر زیادی تنگستن می‌باشند.

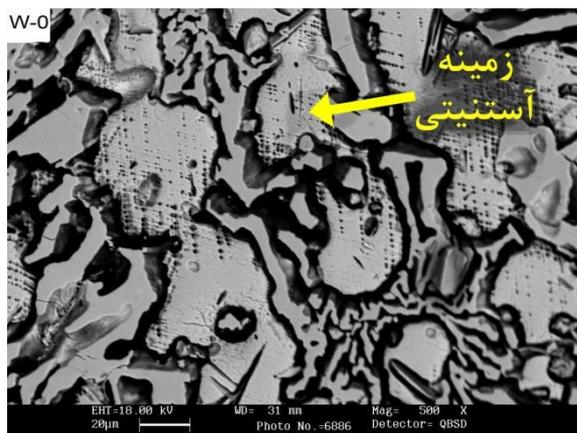
بررسی ریز ساختار مشاهده شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی

الف) ریز ساختار ریختگی

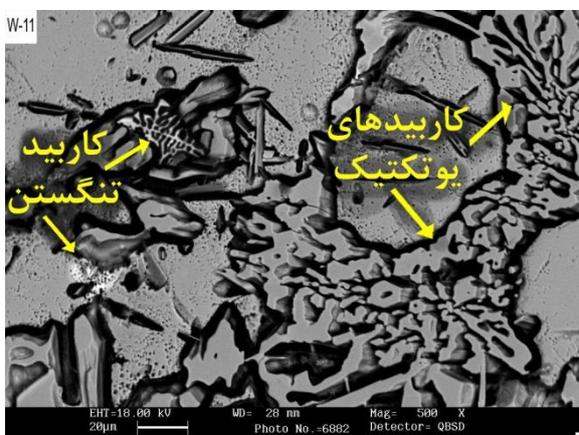
جهت مشاهده دقیق‌تر ریزساختار آلیاژهای مورد بررسی، ریزساختار ریختگی نمونه‌ها توسط میکروسکپ



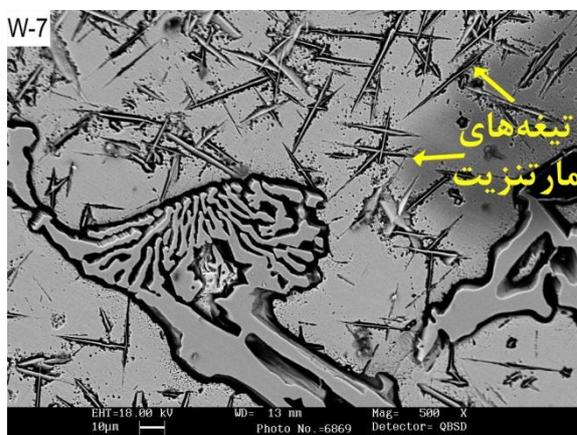
(ب)



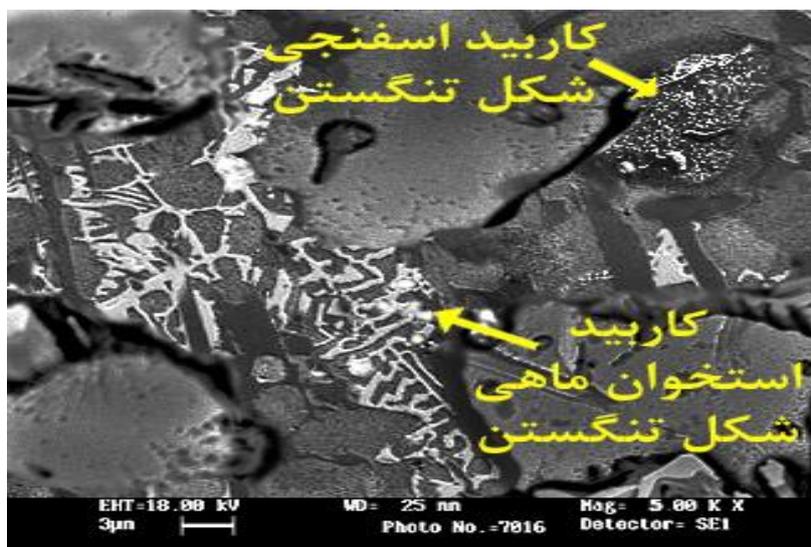
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

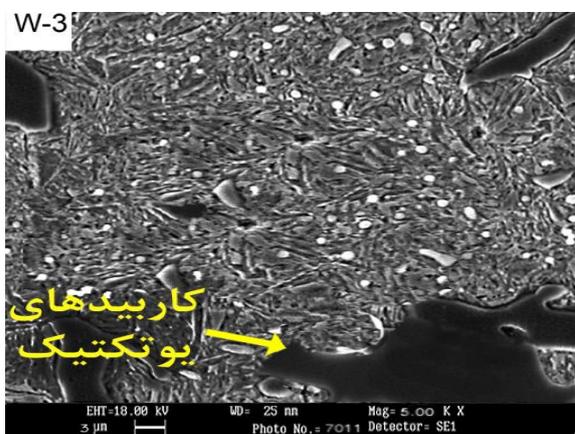
شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های ریخته‌گری شده حاوی الف) ۰، ب) ۰/۳، ج) ۰/۷، د و ه) ۱/۱ تنگستن

فاز، ساختار کریستالوگرافی مشابهی دارند و نیز این که شعاع اتمی تنگستن و کروم به هم نزدیک هستند. قرارگیری این دو نوع کاربید استخوان ماهی و اسفنجی شکل در کنار هم در شکل ۳ (ه) نشان داده شده است.

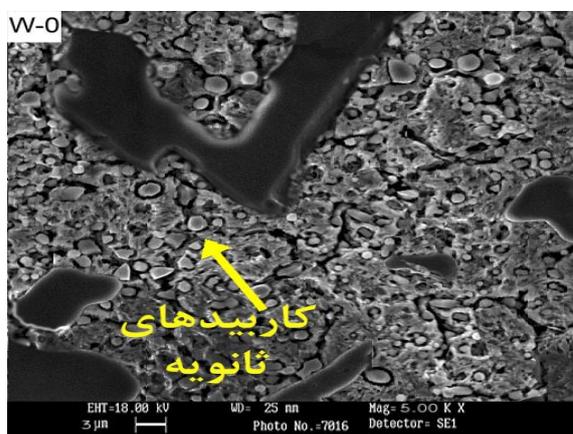
#### ب) ریز ساختار حاصل از عملیات حرارتی

ریزساختارهای حاصل از عملیات حرارتی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند تا مشاهده دقیق تری از ریزساختار داشته باشیم و نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

طیف مربوط به آنالیز ترکیب شیمیایی این فاز در تصویر به همراه آنالیز شیمیایی عناصر موجود در آن در شکل ۵ و ۶ و جدول ۴ آورده شده است. کاربیدهای تنگستن به واسطه جدایش بلند دامنه تنگستن در حین انجماد و به واسطه واکنش یوتکتیک تشکیل می‌شوند. در این استحال یوتکتیکی مذاب حاوی تنگستن به آستنیت، کاربید یوتکتیک کروم‌دار و کاربید یوتکتیک تنگستن‌دار تبدیل می‌شود که دو نوع کاربید ذکر شده بر روی هم رشد می‌کنند. دلیل این پدیده آن است که هر دو کاربید در یک بازه دمایی و زمانی مشابه تشکیل می‌شوند و هر دو



(ب)



(الف)



(د)

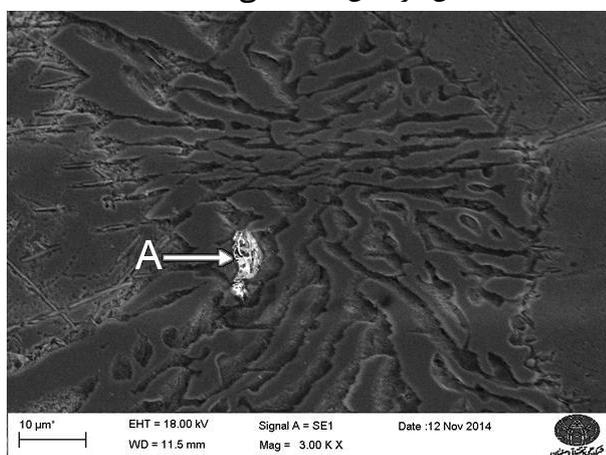


(ج)

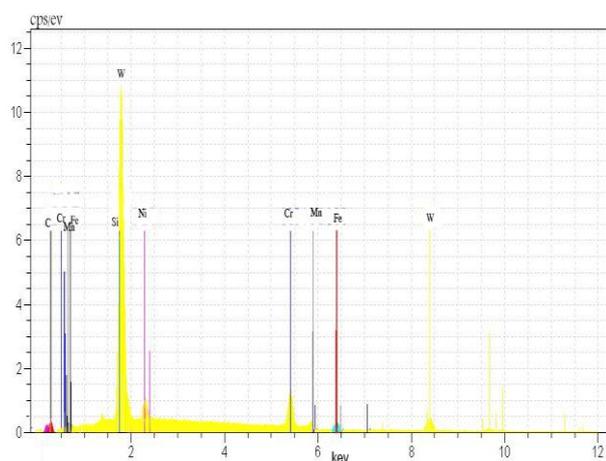
شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های ریخته‌گری و عملیات حرارتی شده حاوی الف) ۰، ب) ۰/۳، ج) ۰/۷ و د) ۱/۱٪ تنگستن

دارای مقادیر کمی تنگستن در ساختار خود می‌باشند که تنگستن بصورت محلول در کاربیدهای یوتکتیکی است.

طیف مربوط به آنالیز شیمیایی کاربید تنگستن موجود در ریزساختار ریختگی آلیاژ حاوی ۱/۱ درصد تنگستن در شکل ۶ آورده شده است. این کاربیدها که دارای مقادیر بالایی تنگستن در ساختار خود می‌باشند، دارای سختی بالایی نیز هستند و در آلیاژهای با تنگستن بیش از ۳ درصد تشکیل می‌شوند. همان گونه که اشاره شد، دلیل تشکیل این کاربیدها در این آلیاژها که همگی دارای مقادیر تنگستن کم‌تر از ۳ درصد هستند، جدایش بلند دامنه تنگستن در حین انجماد می‌باشد.



شکل ۵- آنالیز عنصری EDX نقطه A نمونه ریخته‌گری شده حاوی ۱/۱ درصد تنگستن در حالت ریخته‌گری



شکل ۶- طیف مربوط به آنالیز عنصری EDX نقطه A در نمونه ریخته‌گری شده حاوی ۱/۱ درصد تنگستن

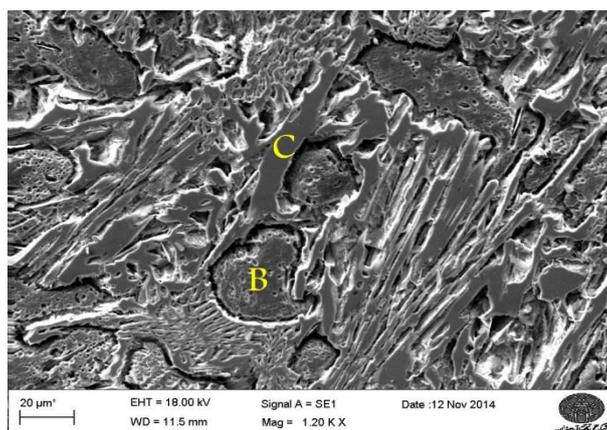
در تمامی ریز ساختارها شاهد توزیع ذرات ریز و پرتراکم کاربیدهای ثانویه در زمینه مارتنزیت تمپر شده می‌باشیم. در نمونه‌ی بدون تنگستن (شکل ۴ الف) کاربیدهای ثانویه از زمینه جدا شده‌اند و ارتباط (پیوستگی) چندانی با زمینه ندارند؛ اما چنین پدیده‌ای در ریزساختار آلیاژهای حاوی تنگستن مشاهده نمی‌شود. بیش‌ترین میزان رسوبات ثانویه که به صورت کیفی می‌توان از تصاویر به آن پی برد در آلیاژهای ۱/۱ درصد تنگستن به چشم می‌خورد و در نمونه بدون تنگستن به نظر می‌رسد که کاربیدهای ثانویه از تراکم کم‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها برخوردار می‌باشد. هم چنین با افزایش میزان تنگستن در آلیاژها به نظر می‌رسد که اندازه‌ی تیغه‌های مارتنزیت نیز کوچک‌تر شده‌اند که این مطلب با مقایسه تصاویر مشهود می‌باشد. با مشاهده تصاویر ذکر شده، مشخص می‌شود که با افزایش میزان تنگستن در نمونه‌ها مقدار رسوبات کاربیدهای ثانویه در نزدیکی کاربیدهای یوتکتیک افزایش یافته است. این افزایش به گونه‌ای است که در نمونه بدون تنگستن نواحی اطراف کاربیدهای یوتکتیک تقریباً عاری از رسوبات کاربیدهای ثانویه هستند؛ اما در نمونه‌ی حاوی ۱/۱ درصد تنگستن توزیع رسوبات کاربیدهای ثانویه در نزدیکی کاربیدهای یوتکتیک تفاوت چندانی با مناطق دور از کاربیدهای یوتکتیک ندارد.

### بررسی توزیع عناصر آلیاژی در فازهای موجود در ریزساختار نمونه‌ها به توسط روش EDS

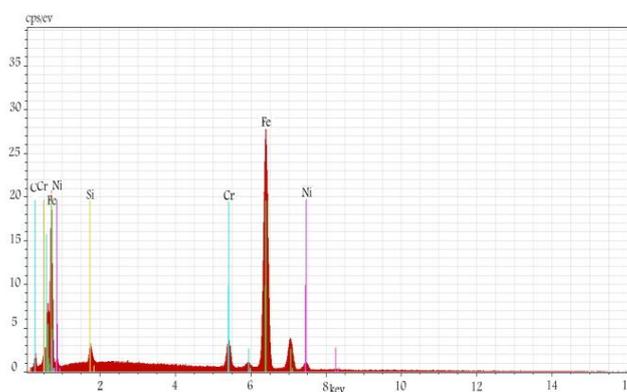
در این قسمت، میزان عناصر آلیاژی در فازهای گوناگون موجود در ریزساختار ریختگی و عملیات حرارتی شده نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف تنگستن، با استفاده از تکنیک EDS اندازه‌گیری شده است که به همراه محل مورد بررسی آورده شده است. این موارد در شکل‌های ۵ تا ۹ و جداول ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، مشخص می‌شود که کاربیدهای یوتکتیک

جدول ۴- آنالیز عنصری EDX از نقطه A برای نمونه ۱/۱ درصد تنگستن در حالت ریخته‌گری

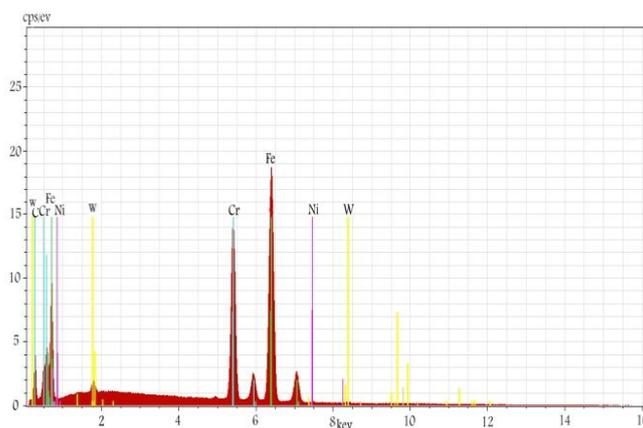
عنصر	ردیف	درصد وزنی	میانگین درصد وزنی	میانگین درصد اتمی
کربن	K-ردیف	۶/۷۲۷۳۸۱	۶/۳۳۹۰۸۶	۳۷/۳۶۵۹۶
کروم	K-ردیف	۲۰/۷۷۲۵۶	۱۹/۵۷۱۶۸	۲۱/۵۵۰۳۴
سیلیسیوم	K-ردیف	۰	۰	۰
نیکل	K-ردیف	۰/۶۱۱۹	۰/۵۹۱۶۴	۰/۳۹۸۹۷۵
منگنز	K-ردیف	۰/۴۸۷۹۶۴	۰/۴۱۴۱۰۹	۰/۱۳۵۹
آهن	K-ردیف	۹/۳۵۹۱	۹/۴۱۶۶۶۹	۷/۵۶۵۰۱۷
تنگستن	L-ردیف	۶۴/۹۹۴۸۸	۶۳/۰۱۵۹	۳۰/۹۹۵۵۷
	مجموع	۱۰۲/۹۳۴۸	۱۰۰	۱۰۰



شکل ۷- آنالیز عنصری EDX نقطه B و C نمونه ریخته‌گری و عملیات حرارتی شده حاوی ۱/۱ درصد تنگستن



شکل ۸- طیف مربوط به آنالیز عنصری EDX از نقاط B برای نمونه ۱/۱ درصد تنگستن در حالت عملیات حرارتی



شکل ۹- طیف مربوط به آنالیز عنصری EDX از نقطه C نمونه ریخته‌گری و عملیات حرارتی شده حاوی ۱/۱ درصد تنگستن

جدول ۵- آنالیز عنصری EDX از نقاط B برای نمونه ۱/۱ درصد تنگستن در حالت عملیات حرارتی

عنصر	ردیف	درصد وزنی	میانگین درصد وزنی	میانگین درصد اتمی
کربن	ردیف-K	۹/۳۲۸۴۳۳	۸/۹۱۲۲۳۵	۳۰/۹۲۹۸۳
سیلیسیوم	ردیف-K	۱/۳۵۲۲۱۳	۱/۲۹۱۸۸۲	۱/۹۱۷۳۹۲
کروم	ردیف-K	۵/۶۰۲۹۶	۵/۳۵۲۹۷۸	۴/۲۹۱۳۶۶
آهن	ردیف-K	۸۳/۵۷۰۱۷	۷۹/۸۴۱۶	۵۹/۵۹۳۵۷
نیکل	ردیف-K	۴/۸۱۶۱۸۸	۴/۶۰۱۳۰۷	۳/۲۶۷۸۴۹
	مجموع	۱۰۴/۶۷	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۶- آنالیز عنصری EDX نقطه C نمونه ریخته‌گری و عملیات حرارتی شده حاوی ۱/۱ درصد تنگستن

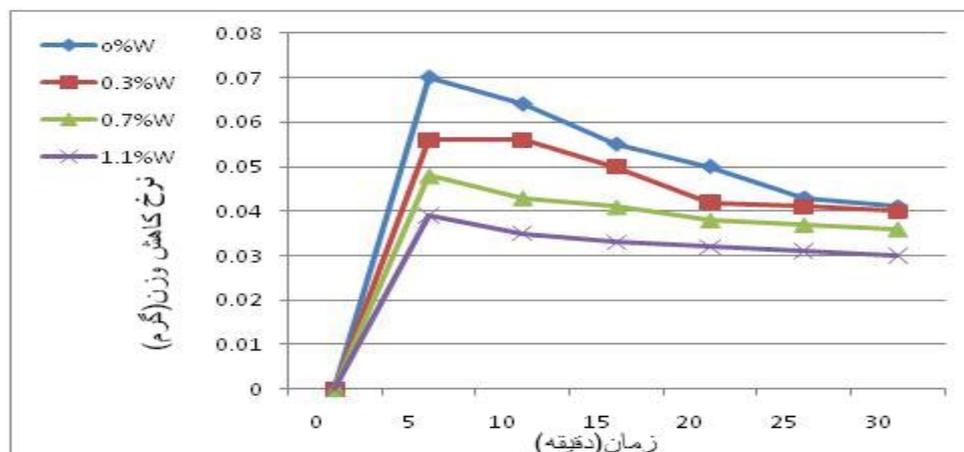
عنصر	ردیف	درصد وزنی	میانگین درصد وزنی	میانگین درصد اتمی
کربن	ردیف-K	۱۱/۶۲۰۱۵	۱۱/۳۰۰۹۸	۳۷/۳۶۱۱۹
کروم	ردیف-K	۲۶/۵۷۶۶۸	۲۵/۸۴۶۶۹	۱۹/۷۳۸۷۱
آهن	ردیف-K	۶۰/۳۴۵۱۴	۵۸/۶۸۷۶۱	۴۱/۷۲۸۲۷
نیکل	ردیف-K	۰/۶۰۷۹۷۳	۰/۵۹۱۲۷۳	۰/۴۰۰۰۲۱
تنگستن	ردیف-L	۳/۶۷۴۳۸	۳/۵۷۳۴۵۵	۰/۷۷۱۸۰۷
	مجموع	۱۰۲/۸۲۴۳	۱۰۰	۱۰۰

## نتایج آزمون مقاومت به سایش

گردد، حفاظت از کاربردها را از بین برده و در نتیجه سبب پوسته شدن و شکستن کاربردها می‌شود. از این رو مقاومت سایشی زمینه کنترل کننده سایش خواهد بود. رسوب کاربردهای ثانویه در زمینه مارتنزیتی ظریف باعث افزایش استحکام زمینه و کاهش شکست و خروج کاربردها گردیده است. هرچند کاربردها فازهای بسیار سختی هستند؛ اما در عین حال بسیار ترد و شکننده خواهند بود. هم‌چنین افزایش سختی کاربرد می‌تواند سبب محافظت از زمینه شود که تنگستن دلیل شکل‌گیری کاربرد سخت‌تر است و نیز باعث بهبود مقاومت سایشی گردیده است. فاکتورهای زیادی چون نوع کاربرد، سختی، کسر حجمی آن و نیز فاصله متوسط زمینه بین کاربردها بر مقاومت سایشی اثر خواهند گذاشت. در اغلب موارد بهبود ناشی از حجم کاربردها تحت شعاع بهبود ناشی از تغییر زمینه خواهد بود. با این حال نتیجه سختی بالاتر، مقاومت سایشی بالاتر است. در کل چدن ناپهارد ۴ مقاومت سایشی کم‌تری را نسبت به چدن‌های پر کروم دارد و به منظور داشتن مقاومت سایشی مناسب، بایستی شامل سه فاز اصلی زمینه مارتنزیتی با اندکی آستنیت باقیمانده، کاربردهای یوتکتیک، کاربردهای ریز کروی شکل و کاربردهای ثانویه باشند.

شکل ۱۰ نتایج آزمون سایش، یعنی نرخ کاهش وزن نسبت به زمان طی شده را برای چهار نمونه نشان داده است. همان گونه که از نتایج آزمون سایش می‌توان مشاهده کرد، با گذشت زمان نرخ کاهش وزن کاهش یافته است که می‌توان دلیل آن را کارسختی ایجاد شده بر روی نمونه‌ها عنوان کرد. با توجه به جدول ۷ می‌توان دید نمونه حاوی ۱/۱ درصد تنگستن کم‌ترین میزان کاهش وزن را پس از طی ۳۰ دقیقه از خود نشان داده است. این در صورتی است که بیش‌ترین کاهش وزن برای نمونه بدون تنگستن بوده و هم‌چنین شیب کاهش وزن برای نمونه بدون تنگستن بیش‌تر است. دو نمونه ۰/۷ و ۰/۳ درصد تنگستن، به ترتیب کم‌ترین کاهش وزن را بعد از نمونه ۱/۱ درصد تنگستن دارند. با افزایش تنگستن تا ۱/۱ درصد، مقاومت به سایش نمونه نسبت به نمونه بدون تنگستن حدود ۲ برابر شده است.

افزایش مقاومت سایشی این آلیاژ را می‌توان به افزایش سختی زمینه نسبت داد؛ زیرا اولین نقش زمینه، حفاظت مکانیکی از کاربردها است، که نقش زمینه در این رابطه بسیار پیچیده است. زمینه به عنوان محافظ کاربردها عمل خواهد کرد. اگر زمینه در طی فرایند سایش خارج



شکل ۱۰- نمودار نرخ کاهش وزن برحسب زمان (دقیقه) برای نمونه‌های مختلف حاوی درصد متفاوت از تنگستن

جدول ۷- تغییرات مقاومت سایشی

نمونه	وزن نمونه قبل از آزمایش (گرم)	وزن نمونه بعد از آزمایش (گرم)	کاهش وزن (گرم)	نسبت مقاومت به سایش
W-0	۱۱۸/۱۲	۱۱۷/۷۹۷	۰/۳۲۳	۱
W-3	۱۱۷/۹۴	۱۱۷/۶۵۵	۰/۲۸۵	۱/۱۳
W-7	۱۱۹/۲۳۵	۱۱۸/۹۹۲	۰/۲۴۳	۱/۳۲
W-11	۱۱۸/۵۶۲	۱۱۸/۳۹۱	۰/۱۷۱	۱/۸۸

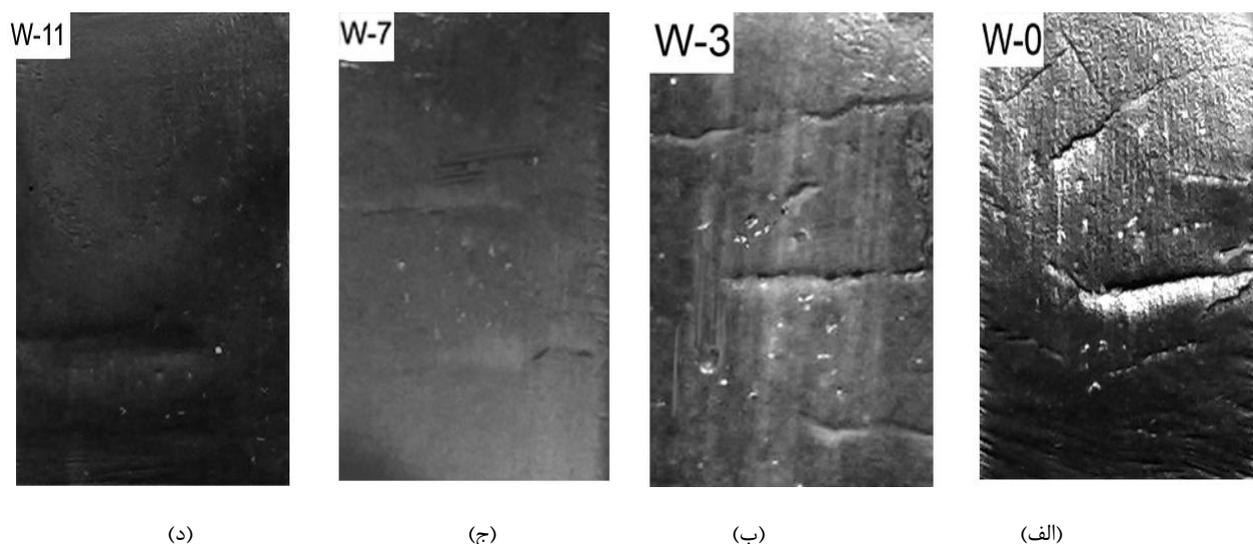
### بررسی سطح سایش

به منظور افزایش عمر مفید قطعات و اعمال تمهیداتی در بالا بردن مقاومت سایش، لازم است نوع سایشی که اتفاق می‌افتد، شناسایی شود. سایش از نوع خراشان سه جسمی بسته است که مکانیزم تشکیل سایش خراشان، ترک ریز است؛ اما مقدار سایش در نمونه‌ها متفاوت است. در شکل ۱۱ تصاویر سطح سایش نمونه‌ها نشان داده شده است.

هنگامی که ذرات ساینده در فصل مشترک دو سطح در حال لغزش قرار گرفته و از هر دو سطح ذراتی را جدا می‌سازد. سایش خراشان سه جسمی نامیده می‌شود. در این نوع سایش، ذرات ساینده آزاد بوده و به جایی متصل نیستند و می‌توانند آزادانه بر روی سطح حرکت کرده و نسبت به دیگر ذرات حرکت داشته و در ضمن حرکت و سرخوردن چرخش نیز داشته باشند. سایش خراشان وقتی رخ می‌دهد که سطح در تماس با تکه‌ها یا ذراتی از مواد قرار گیرد که دارای سختی بزرگ‌تری از آن باشند و عبارت است از جدایش تدریجی مواد از سطح که

از طریق برش خوردن یا کندگی ناشی از تماس و حرکت مواد ساینده بدست می‌آید. ذرات سخت و سنگ ریزه‌ها (مواد ساینده) ممکن است مواد را به وسیله برش‌های میکروسکوپی، شکست میکروسکوپی و یا خستگی شدت یافته و به دلیل تغییر شکل‌های مکرر، از سطح جدا کنند. چنانچه سختی سطح سایش بالا باشد سایش خراشان می‌تواند تحت مکانیزم ترک‌ریز پدید آید در این حالت تغییر شکل پلاستیکی در اطراف شیار ناچیز بوده و میزان یا حجم ذرات سایش به مراتب بیش از حجم شیارهای ایجاد شده در سطح است [۲۰-۲۳].

سطوحی در مقابل سایش خراشان مقاوم هستند که سختی آن‌ها بیش از نصف سختی ماده ساینده باشد. وجود ذرات سخت در زمینه ماده تحت سایش، می‌تواند به صورت ایجاد مانع در برابر تشکیل شیارهای خراشی در افزایش مقاومت به سایشی ماده، تأثیر بسزایی داشته باشد. در این راستا، اندازه و مورفولوژی ذرات سخت امری بحرانی به‌شمار می‌رود [۲۱].



شکل ۱۱- تصویر سطح سایش نمونه‌های حاوی الف) ۰، ب) ۰/۳، ج) ۰/۷ و د) ۱/۱٪ تنگستن

### نتیجه‌گیری

است و کاربیدهای یوتکتیک از حالت ضخیم به حالت ریزتر تبدیل می‌شوند و قطر متوسط کاربیدهای یوتکتیک از ۴۷/۲ به ۲۰/۶ میکرومتر کاهش یافت و کسر حجمی کاربیدها از ۲۵/۱۷ به ۲۹/۴ درصد افزایش یافت.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان از تمام عزیزانی که در انجام این پژوهش یاری رساندند کمال قدردانی را دارند.

در نمونه حاوی ۱/۱ درصد تنگستن، کاربیدهای استخوان ماهی شکل تنگستن بر روی کاربیدهای یوتکتیک تشکیل می‌شوند که دلیل تشکیل آن جدایش بلند دامنه در حین انجماد است. با انجام عملیات حرارتی، کاربیدهای تنگستن در فاز کاربیدهای یوتکتیک حل شده و هم‌چنین قسمت‌های مختلف فاز زمینه از نظر پتانسل جوانه زنی کاربیدهای ثانویه حالت همگن‌تری می‌یابند و توزیع رسوبات کاربید ثانویه ریزتر و یکنواخت‌تر می‌شود. با افزایش تنگستن تا ۱/۱ درصد، مقاومت به سایش نمونه نسبت به نمونه بدون تنگستن حدود ۲ برابر شده

### References:

- 1-J. Gordan, "Development of abrasion-resistant Nickel-containing alloy white irons of high-hardness", American Foundrymen Society, 11, pp. 1-21, 1988.
- 2-L. Jinzhu and M. Yongfa, "Wear resistance of ni-hard 4 and high-chromium cast iron re-evaluated", ASTM international, Wear, 186, pp. 37-40, 1986.
- 3-Standard ASTM A532-standard specification for abrasion resistant cast iron.

۴- م. ع. گل‌عدار، "اصول کاربرد عملیات حرارتی فولادها و چدن‌ها"، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ص ۳۹۶، ۱۳۶۷.

- 5- June-Tongxi, Qing-Dezhon, Shi-Hui and Guang-Shun-Song; "Influence of retained austenite on the wear resistance of high-chromium cast iron under various impact loads", Wear, 162-164, 1993.

- 6-F.Maratray and A.Poulation, "Austenite retention in high-chromium white iron", AFS Transactions, 895-803, 1982.
- 7-R.B.Gundlach, "Microstructure, hardness and abrasion resistance of as-cast 17.5% chromium white cast iron", AFS Transactions, 309-316, 1974.
- 8-J.M.Tong, Y.Z.Zhou, T.Y.Shen and H.J.Deng, "The influence of retained austenite in high chromium cast iron on impact-abrasion wear", Wear, 135, 217-226, 1990.
- 9-I.R.Sare and B.K.Arnold, "The effect of heat treatment on the gouging abrasion resistance of alloy white cast irons", Metallurgical Transactions A, 26A, 357-370, 1995.
- 10-C.P.Tabrett and I.R.Sare, "Effect of high temperature and sub-ambient treatments on the matrix structure and abrasion resistance of a high-chromium white iron", Scripta Materialia, 38, 1747-1753, 1998.
- 11-J.T.H.Pearce, "High chromium cast Irons to resist abrasive wear", Technical paper, Foundryman, 156-166, April 2002.
- 12-. Jinzhu and M. Yongfa, "Wear resistance of Ni-hard 4 high-chromium cast iron re-evaluated", ASTM international, Wear, 186, pp. 37 -40, 1986.
- 13-L.Jinzhu and M.Yongfa, "Development of abrasion-resistant Ni-hard 4 cast irons", Wear, 162, pp. 883-836, 1993.
- ۱۴-م. ب. علمدارلو، و. جواهری، "تاثیر افزودن تیتانیوم بر مورفولوژی کاربید M7C3 در چدن Ni-hard4"، دومین همایش صنایع معدنی، کرمان، پژوهشکده صنایع معادن دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- 15-A. Bedolla and A. Jacuinde, "Effect of titanium on the as-cast microstructure of a 16% chromium white iron", Materials science and engineering A, 398, pp.297-308, 2005.
- 16-S.H. Mousavi, A. Bahrami and P. Davami, "Effects of tungsten on erosion-corrosion behavior of high chromium white cast iron", Materials Science and Engineering A, 454-455, 2007.
- ۱۷-ع. شفاعتی، ف. خمایی زاده، "بررسی ساختاری چدن‌های سفید پر کروم حاوی تنگستن"، دومین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی ایران و جامعه ريختگران ایران، ۱-۴، ۱۳۸۷.
- 18-Y.Lv. Yufu Sun , J. Zhao and J. Sh. Sumeng Hu, "Effect of tungsten on microstructure and properties of high chromium cast iron", Materials and Design, 39, pp.303-308, 2012.
- 19-Meesoft, Image Analyzer, Version 1.35, 2013.
- 20-D. A. Rigney and W. A. Glaeser, source book on wear control technology, American society for metals, 1978.
- 21-R. G. Bayer, mechanical wear fundamental and testing, Mahr cell dekk, 2004.
- ۲۲-آ، هاچینگر، ر، بخشی، "اصطکاک و سایش مواد مهندسی" دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۸۳.
- ۲۳-ا، رنجبر، ع، جعفری، ک، جانقریان، ع، کارگر، "بررسی فرایند سایش و خوردگی سایشی چدن‌های سفید Ni-hard1, Ni-hard2 و چدن سفید پر کروم 27% Cr و مقایسه‌ی این دو فرایند"، چهارمین کنگره سالانه انجمن مهندسين ایران، ص ۲۵-۲۷، ۱۳۷۹.