

به نام خدا



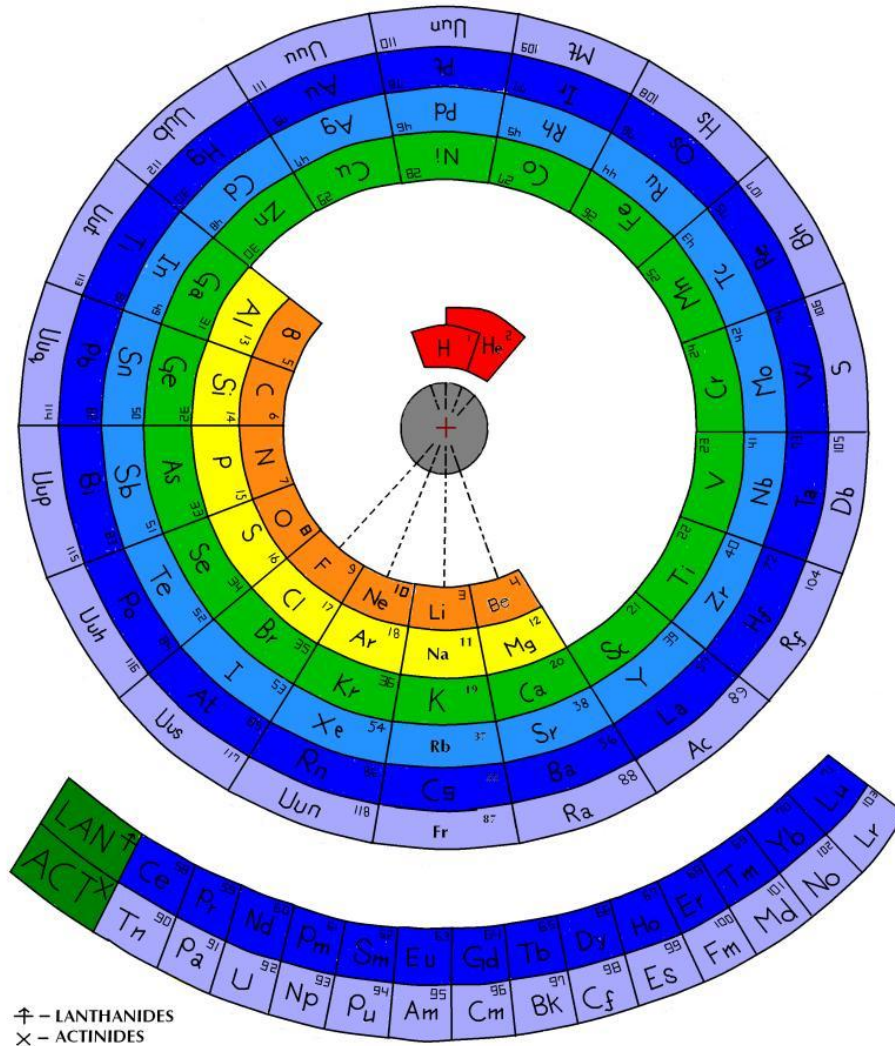
مرکز دانلود رایگان  
مهندسی متالورژی و مواد

[www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com)



بسم الله الرحمن الرحيم

## تأثیر عناصر آلیاژی در چدن و فولاد



کربن

کربن مهمترین و موثرترین عنصر آلیاژی در فولادها می باشد و بالاترین تاثیر را در ساختار آن دارد. هر فولاد آلیاژ شده علاوه بر کربن عناصر آلیاژی دیگری نظیر سیلیسیم - منگنز-فسفر و گوگرد را به همراه خواهد داشت بطوریکه این عناصر به شکلی ناخواسته به هنگام فرایند تولید در فولاد باقی خواهند ماند. اضافه کردن عناصر آلیاژی برای بدست آوردن نتایج مشخص و منحصر بفرد و افزایش کنترل شده منگنز و سیلیسیم در فولاد ، فولاد آلیاژی را بوجود خواهد آورد. با افزایش میزان کربن استحکام و سختی پذیری فولاد بیشتر میشود اما چکش خواری و قابلیت جوشکاری و ماشینکاری (با استفاده از ماشینهای برش) کاهش می

یابد. این عنصر عملاً هیچ تاثیری بر مقاومت خوردگی در آب، اسید و گازهای گرم ندارد.

#### منگنز

منگنز سرعت خنک شدن بحرانی را به شدت کم می کند به همین دلیل سختی پذیری و نقطه تسلیم و استحکام نهایی را افزایش می دهد. با اضافه نمودن منگنز تاثیرات مطلوبی در قابلیت های آهنگری و جوشکاری فولاد بوجود می آید و بطور قابل ملاحظه ای عمق سختی فولادها را بیشتر می کند. مهمترین خاصیت منگنز ترکیب با گوگرد بوده و از ترکیب شدن گوگرد با آهن جلوگیری می نماید .

#### سیلیسیوم

سیلیس را می توان در ترکیب همه فولادها دید زیرا سیلیس اکسیژن زدای قوی است . استحکام فریت را افزایش می دهد و سختی پذیری را زیاد می کند. حضور سیلیس ، راسب شدن گرافیت را تشویق میکند و مقاومت سایشی را افزایش می دهد . به علت افزایش استحکام تسلیم ، عنصر اصلی در فولادهای فنر است. وجود سیلیس در فولادهای الکتریکی که جهت گیری دانه ها مطرح است بسیار مهم است. در مقادیر بالای سیلیس ، سختی پذیری و استحکام فولاد افزایش می یابد ولی این افزایش همراه با کاهش داکتیلیتی و انرژی ضربه است .

#### فسفر

مقدار فسفر در فولاد نباید از ۵٪ تجاوز کند. افزایش بیش از حد فسفر باعث دانه درشت شدن فولاد می گردد. فسفر خاصیت ماشینکاری، براده برداری، سیالیت مذاب، شکنندگی در حالت سرد و استحکام در حالت گرم را افزایش داده و مقاومت در برابر ضربه را کاهش می دهد .

#### گوگرد

نقطه تسلیم و مقاومت در برابر کشش فولاد را تغییر نمی دهد. گوگرد در ترکیب هر فولادی وجود دارد و به علت کم بودن نقطه جوش ، در مذاب پایداری زیادی ندارد. مشکل اصلی فولادسازان مربوط به پدیده ترک برداری گرم یا سرخ شکنندگی است. لذا سعی می کنند تا حد امکان در صد گوگرد را کمتر کنند . در فولادهای خوش تراش وجود گوگرد عامل مهمی است. در واقع ، یکی از راههای افزایش قابلیت ماشینکاری ، اضافه کردن گوگرد به ترکیب فولاد است. وقتی ابزار برش روی سطح قطعه کار می کنند، به علت وجود سولفات منگنز طول پلیسه ها کوتاهتر می شوند و نقش روانکار را نیز ایفا می کنند و در نتیجه صافی سطح بیشتر می شود .

#### کروم

کروم عنصر اصلی در فولادهای زنگ نزن است. علل اصلی در افزودن کروم به ترکیب فولاد افزایش سختی پذیری فولاد حفظ استحکام و سختی فولاد در دماهای بالا و شرایط کاری و افزایش مقاومت خوردگی در محیط های اکسید کننده دانست. کروم تمایل زیادی به ترکیب با کربن دارد و لذا ذرات کاربیدی همان کاربیدهای کمپلکس آهن-کروم هستند. کروم با اکسیژن ترکیب شده و ترکیب دیرگداز غیرفلزی اکسید کروم تشکیل می دهد که نقش فیلم سطحی محافظ در سطح فولاد را بازی می کند. کروم فریت زای بسیار قوی است. در حدود ۱۲٪ کروم در ترکیب فولاد باعث محدود شدن فاز آستنیت در ریزساختار می شود. با افزایش درصد کروم، مقاومت خوردگی فولاد زیاد می شود و همچنین در دماهای بالا مقاومت به اکسیداسیون آنها زیاد خواهد شد

#### نیکل

نیکل به عنوان عنصر آلیاژی در فولاد به همراه کروم استفاده می شود. نیکل عنصر آستنیت زا است و هیچگونه تاثیری در تشکیل کاربید و اکسید ندارد به علت اینکه تمایل به ترکیب آن با کربن و اکسیژن کمتر از آهن است. نیکل سختی پذیری فولاد را افزایش می دهد. در فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۷ تا ۲۰ درصد نیکل وجود دارد. در این فولادها برای خنثی کردن اثر فریت زایی کروم از نیکل بهره می گیرند. نیکل خودبخود باعث افزایش مقاومت خوردگی می شود. در درصدهای بالا باعث آستنیتی شدن فولادهای مقاوم در برابر مواد شیمیایی تا دماهای خیلی زیاد می شود .

#### مولیبدن

این عنصر به طور معمول با عناصر دیگر آلیاژ می شود. در فولاد کروم-نیکل دار و فولاد منگنز دار سبب ریز دانه سازی می شود. باعث بهبود قابلیت جوشکاری می شود و نقطه تسلیم و استحکام نهایی را بالا می برد. با ازدیاد درصد مولیبدن جوش پذیری کاهش می یابد. و سازنده مسلم فاز کاربید است و در فولادهای تند بر خواص برشکاری را بهبود می بخشد. مقاومت خوردگی را بالا می برد . در فولادهای ضد زنگ مقاومت در برابر خوردگی را به میزان قابل توجهی افزایش می دهد. به دلیل ایجاد نیترو در برخی از فولاد های میکرو آلیاژی مورد استفاده قرار می گیرد .

#### کبالت

کبالت موجب بهبود استحکام مکانیکی فولاد در برابر دمای بالا می شود. لذا به عنوان یک عنصر آلیاژی در فولادهای ابزار گرم کار مورد استفاده قرار می گیرد .

#### تنگستن

تنگستن کاربرد زیادی در تولید فولادهای ابزار داشته و اخیرا در تولید فولادهای پرآلیاژی مقاوم در برابر حرارت نیز استفاده می شوند. سختی پذیری را افزایش می دهد و کاربیدهایی مقاوم در برابر سایش ایجاد کرده و بالاخص از افت سختی در دماهای بالا که امری رایج در نوک ابزار است جلوگیری می کند

#### وانادیوم

با افزودن وانادیم به فولادهای ابزار و آلیاژی سختی پذیری آنها افزایش یافته و کاربیدهایی کمپلکس در ریزساختار تشکیل می شود .

اخیرا وانادیم به عنوان عنصر آلیاژی در فولادهای کربنی میکروآلیاژی استفاده می شود. و تنها به مقدار کمی کافی است تا افزایش قابل توجهی در استحکام فولاد بدست آید .

این عنصر آلیاژی به دلیل خواص کاربید سازی و کوچک نمودن ریز ساختار به همراه نیوبیم و تیتانیوم در فولادهای میکرو آلیاژی مورد استفاده قرار می گیرد. در فولاد های میکرو آلیاژی عناصر آلیاژی بیشتر از ۲۵ درصد نمی باشند. این عناصر به تنهایی و یا به صورت ترکیبی باعث به وجود آمدن نیترات کربن در ریز ساختار شده و مقاومت فولاد را بالا می برند .

#### تیتانیوم

همانند وانادیوم دارای خاصیت کوچک نمودن ریز ساختار می باشد ولی ای خاصیت آن نسبت به وانادیوم بیشتر است. به عنوان یک عنصر میکرو آلیاژی در فولادهای میکرو آلیاژی مورد استفاده قرار می گیرد. در فولاد های ضد زنگ نیز برای از بین بردن اثر مخرب کاربید کروم مورد استفاده قرار می گیرد .

#### نیوبیم

این عنصر قوی ترین خاصیت کوچک نمودن ریز ساختار در فولادهای میکرو آلیاژی را دارا می باشد . در فولاد های ضد زنگ اثری مشابه تیتانیوم را داشته و به تنهایی و یا به همراه تیتانیوم مورد استفاده قرار می گیرد .

#### آلومینیوم

یکی از قویترین اکسیژن زدها و نیتروژن زدهاست. بر اساس نتایج بدست آمده تاثیر بسیار زیادی برای مقابله با کرنشهای ناشی از پیری دارد. در ترکیب با نیتروژن تشکیل نیتروور سخت می دهد که باعث افزایش مقاومت در برابر پوسته ای شدن می شود به همین دلیل به عنوان عنصری آلیاژس برای مقاومت حرارتی فولادها بکار می رود

#### قلع

نقطه تسلیم و مقاومت در برابر کشش فولاد را تغییر نمی دهد ولی در نورد سرد مشکل زا می باشد زیرا افزایش این عنصر در فولاد باعث ایجاد ترکیباتی میشود که دمای ذوب آنها پایین می باشد .

#### مس

مس بعنوان یک فلز آلیاژی به تعداد بسیار کمی از فولادها اضافه می شود. زیرا این فلز به زیرلایه های سطحی فولاد تمرکز یافته و در فرآیند شکل دهی گرم با نفوذ به مرز دانه ها ، حساسیت سطحی را در فولادها بوجود می آورد. لذا به عنوان یک فلز مخرب در فولادها محسوب می گردد. به واسطه حضور مس نقطه تسلیم و نسبت نقطه تسلیم به استحکام نهایی افزایش می یابد

#### سرب

باعث کم شدن خاصیت نورد در فولاد می شود. کیفیت سطحی فولاد را کم می کند . به دلیل افزایش خاصیت شکل گیری فولاد در فولاد های اتومات بیشتر مورد استفاده می باشد .

#### ازت

یک عنصر مخرب می باشد. ازت موجب شکنندگی فولاد شده و خواص خم شدگی آن را تخریب می نماید .

#### هیدروژن

هیدروژن یک عنصر مخرب در فولاد تلقی می گردد. زیرا موجب تردی و شکنندگی فولاد می گردد. مخرب تر از نیتروژن بوده و انعطاف پذیری را کم می کند

#### تاثیر وانادیوم در فولادها

وانادیم فلز نرم و داکتیل به رنگ خاکستری نقره ای رنگ است که مقاومت خوردگی خوبی در برابر بازها و اسیدسولفوریک و هیدروکلریک دارد. وانادیم به راحتی در دمای K 933 اکسید می شود. این فلز از استحکام ساختاری خوبی برخوردار است و در صنایع هسته ای کاربرد فراوانی دارد.

وانادیم ابتدا در سال 1801 در مکزیکوسیتی توسط یک ————— انی شناس اسپانیایی به نام آندرس مانول دل ریو (Andres Manuel del Rio) کشف شد. وی آن را سرب قهوه ای نامید (آنچه که امروزه بنام وانادینیت مشهور است). سپس در طی آزمایش هایی که انجام می داد، رنگ آن ایشان را به یاد کروم می انداخت از اینرو آن را پان کروم نامید. او بعد آن را اریترونیوم نام نهاد زیرا نمک های آن هنگام حرارت دهی به رنگ قرمز در می آمد. البته شیمیدان فرانسوی به نام هیپولیت ویکتور کالت دستکوتلس (Hippolyte Victor Collet-Descotils) به اشتباه اعلان کرد که عنصر جدیدی که توسط دل ریو کشف شده است، تنها کروم ناخالص است. دل ریو نیز به این فکر افتاد که کشفش اشتباه بوده و نظر او را قبول کرد.

در سال 1831، دانشمند سوئدی هنگام انجام تحقیقاتی بر روی سنگ آهن، وانادیم را در حالت اکسیدی دوباره کشف نمود و در همان سال، فریدریش وهلر تحقیقات دل ریو را تایید کرد. بعد از این بود که جورج ویلیام فیدرستونهایف (George William Featherstomhaugh) پیشنهاد کرد که اسم این فلز ریونیوم باشد که هیچ وقت عملی نشد.

وانادیم فلز در سال 1867 توسط هنری اینفیلد (Henry Einfield) از احیاء کلرید وانادیم (VCl<sub>3</sub>) (III) بهمراه هیدروژن بدست آمد. واژه وانادیم از Vanadis گرفته شده است که یکی از الهه ها در خدانشناسی اسکاندیناوی بود زیرا این عنصر دارای ترکیبات رنگی زیبایی بود.

در زیست شناسی، وانادیم یکی از اجزای اصلی برخی از آنزیم ها بالاخص نیتروژناز وانادیم است که بوسیله بعضی از میکروارگان های تثبیت کننده نیتروژن استفاده می شود. موش صحرایی و جوجه ها به مقدار کمی وانادیم نیاز دارند و فقدان آن باعث کاهش رشد و تولید مثل آنها می شود.

در ژاپن، از پنتا اکسید وانادیم V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> به عنوان مکمل سلامتی در آبهای معدنی استفاده می شود. منبع این آب نوشیدنی از دامنه های کوه فوجی است. میزان پنتا اکسید وانادیم در آب های معدنی از 80 تا 130 میکروگرم در هر لیتر متغیر است. این میزان پنتا اکسید وانادیم در کاهش ابتلا به بیماری هایی هم چون دیابت، اگزما و چاقی بسیار موثر است.

با افزودن وانادیم به فولادهای ابزار و آلیاژی سختی پذیری آنها افزایش یافته و کاربردهای کمپلکس در ریزساختار تشکیل می شود. اعتقاد بر این بود که وجود ذرات کاربیدی برای افزایش سختی است در حالیکه مقاومت به نرم شدن در حین برگشت را بالا می برد. درصد وانادیم در این فولادها 0.10-0.15٪ بوده که در فولادهای تند بر در ابزار برش تا 1 درصد نیز می رسد.

اخیرا وانادیم به عنوان عنصر آلیاژی در فولادهای HSLA و کربنی میکروآلیاژی استفاده می شود. و تنها به مقدار کمی در حدود 0.05 تا 0.10 درصد کافی است تا افزایش قابل توجهی در استحکام فولاد بدست آید. وزن اتمی وانادیم 51 و نقطه ذوب C 1900 دارد. ساختار کریستالی وانادیم bcc بوده و در ریزساختار فریت زاست و دمای کوری را افزایش می دهد. و منطقه پایداری آستنیت را می کاهشد. وانادیم تمایل متوسطی به ترکیب با اکسیژن داشته ولی تمایل ترکیب با نیتروژن آن قوی است و به ترکیب با کربن تمایل بسیار قوی دارد. در دماهای بالا AC<sub>3</sub>، وانادیم از درشت شدن دانه های آستنیت جلوگیری می کند. وانادیم، مقاومت به سایش و حفظ دندانه های تیز و استحکام در دماهای بالا را افزایش میدهد. هم چنین بخاطر ریز کردن دانه های آستنیت، قابلیت جوشکاری را بهبود بخشیده و نیز مقاومت در برابر هیدروژن با فشار بالا را افزایش می دهد.

ذرات نیتريد وانادیم باید تا دمای C 1350 حرارت داده شوند. برای استحکام گردانی فولادهای آلیاژی شده با وانادیم، می توان از نورد کنترل شده یا عملیات حرارتی استفاده کرد. گاهی از ترکیب هر دو روش می توان استفاده کرد.

به خاطر تاثیر وانادیم بر مورفولوژی کاربیدها، سختی فولادهای مارتنزیتی را افزایش می دهد. این عنصر بیشتر در فولادهای زنگ نزن سختی پذیر بکار می رود.

وانادیم از طریق تشکیل محلول جامد، فریت را تا حد متوسط استحکام گردانی می کند و با حل شدن در آستنیت، سختی پذیری را شدیداً می افزایشد. در ترکیب فولاد با کربن واکنش داده و کاربید وانادیم V<sub>4</sub>C<sub>3</sub> تشکیل می دهد. این کاربید در فریت بطور جزئی حل می شود ولی در آستنیت تا حد قابل توجهی حل می شود. وانادیم موجود در فولاد سبب ریز شدن دانه ها می شود. کاربیدها هم می توانند در حین ذوب رسوب کنند و هم امکان دارد در طی عملیات حرارتی بعد از استحاله رسوب کند. تمایل به ریز کردن ساختار از طرف این عنصر موجب شده که در ساختار های کاربیدی ریز در فولادهای هایپریوتکتوئید استفاده شود.

وانادیم اکسیژن زدای نسبتاً قوی بوده ولی نیتريد آن بسیار پایدار است از اینرو، به ترکیب نیتروآلوی ها اضافه می شود تا پایدار بودن نیتريد آن باعث شود تا خواص لایه سطحی افزایش یابد.

از آنجائیکه وانادیم استحکام فریت را از طریق تشکیل محلول جامد افزایش می دهد، از اینرو به ترکیب فولادهای آلیاژی کم کربن اضافه می شود تا استحکام کششی آنها بدون هیچگونه کاهش در داکتیلیتی افزایش یافته و این موجب گشته تا در کاربردهای مهندسی استفاده شود. وانادیم درصد کربن یوتکتوئید را می کاهش دهد. به عنوان مثال، وجود 1٪ وانادیم، درصد کربن یوتکتوئید را تا 0.6٪ می کاهش دهد.

برای چقرمه کردن و اصلاح اندازه دانه فولادهای کربنی متوسط، درصد وانادیم در محدوده 0.1-0.3٪ کافی است. سختی پذیری لازم نیز از حضور کاربیدهای منگنز و آهن در ریزساختار بدست می آید. فولاد کربنی 0.5 V 0.15% Mn, 0.8% C برای قطعات بزرگ فورج، قطعات لکوموتیو، میل لنگ ها و قطعات مشابه که نیاز به استحکام کششی و چقرمگی دارند، مناسب است. فولاد کربنی ساده با سخت گردانی سطحی حاوی 0.12-0.15% V 0.10% Mn, 0.35-1.0% C قابلیت جوشکاری خوبی داشته و در سیم جوش های گازی بکار می رود. فنر ها از فولاد 0.1% V 1% Mn, 0.7% C که در شرایط کوئنچ و تمپر شده استحکام کششی بالایی دارند، نیز ساخته می شوند. فولاد ریختگی یاتاقانها معمولاً شامل 0.35% C, 0.85% V 0.15% Si, 0.35% Mn می باشد.

فولادهای با درصد کربن بالا (0.2-0.5% C) 0.60-1.4% Mn, 0.25-0.5% V قبل از استفاده در ابزارها و قالب های چکش و مته ها کوئنچ و تمپر می شوند. بنابر این می توان به استحکام کششی و خواص ضربه ای بالاتری دست یافت.

مقاومت سایشی فولادهای ابزار با افزودن وانادیم و تشکیل کاربیدهای وانادیم پایدار افزایش می یابد. در گروه فولادهای ابزار کم آلیاژ، دو نوع فولادهای کروم-وانادیم وجود دارند: یکی دارای ترکیب 0.1-0.2% Cr, 0.6-1.2% V، دیگری دارای منگنز بالایی تا 0.4-0.6% Mn می باشد. فولاد با منگنز کم در آب کوئنچ می شود ولی فولاد دیگر با درصد منگنز بالاتر در روغن کوئنچ می شود.

برخی از انواع معینی از فولادهای پرکربن کم تنگستن دارای وانادیم می باشند. این نوع فولادهای تنگستن دار حاوی 0.10-0.25% C 1.15-1.25% Mn, 0.15-0.35% W, 1.75-2.5% V بوده و در ابزارهای برش و قالبهای شکل دهی سرد و ابزار تمام کاری برای آلیاژهای غیرآهنی کاربرد فراوانی دارند.

در فولادهای منگنز دار (0.85-0.95% Mn) 1.5-1.75% C که در روغن کوئنچ می شود، درصد کمی از وانادیم (0.10-0.25٪) وجود دارد که از رشد دانه جلوگیری می کند. نوع دیگری از این نوع فولادها، که در قالبها بکار می رود و قبل از کوئنچ ماشینکاری می شوند، درصد کمی کروم دارند. در هنگام تولید مقاطع بزرگ، بجای کروم از مولیبدن استفاده می شود و این باعث می شود سختی پذیری افزایش یافته و اثر اصلاح دانه ای رخ دهد.

فولادهای ابزار کربن-وانادیم، کروم-نیکل-وانادیم و کروم-نیکل-مولیبدن-وانادیم همگی تا 0.15 درصد وانادیم دارند. مقدار انرژی ضربه خوبشان، آنها را برای قالبهای چکش و اینسرتی ها مناسب کرده است.

برخی از فولادهای پرکربن پر کروم (فولادهای (Wartle) مقداری وانادیم نیز دارند که مقاومت سایشی آنها را افزوده و دمای درشت شدن دانه ها را تا 1030 C بالا می برد. نوعی از این فولاد، 0.75-1.0% C 2% Cr, 12-14% V بوده و نوع دیگر 0.6-1.0٪ کبالت دارد. فولاد گرم کار تنگستن دار عموماً 0.3-0.6 درصد وانادیم دارد که استحکام گرم و مقاومت سایشی را می

افزاید. فولاد قالب دیگر ، فولاد 7-7-1 ، فولاد تنگستن-کروم-سیلیس می باشد که دارای 0.3-0.6 V % می باشد و اندازه دانه را اصلاح می کند. فولاد تنگستن-کروم-وانادیم 18-4-1 شامل 0.6-1.2 درصد وانادیم است. فولادهایی همچون 6-6-2 (فولادهای تنگستن-مولیبدن-وانادیم) تولید می شوند و فولادهای تندبر Mo-W دارای 4٪ وانادیم هستند. درصد کربن این فولادها معمولاً با افزایش درصد وانادیم بیشتر می شود و در نهایت در یک مقدار مشخصی از کربن و وانادیم مقدار سختی کاهش می یابد. از اینرو اکثر فولادهای با وانادیم زیاد دارای کربن پایین می باشند و درصد قابل توجهی فریت دارند و در واقع با افزایش درصد وانادیم فورج آنها مثل فولادهای کربنی انجام خواهد شد. در کربن 0.7 % متداول است که درصد وانادیم 1.0٪ باشد و البته برای رسیدن به ترکیبی از فورج پذیری و قابلیت برشکاری ، بهتر است به ازای افزایش 1٪ وانادیم ، 0.2% کربن زیادتر شود. وانادیم هم چنین می تواند جایگزین تنگستن در فولادهای تندبر شود و مثل آن فریت زای قوی است. عموماً اخیراً درصد تنگستن از 14٪ کمتر بوده ولی درصد وانادیم برابر 2٪ و بالاتر می تواند باشد. نوعی از این فولاد  $4.5\%V, 4\%Cr, 14\%W$  خواص برشکاری بسیار خوبی داشته و در مته ها بکار می رود.

وانادیم در فولادهای مارتنزیتی مقاوم به خزش نیز کاربرد دارد. کاربرد نقش اصلی در مکانیسم رسوب سازی ایفاء می کند .

نظیر فولادهای با ترکیب زیر:

$0.1\%C, 11\%Cr, 0.75\%Mo, 0.4\%Nb, 0.15-0.25\%V$ .

وانادیم در چدن کاربرد زای بسیار قوی بوده و از گرافیت زایی جلوگیری می کند و پرلیت را پایدار می سازد. وانادیم خصوصاً در مقاطع نازک نقش مبرد chiller را بازی می کند.

افزودن 0.10-0.50 V % به چدن سمنتیت را پایدار کرده ، توزیع ورق های گرافیت را یکنواخت و اصلاح می کند. اندازه دانه زمینه را بهبود می دهد و ساختار های سوربیتی را ارتقاء می دهد. لاینر های موتورهای دیـزل که از چدن ساخته می شود دارای 0.1-0.2 V % هستند تا سختی و استحکام و مقاومت سایشی را افزایش دهد. برای بهبود قابلیت ماشینکاری چدن های پرآلیاژی ممکن است تا 0.12٪ وانادیم نیز اضافه شود.

از آنجاییکه وانادیم کاربرد زای بوده و در حضور مولیبدن مناطق حاوی کاربیدهای کمپلکس را تشکیل می دهد و در نتیجه زمینه را از مولیبدن خالی می کند و بر ساختار سوزنی تاثیر منفی دارد، فلذا در ترکیب چدن های سوزنی عنصر نامطلوبی محسوب می شود Vantit. چدن خام وانادیم-تیتانیوم بوده و حاوی  $0.5-0.7\%V, 0.3-0.5\%Ti, C$  می باشد.

#### تاثیر نیوبیم

نیوبیم فلز داکتیل و خاکستری روشن است که وقتی به مدت طولانی در دمای اتاق در تماس با هوا قرار گیرد، به رنگ متمایل به آبی در می آید. برای نگهداری این فلز حتی در دماهای متوسط باید از محیط محافظ استفاده شود. اکسیداسیون این فلز در هوا از دمای 200 C آغاز می شود.

نیوبیم مصارف متعددی ارد. در فولادهای زنگ نزن و بسیاری از آلیاژها غیر آهنی استفاده می شود. مقدار قابل ملاحظه ای از نیوبیم به صورت فرونیوبیم و یا نیوبیم-نیکل در سوپرآلیاژهای پایه آهن، نیکل و کبالت در قطعات موتور جت و تجهیزات احتراق استفاده می شود. هم چنین نیوبیم در دماهای زیر صفر در ابررساناها بکار می رود.

نیوبیم به معنای دختر تانتالوس از Niobe گرفته شده است که در سال 1801 توسط چارلز هچت (Charles Hatchett) کشف شد. هچت ، نیوبیم را از سنگ معدن کلمبیتی بدست آورد که در سال 1750 توسط جان وین تروپ (John Winthrop) برای



وی ارسال شده بود. بین دو عنصر نیوبیوم و تانتالوم اختلافهای گمراه کننده ای وجود دارد، و از طرفی این اختلافها تا 1846 کشف نشده بود، در این سال بود که هنریخت روز (Heinrich Rose) و جین چارلز گالی سارد مارگینت (Jean Charles Galisard de Marignac) دوباره این عنصر را کشف کردند ولی ایشان از کارهای هچت اطلاعی نداشتند. از اینرو نام متفاوت نیوبیوم بر روی آن گذاشتند. در سال 1846 بود که کریستن بلومسترن (Cristian Blomstrand) توانست با احیاء کلرید نیوبیوم بوسیله حرارت دادن در اتمسفر هیدروژن به نیوبیوم خالص دست یابد.

نیوبیوم یا همان کلمبیوم در سالهای اخیر به عنوان عنصر پایدار کننده کاربرد در فولادهای زنگ نزن و عنصر استحکام زا در آلیاژهای پایه کبالت و نیکل در دماهای بالا محسوب می شود. وزن اتمی آن 93 با نقطه ذوب C 2468 است. ساختار کریستالی bcc است و در فولاد فریت زای قوی است. تمایل ترکیب نیوبیوم با کربن زیاد بوده ولی نسبت به اکسیژن و نیتروژن تمایل متوسطی دارد. با افزودن نیوبیوم در فولاد، کاربرد نیوبیوم سریعاً تشکیل می شود. با رسوب کاربرد نیوبیوم و ذرات کربونیتريدی در زمینه فریتی، استحکام افزایش خواهد یافت.

در فولادهای آستنیتی، برای بهبود مقاومت خوردگی بین دانه ای و افزایش خواص مکانیکی در دماهای بالا استفاده می شود. در فولادهای مارتنزیتی، نیوبیوم سختی را کم کرده و مقاومت به تمپر را افزایش میدهد. مقدار نیوبیوم مورد نیاز در فولادهای کربنی و کم آلیاژی کم بوده و در حدود 0.05٪ نیوبیوم، افزایش قابل توجهی در استحکام فولاد را در پی دارد. علاوه بر آن، اگر میزان آن به همراه سایر عناصر کنترل شود، اندازه دانه فریت اصلاح شده و چقرمگی در دماهای پایین اصلاح خواهد شد. اغلب این عناصر همراه نیتروژن و وانادیم به فولاد اضافه می شود. این عنصر تشکیل رسوبات کمپلکس کربونیتريد و وانادیم و نیوبیوم می دهند. در برخی فولادهای HSLA نیوبیوم تا 0.15٪ وجود دارد. اگر درصد نیوبیوم از 0.1 فراتر رود، مشکل ترک سرد و افت چقرمگی منطقه تحت تاثیر جوش در جوشکاری را خواهیم داشت. رفتار انحلال و رسوب ترکیبات نیوبیوم با وانادیم متفاوت است. در سرد کردن آهسته آستنیت از دمای بالا، همزمان با انحلال نیوبیوم، کاربرد نیوبیوم در دماهای بالای C 1200 رسوب می کند. به دلیل رسوب این کاربرد در دماهای بالا، امکان درشت شدن ذرات وجود دارد که تاثیر منفی بر استحکام دارد.

همانطوریکه در بالا ذکر شد، فولادهای نیوبیوم دار بخاطر تشکیل ترکیب بین فلزی قابل حل  $Fe_3Nb_2$  دارای استحکام بالایی می باشند. این فولادها دانه ریز بوده و در نتیجه خواص انرژی ضربه در دماهای پایین بهتری دارند. مزیت دیگر استفاده از نیوبیوم در ترکیب فولادها، عدم حضور آخالهای اکسیدی نامطلوب در ریزساختار می باشد. فولادهای دانه ریز نیوبیوم دار، در مواردی استفاده می شوند که کربوریزه می شوند. این فولادها به دماهای بالا احتیاج دارند تا دانه هایشان رشد کنند فلذا در منطقه دمایی سخت گردانی، ریزبودن دانه ها حفظ خواهد شد.

با افزودن نیوبیوم به ترکیب فولادهای کربنی متوسط نیمه کشته، استحکام تسلیم 9 ton/in<sup>2</sup> و استحکام کششی 7 ton/in<sup>2</sup> افزایش می یابند. این ورقها در تولید ورقها کاربرد وسیعی پیدا کرده اند. این نوع ورق ها کار گرم شده و در خطوط نفت و سازه های سبک استفاده می شوند.

با رسوب ترکیب بین فلزی  $Fe_3Nb_2$  از دمای انحلال و به دنبال آن پیر سازی در دمای 500-650 C، نیوبیوم استحکام خزشی فولادهای بسیار کم کربن را می افزاید. میزان افزودن نیوبیوم برای بهبود استحکام خزشی متغیر بوده ولی مرسوم است که حداقل 25 برابر درصد کربن اضافه شود. با کاهش نسبت نیوبیوم به کربن، استحکام خزشی شدیداً افت می کند و برای دستیابی به

استحکام خزشی خوب، باید درصد کربن در حد پایین نگه داشته شده باشد. اما اگر در دمای اتاق، استحکام مقدم بر استحکام خزشی باشد، نسبت نیوبیوم به کربن می تواند برابر 8:1 باشد.

در سیستم آلیاژی آهن-کربن-نیوبیوم، با افزایش درصد Nb درصد فاز آستنیت در ریزساختار شدیداً کاهش می یابد. فلذا در این نوع فولادها، برای آستینه کردن بایستی درصد کربن فولاد کمتر باشد.

افزودن نیوبیوم سختی پذیری فولاد را می کاهد چرا که با تشکیل کاربید نیوبیوم، غلظت کربن کاهش می یابد. از طرفی اگر نیوبیوم در محلول جامد باشد، از انجام استحاله جلوگیری می کند. بنابراین دمای آستنیته کردن و زمان نگهداری مستقیماً مربوط به سختی پذیری فولاد دارد. کاربید نیوبیوم سختی پذیری را می کاهد و از اینرو بیشتر به ترکیب فولادهای به سختی پذیری نسبتاً بالا که بایستی جوشکاری شوند اضافه می شود تا از ترک برداری زیر جوش جلوگیری کند.

در دمای بالای C 400، نیوبیومی که در فولادهای نیتريدی وجود دارد، با نیتروژن واکنش می دهد. کاربید نیوبیوم و نیوبیومی که بیش از حد انحلال است در تشکیل نیتريد شرکت نمی کند و فقط نیوبیوم موجود در محلول جامد در تشکیل نیتريد شرکت می کند. در فولادهای کربنی ساده، نیوبیوم سختی سطحی را می افزاید. فولادهای با 4-6 درصد کروم در هوا سخت می شوند و به زمان آنیل زیادی نیاز دارند و در هنگام جوشکاری ترک بر می دارند. این مشکل در این نوع فولادها را می توان با کاهش درصد کربن تا حد زیادی حل کرد. البته این مشکل را با اضافه کردن تیتانیوم، آلومینوم و نیوبیوم نیز می توان حل کرد. که در این میان Nb ترجیح داده می شود چرا که آخالهای مضر در ترکیب را تشکیل نمی شوند. میزان نیوبیومی که به ترکیب فولاد اضافه می شود، 7-10 برابر درصد کربن است. فولادهای نیوبیوم دار کار گرم شده با سرد کردن از دمای C 1000 هم چنان نرم می مانند. ولی به علت انحلال جزئی کاربیدهای نیوبیوم ممکن است بمقدار جزئی سخت گردانی شوند. برای آنیل مجدد کافی است تا دمای 800 C حرارت داده و سپس در هوا سرد شوند.

برای کاهش تمایل به هوا سختی فولادهای با Cr 18-16% درصدی از نیوبیوم به ترکیب آنها اضافه می شود. اینکار عملیات حرارتی را آسان کرده و داکتیلیتی و جوشکاری را بهبود می بخشد. برای این منظور 1 Nb% اضافه می شود (10 برابر درصد کربن) افزوده می شود که از لحاظ هزینه گران شدن فولاد را در پی دارد و از اینرو در مصارف خاص استفاده می شود.

بعد از حرارت دادن فولاد 8/18 از منطقه دمایی C 900-400 خوردگی بین دانه ای رخ میدهد. این کاهش موضعی در مقاومت خوردگی ناشی از این واقعیت است که اکثر این فولادها دارای درصد کربن بالایی بوده که سبب میشود با سرد کردن در هوا کاربید رسوب کند. عموماً اعتقاد بر اینست که علت خوردگی بین دانه ای تخلیه محلول جامد از کروم در مجاورت مرز دانه است. ولی تحقیقات اخیر نشان داده است که کاربیدهای کروم غیرتعادلی با مقاومت خوردگی کمتر تشکیل می شود و نیازی به تخلیه کروم نیست. افزودن عناصر کاربیدزای قوی مثل Nb و Ti موجب رسوب و تشکیل کاربیدهای مرجح شده و از خوردگی بین دانه ای جلوگیری می کند. پایدارسازی معمولاً تحت تاثیر نیوبیوم و یا تیتانیوم می باشد. اگر مقاومت در برابر اسید نیتريك قوی نیاز باشد، نیوبیوم بهتر است. اگر فولاد تمیز لازم باشد، پایدار سازی با تیتانیوم چندان خوب نیست زیرا آخالهای اکسید تیتانیوم در فولادهای عملیات حرارتی شونده وجود داشته و از طرفی تیتانیوم در حین جوشکاری اکسید می شود.

اثر نیوبیوم بر استحکام خزشی بیشتر از تیتانیوم بوده و در تولید فولادهای آستنیتی دمای بالا کاربرد وسیعی یافته است. نسبت Nb/C باید 10:1 باشد تا از پایداری کامل اطمینان پیدا کرد. اما اگر شرایط چندان بحرانی نباشد، می توان از نسبتهای پایین نیز استفاده کرد.

در فولادهای زنگ نزن، نیویوم 8 تا 10 برابر درصد کربن بوده و تاثیر قابل توجهی بر استحکام کششی، داکتیلیتی و یا چقرمگی ندارد. در شمش های بزرگ جدایش کاربیدهای نیویوم دور از احتمال نیست و کاهش داکتیلیتی در مرکز قطعات فورج را در پی دارد. حتی اگر از نسبت زیاد Nb/C استفاده شود، نیز داکتیلیتی کاهش می یابد.

معمولا در فولادهای زنگ نزن 8/18 که با نیویوم پایدار شده است، برای کاهش نرخ کارسختی، درصد بالاتری از 8٪ نیکل وجود دارد. این قاعده برای آسانی کار گرم بدلیل گسترش فریت حاصل از افزودن نیویوم لازم بنظر می رسد.

مقادیر کم تانتالوم اثری بر خواص مکانیکی فولادهای زنگ نزن 8/18 پایدار شده با نیویوم ندارد. درصدی از تانتالوم می تواند جایگزین مقدار کمی از نیویوم شود بدون آنکه بر استحکام و داکتیلیتی اثر منفی داشته باشد. این از جهاتی بهتر نیز است چرا که اکثر محصولات نیویوم دارای تانتالوم می باشند و بایستی بخاطر داشت که تانتالوم فقط یک دوم تاثیر نیویوم را دارد. اگر نسبت نیویوم به تانتالوم در فروآلیاژ از 8:1 کمتر باشد، باید نسبت مجموع تانتالوم و نیویوم به کربن 10:1 باشد. به آلیاژ مغناطیس دایم نوع AlNi نیویوم اضافه می شود و مغناطیس های دایم AlcomaxIII و AlcomaxIV به ترتیب 0.7 و 2.4 درصد نیویوم دارند. هر دو این آلیاژها از Alcomax که نیویوم ندارد، خواص مغناطیسی بهتری دارند.

نیویوم معمولا به چدنها اضافه نمی شود ولی معمولا میزان کمی بخاطر قراضه های حاوی نیویوم در ترکیب آنها وجود دارد.

#### تاثیر مولیبدن

مولیبدن خالص به رنگ سفید نقره ای بوده و نسبتا نرم بوده و جزو فلزات با بالاترین نقطه ذوب است. بیش از دو سوم مولیبدن در تولید آلیاژها استفاده می شوند.

مولیبدن از واژه یونانی Molybdos به معنای شبیه سرب گرفته شده است و در طبیعت به شکل آزاد پیدا نمی شود. ترکیبات این عنصر که در طبیعت دیده می شدند، با عناصر دیگر مثل کربن و یا سرب به اشتباه گرفته می شد. در سال 1778، کارل ویلهلم شیل (Carl Wilhelm Scheele) توانست روشی برای جداسازی مولیبدن از گرافیت و سرب و جدا کردن آن از اکسید فلز از مولیبدنیت را تعیین نماید. در سال 1782، هلم (Hjelm) با احیا توسط کربن توانست که ناخالصی ها را از سنگ معدن جدا سازد.

مولیبدن در حیات تمام انواع ارگان ها نقش دارد. این فلز در دو گروه آنزیمی به نامهای نیتروژنازها (nitrogenases) و مولیبدوپترین ها (Molybdopterin) دیده می شده اند.

نیتروژنازها در باکتریها وجود دارند و در مسیر های تثبیت نیتروژن باید حضور داشته باشند. باکتریها در داخل گیاه نیز می تواند دیده شوند. اتم مولیبدن در یک کلاستر هست که شامل اتم های آهن و گوگرد است. واژه مولیبدوپترین با گروهی از آنزیم ها که شامل آنزیمهای حاوی تنگستن هستند، به اشتباه گرفته می شوند و عبارت مولیبدوپترین در واقع به اتم فلز برنمی گردد. گروهی را که به عنوان آنزیمهای تک اتمی مولیبدن به عنوان اتم فلز شناخته می شوند، در یک کلاستر دیده نمی شوند.

مولیبدن وزن اتمی 96 و نقطه ذوب C 2610 دارد. ساختار کریستالی آن bcc بوده و در فولاد فریت زا و کاربید زاست. حداقل 3٪ مولیبدن باعث می شود که فریت در تمام دماها پایدار باشد. سختی پذیری را افزایش می دهد. در حدود 0.5-1.5٪ مولیبدن به فولادهای آلیاژی اضافه می شود تا استحکام و مقاومت به خزشی آنها در دماهای بالا حفظ شود. فولادهای زنگ نزن از 0.5 تا 4.0٪ مولیبدن دارند. فولادهای زنگ نزن آستنیتی برای مقاومت خوردگی بیشتر در محیط های خورنده حاوی مولیبدن مناسب هستند. هم چنین، مقاومت در برابر پوسته شدن را می کاهش دهد.

در عملیات حرارتی فولادها، Mo تردی تمپر را می کاهش دهد و تشکیل دانه های ریز را تسریع کرده و بر قابلیت جوشکاری تاثیر

مطلوبی دارد. افزایش استحکام را در پی داشته و بنا بر این قابلیت چکش کاری کم می شود. مولیبدن مقاومت در برابر خوردگی موضعی و حفره دار شدن را بیشتر کرده و با تشکیل فازهای ثانویه در فولادهای فریتی، فریتی-آستنیتی و آستنیتی، استحکام آنها را افزایش می دهد. هم چنین در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی، به علت اثر آن بر رسوب کاربیدها، سختی فولاد در دماهای برگشت بالا را افزایش می دهد.

مولیبدن به عنوان عنصر آلیاژی در فولادهای میکروآلیاژی کربنی، کم کربن با استحکام بالا در محدوده 0.05-0.25 بکار رفته و چقرمگی و استحکام را بالا می برد. معمولاً همراه با افزودن مولیبدن از منگنز بالا و کمی نیکل نیز استفاده می کنند. هدف از میکروآلیاژی کردن فولاد، جلوگیری از تشکیل پرلیت در ریزساختار، کاهش اندازه نواحی پرلیت و تشکیل کاربیدهای لایه ای ریز می باشد. اگر درصد مولیبدن و یا سایر عناصر آلیاژی بالا باشد، فریت خاصی بنام فریت سوزنی Acicular ferrite تشکیل خواهد شد.

عنصر مولیبدن باعث بهبود چقرمگی در فولادهای کربنی ساده با استحکام بالا می شود و بنابراین در محدوده دمایی قابل استفاده، استحکام و سختی را افزایش می دهد. در مقایسه با فولادهای کربنی ساده، فولادهای مولیبدن دار خواص الاستیک و استحکام ضربه ای بهتری دارند.

استحاله در فولادهای مولیبدن دار در سرد کردن های آرام رخ می دهد و در نتیجه باعث می شود عمق سخت گردانی افزایش یابد. این افزایش در عمق سخت گردانی سبب فایق آمدن بر مشکلات مربوط به اثر جرم بر سخت گردانی در مقاطع ضخیم شود. برای یکنواختی توزیع سختی در مقاطع ضخیم مقدار کمی مولیبدن اضافه می شود. 0.15٪ مولیبدن اثر مشابه با 0.20٪ کروم و یا 1.25٪ نیکل دارد.

بعضی از فولادها بعد از سرد کردن آرام از دمای برگشت C 625 انرژی ضربه کمتری در مقایسه با فولادهایی دارند که بعد از برگشت با سرعت سرد شده اند. این پدیده به تردی تمپر معروف است. فولادهای منگنز، کروم و کروم - نیکل با کروم بیش از 0.75٪ کروم به این نوع تردی حساس هستند. برای کاهش حساسیت به این نوع تردی به ترکیب این فولادها، مولیبدن اضافه می شود. چنین فولادهایی در محورها، میل لنگ ها و چرخنده ها کاربرد دارند.

نرم شدن مارتنزیت در دماهای برگشت بالای C 260 بوسیله مولیبدن به تاخیر می افتد و در 0.25 Mo % سختی فولادهای مارتنزیتی پرکربن و کربن متوسط در هنگام برگشت در دمای C 400-630 را افزایش می دهد.

در دماهای برگشت بالا، مولیبدن وارد فاز کاربید می شود. با بالا بردن دمای برگشت در دمای C 700 غلظت بالایی از مولیبدن در سمیتیت اورتورومبیک وارد می شود و در درصد های بالاتر از 0.5 Mo %، کاربید ((Fe,Mo)23C6) fcc تشکیل خواهد شد. مولیبدنی که به فولادهای کم آلیاژی و پرآلیاژی اضافه می شود، مقاومت خزشی و استحکام در دماهای بالا را افزایش می دهد. دو علت اصلی را می توان در این نوع رفتار فولادهای مولیبدن دار دخیل دانست: افزایش استحکام خزشی فریت و دیگری بالا بردن دمای تبلور مجدد بعد از سخت گردانی. عامل دیگری نیز می توان بدان مربوط دانست و آن اینست که ساختار میانی بین پرلیت و مارتنزیت تمپر شده تشکیل می شود که استحکام خزشی بهتری دارد.

با اینکه مولیبدن بخودی خود استحکام خزشی فولاد را می افزاید، ولی فولادهایی که در دماهای بالا کاربرد زیادی دارند، در ترکیبشان علاوه بر مولیبدن، وانادیم و یا کروم نیز دیده می شوند. فولادهای از این سری دارای 0.5% Cr، 1% و یا 0.5% Mo، 0.2% Cr می باشند. این فولادها در سوپر هیتراهای بویلر و لوله هایی که در دماهای بالای C 460 کار می کنند، استفاده می

شوند. آنچه در این کاربردها نیاز است، مقاومت در برابر گازهای کوره و اکسیداسیون، مقاومت خوردگی توسط گازهای گرم، استحکام خزشی بالا و بدون تردی تمپر می باشند. در صنایع شیمیایی فولاد با 0.5% Mo بکار می رود که قابلیت جوشکاری بالایی نیز دارد.

در برخی از فولادهای تند بر، مولیبدن می تواند جایگزین تنگستن شود. در این جایگزینی، یک قسمت مولیبدن بجای دو قسمت وزنی تنگستن اضافه می شود. البته شایان ذکر است که مولیبدن بطور کامل جایگزین تنگستن نمی شود بلکه عموماً این فولادها دارای 6% Mo و 6% W می باشند و در فولادهای با مولیبدن بیشتر، 2% W و 9% Mo حضور دارند. در دماهای بالا، این فولادها سختی مشابهی با فولادهای تند بر تنگستن دار داشته ولی فولادهای مولیبدن دار به دگربروریزاسیون سطحی در شرایط حرارت دهی در کوره های اکسیدی بسیار حساسند. برای حل این مشکل، از حمام های نمک، اتمسفر کنترل شده کوره ها و یا پوشش های بوراکسی استفاده می کنند.

مولیبدن مقاومت خوردگی فولادهای کروم و کروم - نیکل را می افزاید. افزودن 3% Mo به فولاد 18/8 استحکام در دماهای بالا را بهبود بخشیده و مقاومت در برابر محلول های سولفیدی، سولفات و استات و مقاومت خوردگی اسید استیک را اصلاح کرده و حفره دار شدن در طی خوردگی در آب دریا را می کاهش دهد. مولیبدن موجود در فولاد 18/8 خوردگی تماسی یا هوازگی را می کاهش دهد. این نوع خوردگی از ذرات خارجی موجود در محلول خورنده که با فولاد در تماس هستند، نشأت می گیرد. با افزودن Mo به فولادهای کم کربنی و مس دار نرخ خوردگی اتمسفری کاسته می شود. با حضور این عنصر، گرافیت زایی در دماهای بالا کند می شود. مولیبدن، نیتrideهای بسیار مقاوم در برابر سایش در فولاد تشکیل می دهد و بنابراین در فولادهای ابزار نیتride شونده استفاده می شود.

در چدن‌ها پایدار کننده متوسط کاربیدهاست. مولیبدن عنصر بسیار مفیدی در افزایش استحکام و چقرمگی چدن‌هاست. درصد افزوده شده به چدن‌ها از این عنصر 0.25-1.25% می باشد. در مقاطع بزرگ و متوسط اثر پایدار کنندگی پرلیت داشته و از اینرو یکنواختی در ساختار را در پی دارد و در عوض استحکام و سختی را افزایش میدهد. در مقاطع نازک، مولیبدن باعث ارتقای ساختار بینیتی سوزنی می شود.

وقتی مولیبدن به همراه نیکل به چدن اضافه می شود، ساختار سوزنی شکل در کل ضخامت تشکیل می شود ولی اگر عنصر آلیاژی بیشتر باشد، مارتنزیت تشکیل خواهد شد. اثر مس همراه مولیبدن مشابه اثر نیکل است اما درصد مس تا حد امکان بایستی پایین باشد تا بطور کامل در محلول قرار بگیرد. چدن‌های سوزنی شکل استحکام و سختی بالایی دارند و در کاربردهایی که نیاز به مقاومت خستگی دارند مثل میل لنگ استفاده می شوند.

سختی پذیری چدن مولیبدن تا حد زیادی در حضور مولیبدن در ترکیب آن بهبود می یابد و می تواند اثر مبردی نیز داشته باشد. مولیبدن کاربیدزا بوده و در کنار کروم و وانادیم جدایش می یابد و در یوتکتیک فسفید قرار می گیرد Cr, V و P در چدن‌های سوزنی مفید و دلخواه نمی باشند.

چدن‌های با درصد کربن کل 3.35٪، 2.25% Si و 0.50% Mo در پیستون‌های موتور ماشین بکار می رود. چدن‌های مولیبدن دار در قالب‌های فورج استفاده می شوند که بایستی استحکام گرم و مقاومت سایشی خوب داشته باشند.

#### تاثیر نیکل

نیکل فلز سفید نقره ای رنگی است که پرداخت بالایی دارد. این عنصر در طبیعت با گوگرد، آرسنیک ترکیب می شود. در تولید سکه

نیز از آن استفاده می شود.

کاربرد نیکل به دوران باستان و در حدود 3500 م ق بر میگردد. برنزهایی که در سوریه امروزی کشف شده اند، در حدود 2 درصد نیکل دارند. علاوه بر آن، دست نوشته های چینی هستند که در آنها به استفاده از مس سفید برای جهت یابی در 1400 و 1700 م ق اشاره شده است. با این وجود با توجه به اینکه سنگ معدن نیکل معمولاً با نقره به اشتباه گرفته می شود، از اینرو تاریخ دقیق و قابل اعتمادی از کاربرد آن وجود ندارد.

اهمیت سنگ معدن های حاوی نیکل (به عنوان مثال کوپرونیکل (kupfernickel) در سبز کردن شیشه ها خلاصه می شد. در سال 1751، بارون اکسل فدریک کرونشتات (Baron Axe Fredrik Cronstedt) تلاش کرد که مس را از کوپرونیکل (که امروزه نیکولیت نامیده می شود) استخراج نماید، اما در نهایت فلز سفید رنگی بنام نیکل را از آن استخراج کرد. سکه های نیکلی، نخست، در سال 1881 در کشور سوئیس استفاده شد.

نیکل در بیولوژی چندین نقش را ایفا می نماید. در واقع، اولین پروتئینی که متبلور می شود، اوریز (آنزیمی که اوره را به کربنات آمونیم تبدیل میکند (Urease)) است که دارای عنصر نیکل است و به هیدرولیز اوره کمک می کند. هیدروژناسهای NiFe علاوه بر کلاسترهای آهن-گوگرد، دارای نیکل نیز می باشند.

نیکل به عنوان عنصر آلیاژی در فولاد به همراه کروم استفاده می شود. وزن اتمی آن 59 بوده و در C 1435 ذوب می شود. در حالت مذاب و جامد بهر نسبتی در آهن حل می شود. نیکل عنصر آستنیت زا است و هیچگونه تاثیری در تشکیل کاربید و اکسید ندارد. به علت اینکه تمایل به ترکیب آن با کربن و اکسیژن کمتر از آهن است.

نیکل سختی پذیری فولاد را افزایش می دهد و در حدود 0.25 تا 5 درصد در ترکیب فولاد وجود دارد. نیکل چقرمگی شکست فولاد به همراه استحکام و سختی آن را افزایش می دهد. فلذا، در مواقعی که در دماهای پایین به چقرمگی شکست بالای نیاز باشد درصد آن تا 9 نیز می توان باشد. در فولادهای زنگ نزن آستنیتی 7 تا 35 درصد نیکل وجود دارد. در این فولادها برای خنثی کردن اثر فریت زایی کروم از نیکل بهره می گیرند. فولادهای با 30 - 40٪ نیکل، آلیاژ Invar نامیده می شوند که انقباض و انبساط بسیار کمتری دارند.

نیکل خودبخود باعث افزایش مقاومت خوردگی می شود. در دماهای بالاتر از 7% باعث آستنیتی شدن فولادهای مقاوم در برابر مواد شیمیایی تا دماهای خیلی زیاد می شود. در دماهای بالای C 600 استحکام فولادهای آستنیتی بیشتر می شود.

نیکل بهر نسبتی در آهن گاما حل می شود و فقط 10 درصد در آهن آلفا قابل حل است. با تشکیل محلول جامد هنگام افزودن نیکل، فریت را چقرمه کرده و استحکام می بخشد و تا حدی سختی پذیری آستنیت را زیاد می کند. در مقادیر کربن زیاد، نیکل سعی می کند که در آستنیت باقی بماند.

از آنجاییکه نیکل در کاهش دمای تبدیل گاما به آلفا بسیار موثر است، این محلول جامد تا دمای اتاق آستنیتی باقی مانده و بالاخص اگر درصد نیکل بیشتر از 30٪ باشد دیگر نرخ سرد کردن تاثیر چندانی نخواهد داشت.

نیکل کاربید ساز نیست و در فولاد بصورت فاز محلول جامد می باشد. نرخ دیفوزیون کربن در محلول جامد در حضور نیکل چندان تحت تاثیر درصد نیکل نیست ولی در صورت وجود کربن در محلول جامد، نرخ دیفوزیون نیکل در آن بسیار کند خواهد بود. تاثیر نیکل بر استحاله آستنیتی در محدوده دمای بینیت موثر تر از دمای تشکیل پرلیت است. از اینرو، تاثیر نیکل بر اساس اثر آن بر فریت و نحوه تشکیل و توزیع فاز کاربیدی سنجیده می شود.

برای افزایش استحکام و سختی بدون کاهش قابل ملاحظه داکتیلیتی فولادهای کم کربن معینی، تا 5 درصد نیکل اضافه می شود. ساختار پرلیت کم کربن ریز بوده چون نیکل کربن یوکتونئید را می کاهد و در مقادیر 3-5 Ni % با آرام سرد کردن از دمای آستنیت، فریت نیکل دار تشکیل می شود. در فولادهای با نیکل بالاتر از 5 % بدلیل حضور مارتنزیت، امکان تردی فولادهای آرام سرد شده نیز وجود دارد. فولادهای با 15-20 Ni % کاملاً مارتنزی بوده که در سیستم های آهن - نیکل، بیشترین سختی 300 HB را دارد. با افزایش نیکل از این مقدار، آستنیت ظاهر شده و سختی کاهش می یابد.

فولادهای نیکل دار همانند سایر فولادهای آلیاژی بعد از آبکاری و برگشت به خواص مطلوبی می رسند. فولادهای 3-5 Ni % در دماهای پایین تر از فولادهای با کربن مشابه بخوبی آبکاری می شوند چراکه نیکل دمای استحاله یوکتونئید را می کاهد. علاوه بر آن کاربردهای کمپلکسی در این فولادها تشکیل نمی شود فلذا زمان همدمایی کوتاهتر خواهد شد. بدلیل کاهش احتمال دکربوریزاسیون و اعوجاج می توان از دمای بالا و قابل قبول استفاده کرد تا ترکیب عالی از مقاومت ضربه خوب و داکتیلیتی و ازدیاد استحکام بدست آید.

فولادهای سختی سطحی شونده کم کربن اغلب دارای تا 3% نیکل هستند. در چنین فولادی، سطح چقرمه ولی محکم همراه با خواص قابل قبول در مرکز بوجود می آید. نیکل با کاهش دمای استحاله، و یکسان کردن دمای سطح و مرکز، اعوجاج را می کاهد. نیکل نرخ دیفوزیون کربن را می کاهد. بنابر این در فرآیند کربوریزاسیون، به زمان زیادی نیاز است. افزودن 1 درصد کروم به ترکیب فولاد، از دیفوزیون آرام کربن جلوگیری می کند. ولی باید دقت کرد که کروم زیاد تردی سطح را زیاد می کند و در نتیجه امکان کنده شدن پوست Scaling بیشتر می شود.

افزودن نیکل به فولادهای کم کربن سبب افزایش مقاومت ضربه در دماهای کم می شود. فولاد نرمال شده با ترکیب 0.1 Ni 3% C، انرژی ضربه 40-50 ft.lb در دمای 75 C دارد در حالیکه انرژی ضربه همان فولاد بدون نیکل با همان درصد کربن 10 ft.lb است. چنین فولادهای نیکل داری از قابلیت بالای جوشکاری برخوردار هستند. فولاد کم کربن با 9 درصد نیکل برای فلز جوش استفاده می شود که نیاز به انرژی ضربه خوب در دماهای پایین است. نیکل مقاومت خوردگی اتمسفری این فولادها را افزایش می دهد.

اگر چه فولادهای نیکلی استفاه وسیعی دارند، معهداً برای بهبود و حصول به خواص فیزیکی و مکانیکی مورد نظر درصدی از کروم یا مولیبدن نیز به ترکیب اضافه می شود. این درصد ناچیز از عناصر فوق سختی پذیری فولاد را افزایش می دهد و به تبع آن استحکام بالا و مقاومت سایشی زیاد همراه با همان چقرمگی بدست می آید. فولادی از این نوع را می توان 1-4 Ni %، Cr 1.5% و اغلب تا 0.5 Mo % برای کاهش حساسیت تردی آبی مثال زد.

در فولادهای نیتريدی استاندارد کروم - مولیبدن - آلومینیوم مقدارن نیکل تا 3.5 درصد است و در این فرآیند نیتريداسیون، ترکیب های بین فلزی نیکل - کروم تشکیل می شود. سطح بسیار سخت شده ولی رسوب سختی مرکز استحکام تسلیم را به اندازه 20 ton/in<sup>2</sup> افزایش می دهد.

آلیاژهای مغناطیس دایم از نوع Alnico دارای نیکل از 11 تا 32 درصد هستند. در توربینهای گازی و در مصارفی که نیاز به استحکام بالا در دماهای بالا می باشند، آلیاژهای نیکل - آهن، سری، Inconel، Nimanic، بکار می روند. آلیاژهای نیکل - آهن 35-95 درصد نیکل داشته و از نفوذ خواص مغناطیسی بسیار بالایی برخوردارند و در مصارف الکتریکی استفاده میشوند. سایر آلیاژهای آستنیتی نیکل - آهن در موارد معینی بکار می روند. به عنوان مثال، Invar که تقریباً 36 Ni % دارد، انبساط ناچیزی در

محدوده وسیعی از درجه حرارت دارد فلذا در فنر ها کاربرد زیادی خواهند داشت. علیرغم ساختار آستنیتی پایدار آلیاژ 30 درصد نیکل- کروم، تغییرات نفوذ مغناطیس در نزدیکی دمای اتاق امکان دستیابی به نفوذ مغناطیس متغیر با تغییر دما را فراهم می آورد. مقاومت های تشعشعی الکتریکی از آلیاژهای نیکل- کروم یا نیکل - آهن می باشند که مقاومت اکسیداسیون عالی در دماهای بالا دارند.

نیکل با چدن در هر نسبتی آلیاژ تشکیل می دهد. در چدن، نیکل گرفت زای متوسطی بوده و درصد پرلیت را زیاد می کند و مقدار فریت آزاد را می کاهش دهد. فلذا یکنواختی ساختار و خواص را بیشتر می کند. از اینرو چدنهای آلیاژی با نیکل، خواص و ساختار یکنواخت تری در مقاطع نازک و ضخیم از خود نشان می دهد.

افزودن مقادیر کمی از نیکل 0.1-1٪ پرلیت را اصلاح می کند و اگر مقدار زیادی اضافه شود، ساختار مارتنزیت و آستنیت در ریزساختار ظاهر می شود. از طرفی اصلاح و پایدارسازی پرلیت قابلیت ماشینکاری چدن را افزوده و سختی پذیری آنها را زیاد می کند. بهمین دلیل است که چدنهای آلیاژی نیکل دار بیشتر در ریختگی های موتور ماشین کاربرد دارد.

افزودن مقدار کمی از نیکل اثری حدود یک سوم اثر سیلیس بر گرفت زایی دارد و بنابراین، اگر در چدنهای آلیاژی نیکل دار بخواهیم پدیده گرفت زایی را محدود کنیم باید درصد سیلیس را کمتر کنیم که عملاً چنین کاری در اکثر موارد عملی نیست. برای این منظور، کروم به ترکیب اضافه می شود.

**Ni Resist** چدن پرنیکلی است که نیکل و مس به حد کافی در آن است تا که ساختار آستنیتی پایدار باشد و بتوان به خواص فیزیکی و مکانیکی مورد نظر دست یافت. این چدن بالاخص در محلولهای متوسط مقاومت خوردگی خوب داشته و مقاومت حرارتی در دماهای پایین بهتر شده ای دارد و **Nicrosilal** چدن آستنیتی نیکل داری است که مقاومت حرارتی زیادی در دماهای بالا دارد. **Ni Hard** چدن سفید مقاوم به سایشی است که نیکل کافی داشته تا ساختار مارتنزیتی را در شرایط بعد از ریختگی ارتقاء دهد. اگر درصد نیکل زیاد شود، احتمال وجود آستنیت باقی مانده نیز زیاد خواهد شد.

#### تاثیر کروم

کروم فلز سخت و درخشان با قابلیت پولیش بالا است و بی بو بدون مزه است. این فلز با ترکیب با اکسیژن و تشکیل فیلم اکسید بر روی سطح فولاد، از اکسیداسیون سطوح زیرین جلوگیری می کند.

در بیست و هشتم جولای 1761، یوهان گوتلب لمان (Johann Gottlob Lehmann) در کوهستان های اورال ماده معدنی نارنجی رنگی را پیدا کرد که وی آن را سرب قرمز سیبری (Sibirian red lead) نام نهاد. با وجود اینکه این ماده با ترکیب سرب با سلنیم به اشتباه گرفته شد، ولی در واقع این ترکیب کرومات سرب با فرمول  $PbCrO_4$  بود که اکنون به نام کروکویت معدنی (Crocoite) شناخته می شود.

در سال 1770، پیتر سیمون پالاس (Peter Simon Pallas) در همان محلی که لمان به کاوش پرداخته بود، ماده معدنی سرب مانند به رنگ قرمز را یافت که خواص عالی در ساخت رنگدانه های رنگ از خود نشان میداد. استفاده از سرب قرمز سیبری به عنوان رنگدانه گسترش فراوانی یافت. رنگ زردروشن که از کروکویت ساخته می شد، به صورت رنگ مدل نیز شناخته شد.

در سال 1797، لوئیس نیکلاس ون کولین (Louis Nicolas Vauquelin) نمونه های از سنگ معدنی کروکویت بدست آورد. وی توانست که از طریق مخلوط کردن کروکویت با اسید هیدروکلریک، اکسید کروم با فرمول  $CrO_3$  را تولید کند. در سال 1798، ون کولین کشف کرد که با حرارت دادن این اکسید در کوره زغالی می توان کروم فلزی را تولید نمود.



در طی سال 1800، کروم یکی از عناصر اصلی رنگ ها را تشکیل می داد و در نمک های چرم سازی استفاده می شد ولی کاربرد اصلی آن در تولید آلیاژها بود که 85 درصد کاربرد آن را به خود اختصاص می داد.

کروم سه ظرفیتی  $(Cr(III), Cr3+)$  به مقدار کم در متابولیسم شکر در انسان نیاز است و فقدان آن ممکن است سبب بیماری به نام فقدان کروم شود. برخلاف آن، کروم شش ظرفیتی بسیار سمی است. اخیراً دیده شده است که مکمل های غذایی پیکولینات کروم باعث آسیب های کروموزومی در انسان می شود که از اینرو در ایالات متحده، رژیم غذایی روزانه برای تامین کروم از مقدار 200-50 میکروگرم برای بزرگسالان تا 35 میکروگرم (برای بزرگسالان مرد) و 25 میکروگرم (برای بزرگسالان زن) کاهش داده شده است.

کروم عنصر اصلی در فولادهای زنگ نزن است. علل اصلی در افزودن کروم به ترکیب فولاد را می توان در عوامل زیر دانست:

- افزایش سختی پذیری فولاد

- حفظ استحکام و سختی فولاد در دماهای بالا و شرایط کاری

- افزایش مقاومت خوردگی در محیط های اکسید کننده

وزن اتمی کروم 52 بوده و نقطه ذوب آن 1875 C است. و در هر دو حالت مایع و جامد بهر نسبتی در آهن حل می شود. در بررسی رفتار کروم به عنوان عنصر آلیاژی سه عامل زیر را باید در نظر گرفت:

- کروم تمایل زیادی به ترکیب با کربن دارد و لذا ذرات کاربیدی همان کاربیدهای کمپلکس آهن-کروم هستند.

- کروم با اکسیژن ترکیب شده و ترکیب دیرگداز غیرفلزی اکسید کروم تشکیل می دهد که نقش فیلم سطحی محافظ در سطح فولاد را بازی می کند.

- کروم فریت زای بسیار قوی است.

در حدود 13٪ کروم در ترکیب فولاد باعث محدود شدن فاز آستنیت در ریزساختار می شود. با افزایش درصد کروم، مقاومت خوردگی فولاد زیاد می شود. و هم چنین در دماهای بالا مقاومت به اکسیداسیون آنها زیاد خواهد شد.

حضور کروم باعث می شود دماغه های نمودار TTT به سمت راست تغییر مکان دهند و سختی پذیری افزایش یابد. با این وجود با افزایش درصد کروم جوشکاری آنها مشکل خواهد شد. به ازای افزایش یک درصدی کروم در ترکیب فولاد استحکام کششی فولاد از 80 تا 100 Mpa افزایش می یابد.

کروم مقاومت خوردگی و استحکام فریت را شدیداً افزوده ولی تاثیر متوسطی بر سخت گردانی فاز آستنیت دارد. در فولادهای پرکربن، مقاومت به سایش را افزایش میدهد.

افزودن کروم به آهن خالص گستره پایداری فاز گاما را محدود کرده و در درصدهای 13٪ پایداری فاز فریت دلتا را تا دمای اتاق افزایش می دهد. افزودن بیش از 30٪ کروم به ترکیب، فاز بین فلزی سیگما FeCr را تشکیل می دهد. لازم است یادآوری شود که حضور عناصر دیگر بر تشکیل فاز سیگما تاثیر دارند بطوریکه با توجه به ترکیب شیمیایی فولاد می تواند در درصد های پایین کروم نیز تشکیل شود. به عنوان مثال، فولاد زنگ نزن 8/18 که عناصر کاربید زایی مثل 3٪ مولیبدن و 1٪ تیتانیوم دارد، با عملیات حرارتی در دمای 850 C فاز سیگما در ساختار ظاهر می شود. علاوه بر آن، در درصدهای کروم کمتر از 20٪ و در حضور عنصر کبالت در مقادیر 7-10٪ چنین تردی ناشی از حضور فاز سیگما مشهود است.

وجود کروم در ترکیب آلیاژهای آهن - کربن بالاخص در درصدهای کربن زیاد تشکیل کاربیدها را می افزاید. در سیستم آلیاژی

آهن-کربن-کروم چهار نوع کاربید کمپلکس اصلی وجود دارند: سمنتیت رومبیک  $(FeCr)_3C$  در درصدهای کروم تا 15%، کاربید کروم تریگونال  $(CrFe)_7C_3$  در درصدهای آهن 55%، کاربید کروم کوبیک  $(CrFe)_4C$  که در آن کروم تا 24% جایگزین آهن می شود و کاربید کروم اورتورومبیک  $(CrFe)_2C_3$  که درصد کمی از آهن را داراست ولی فقط در فولادهایی یافت می شود که تقریباً 9% کربن داشته باشند. کروم اضافی از مقدار لازم برای تشکیل کاربید وارد محلول جامد می شود.

برخلاف کبالت، درصدی از کروم که در محلول جامد وجود دارد، تاثیر کمی بر قابلیت سخت گردانی در مقایسه با سایر عناصر آلیاژی دارد. کرومی که در محلول جامد است، زمان استحاله ایزوترمال آستنیت در فولاد های با 0.3% کربن و بیشتر از 2% کروم را زیادتر می کند. در سرعت های سرد کردن عادی پرلیتی در ساختار تشکیل نمی شود. ولی اگر بتوان شرایط را طوری فراهم آورد که با نرخ سرد کردن عادی از استحاله مارتنزیتی جلوگیری شود، در ریزساختار بینیت ریز تشکیل خواهد شد. افزودن کروم به فولاد درصد کربن پرلیت یوتکتوئید را کاسته و دمای استحاله آستنیت را می افزاید. در فولاد 12% کروم و 0.35% کربن، استحاله یوتکتوئید در 0.35% کربن و دمای یوتکتوئید  $C 800$  رخ می دهد.

فولادی با 0.25 تا 0.45 درصد کربن و 1.5 درصد کروم استحکام کششی و داکتیلیتی خوبی داشته ولی باید در برابر رشد دانه و تردی احتیاط های لازم را بعمل آورد. بعد از کوئنچ، این فولاد در برابر برگشت مقاومت خوبی از خود نشان می دهد فولاد با 1 درصد کروم مقاومت خوبی در برابر خوردگی اتمسفری عادی از خود نشان می دهد. وجود 0.5 درصد مولیبدن استحکامهای کششی را تضمین می کند.

قطعات فورج تحت کشش بالا و بزرگ از فولادهای کروم دار 3 تا 3.5 درصد کروم همراه با 0.5 درصد مولیبدن تولید می شوند که استحکام بالای آنها ناشی از ریزساختار بینیتی است که در حین سرد کردن آرام تشکیل شده است. افزایش درصد کروم تا 5-6% همراه با درصد کمی از مولیبدن یا نیوبیوم مقاومت خوردگی نسبتاً خوب همراه با مقاومت خوب به خزش در دماهای نسبتاً بالا را در پی دارد. این چنین فولادهایی در صنایع پالایش نفت کاربرد پیدا کردند. سایر فولاد های کم کربن که در این حوزه کاری استفاده می شوند دارای درصد کم کروم 0.5-2.5% همراه با درصد کمی از مولیبدن هستند. البته مقاومت خوبی در برابر خزش در دماهای متوسط دارند و در صورتیکه درصد کربنشان از 0.3 فراتر نرود، قابلیت جوشکاری خوبی نیز خواهند داشت.

عنصر اصلی در فولادهای آلیاژی کم کروم نیکل است. این نوع فولادها دارای 1% کروم و 1.5-4.5% نیکل هستند. فولادهای با نیکل پایین و کربن 0.3% در روغن سرد می شوند ولی کوئنچ فولادهای با 1.2% Cr و 4% Ni در هوا حتی در مقاطع بزرگ سختی بالایی را در پی دارد. در شرایط کوئنچ و تمپر، فولادهای نیکل-کروم استحکام خوبی داشته و برای تولید مقاطع بزرگ مناسب هستند. برای کاهش حساسیت به تردی تمپر به ترکیب این فولادها مولیبدن اضافه می شود.

فولادهای نیکل - کروم و نیکل - کروم - مولیبدن برای کاربردهایی استفاده می شوند که نیاز به سختی سطحی باشد. بخاطر تمایل زیاد کروم با تشکیل کاربید، سختی لایه سطحی را افزایش می دهد. فولادهای کربنی ساده برای کاربردهای سختی سطحی شونده Case Hardening مناسب نیستند چرا که با وجود سخت بودن سطح، ترد بوده و تمایل به جدا شدن Spall دارد.

بیشترین سختی در سطح را می توان در فولادهای نیتزیده شونده حاوی کروم بدست آورد. کروم تمایل قوی به ترکیب با نیتروژن دارد. از مشهورترین فولادهای این نوع، می توان به فولادهای نیتروآلوی با 1.5% Cr و 1% Al اشاره کرد. فولاد با کاربرد زیاد در این سری، فولاد حاوی 3% Cr و 0.5% Mo می باشد.

کروم مقاومت به سایش فولادهای کربنی ساده را افزایش می دهد. موادی که دارای کروم هستند در صورتیکه صحیح آبکاری شوند (1) Cr 1.5% C دارای سختی سطحی بالا، اندازه دانه ریز و مقاومت سایشی بالایی خواهند داشت. این مواد را می توان قبل از آبکاری برای سهولت در ماشینکاری نرم کرد. فولادهای مشابه که در آب کوئنچ می شوند، دارای سختی سطحی بسیار بالا و مرکز نرم خواهند بود.

مقادیر مشخصی از کروم در فولادهای قالب گرم موجود است و در فولادهای خاصی که برای این منظور استفاده می شود، دارای C 2% و Cr 12% هستند. در این فولادها، کاربیدهای آزاد دیده می شوند که مقاومت سایشی را بالا می برند. این فولادها در حین حرارت دهی در محدوده 500-600 C سختی ثانویه از خود نشان می دهند. کیفیت بالای این نوع فولاد مربوط به حفظ شکل و پروفیل قالب است که مربوط به مقاومت عالی کاربیدهای کروم در برابر دکربوریزاسیون می شود. فولادهای تندبر که حاوی تنگستن و مولیبدن با 1% V یا انواع پرکربن و پروانادیم هستند دارای درصدی از کروم (3.5-5.5%) بوده تا کاربیدها در ریزساختار پایدار باشند.

کروم عنصری است که مصرف بیشتری در تولید فولادهای زنگ نزن دارد. در کل فولادهای زنگ نزن به سه دسته مارتنزیتی، آستنیتی و فریتی گروه بندی می شوند. اولین گروهیکه از این فولادها تولید شده ند ، فولادهای مارتنزیتی با 13% کروم و 0.3% کربن بودند. کروم عامل اصلی در افزایش مقاومت خوردگی این فولادها بوده و کربن یوکتوئید را می کاهش دهد. در شرایط آبکاری و برگشت، فولادهای با 13% Cr دارای سختی HB 530 خواهند بود. جوشکاری این فولادها باعث تردی آنها شده و نیاز به عملیات حرارتی بعدی خواهند داشت. قابلیت فورج پذیری در محدوده دمایی 900-1100 C خوب بوده بعد از آنیل در دمای 750 C قابلیت ماشینکاری خواهد داشت. هرچند که خواص پرسکاری سرد آنها ضعیف است. در فولاد مشابه با 13% Cr و تنها با کربن 0.1%، سختی پذیری کمتر بوده و در شرایط آبکاری در روغن و بعد از تمپر کامل، سختی HB 150 خواهد داشت. این نوع فولادهای زنگ نزن در تیغه های توربین استفاده می شوند. با عملیات حرارتی این نوع فولادها برای جلوگیری از تردی ، می توان جوشکاری را انجام داد. فورج پذیری آنها بصورت گرم بوده ولی خواص پرسکاری سرد آنها کم است.

با افزایش درصد کروم، مقاومت خوردگی فولادهای مارتنزیتی بیشتر می شود اما در درصدهای 17% Cr و کربن 0.07 درصد، بدلیل اینکه کروم فریت زاست، سختی پذیری کمتری خواهند داشت. این نوع فولادها در گروه فولادهای فریتی قرار می گیرند. علیرغم اینکه جوشکاری و خواص پرسکاری سرد آنها خوب است، اما جوشکاری آنها را ترد می کند. افزودن 2.5 درصد نیکل بهمراه افزایش درصد کربن تا 0.15 درصد ، باعث افزایش سختی پذیری فولاد بدلیل پایداری بیشتر آستنیت می شود. این نوع فولادها کاربرد وسیعی بعنوان شیر در صنایع شیمیایی دارند.

فولاد با درصد کربن 0.1% و با کمتر و کروم بالای 20% فریتی بوده ولذا قابلیت سختی پذیری ندارند. درصد کروم بالا باعث مقاوم شدن فولاد در برابر اسیدهای اکسید کننده و اسید نیتریک می شود و خاصیت مهم دیگر که در حضور کروم بالا می توان بدن دست یافت ، مقاومت خوب در برابر اکسیداسیون و کنده شدن سطحی در دماهای بالا می باشد.

برای کار در دماهای بالا، فولادهای با 20-27% کروم مناسب هستند. فولاد با 27% Cr را می توان در 1000 C نیز استفاده کرد. اگر چه در این دما خواص مکانیکی این فولادها پایین است. این نوع فولاد در اتمسفرهای گوگرد دار نیز قابل استفاده هستند. افزودن نیکل به ترکیب فولادهای کروم بالا باعث افزایش مقاومت خوردگی ، مقاومت اکسیداسیون و پوسته برداری در دماهای بالا

می شود. فولاد کم کربن با  $18\% \text{Cr}-8\% \text{Ni}$  در حین سرد کردن تا دمای زیر دمای اتاق کاملاً آستنیتی بوده و لذا با کوئنچ نمی توان سخت کاری روی آنها انجام داد. تنها راه افزایش استحکام این نوع فولادها انجام کار سرد است. نرمترین حالت این فولادها وقتی است که در دمای  $1100-1050 \text{C}$  عملیات حرارتی شوند. مقاومت خوردگی در اسیدهای غیراکسیدی مثل اسید سولفوریک، اسید هیدروکلریک زیاد بوده و با افزودن  $3\% \text{Mo}$  بالاخص همراه درصدی از مس مشابه، مقاومت خوردگی را نیز افزایش می دهد.

اعتقاد بر اینست که علت اصلی محافظ بودن فولادهای زنگ نزن، وجود فیلم اکسیدی بسیار نازک در سطح فولاد است که این فیلم در اولین تماس فولاد با محیط تشکیل می شود. این فیلم بقدری نازک است که اصلاً دیده نمی شود. در آب و بسیاری از محیط ها قابل حل نمی باشد.

با حرارت دادن فولاد  $8/18$  در محدوده دمایی  $650-850 \text{C}$  مقاومت به شیمیایی در مرز دانه شدیداً کاهش می یابد. این چنین حالتی در مناطق HAZ بسیار خطرناک است و ناشی از خالی شدن مناطق مجاور مرزدانه از کروم است. که در این دما کاربید کروم رسوب می کند. وقتی کربن  $0.04-0.05\%$  باشد این افت مقاومت خوردگی زیاد خواهد بود. برای حذف و یا کمتر کردن این حالت، بهتر است درصد کربن حداکثر  $0.03\%$  باشد بطوریکه کاربید کمتری تشکیل شود یا عنصری اضافه کنیم که تمایل به ترکیب آن با کربن نسبت به کروم بسیار بیشتر باشد تا کاربید کروم تشکیل نشود و کروم در محلول جامد باقی بماند.

فولاد آستنیتی کروم-نیکل در دماهای بالا استحکام خوبی دارد ولی با این وجود برای بهتر کردن کارایی آن عناصر دیگر اضافه شود. به عنوان مثال، فولاد  $18\% \text{Cr}$  و  $12\% \text{Ni}$  همراه با نیوبیوم در دماهای بین  $600-650 \text{C}$  مقاومت خزشی خوبی دارد. برای کاربردهای کمی بالاتر از این دما، افزودن عناصری چون کبالت، تنگستن و مولیبدن لازم است. ولی اگر محدوده دمایی  $750-800 \text{C}$  باشد، مواد پایه کبالتی و یا نیکلی گزینه بهتری خواهند بود.

درصدهای بالای کروم و نیکل باعث افزایش مقاومت اکسیداسیون در دماهای بالا می شود. در برخی کاربردها که نیاز به این است که مقاومت پوسته برداری خوبی نیز داشته باشیم، درصد سیلیس بالا به همراه مولیبدن انتخاب می شود. یک ترکیب نمونه از این نوع فولاد  $19\% \text{Si}, 2\% \text{W}, 3\% \text{Ni}, 8\% \text{Cr}$  می باشد. اگر هدف این باشد که مقاومت حرارتی استثنایی داشته باشیم، آلیاژهای پایه نیکلی مثل Nichrome با ترکیب  $65\% \text{Fe}, 20\% \text{Cr}, 15\% \text{Ni}$  و یا آلیاژ نیکل - کروم  $20/80$  استفاده می شود.

در سالهای اخیر نوعی از فولادها آستنیتی معرفی شده اند که توسط فرآیند رسوب سختی کنترل می شوند. این فولادها هنگام سرد کردن از دمای بالای آستنیتی بوده و با عملیات در دمای زیر صفر و یا تمپر در دمای  $750 \text{C}$  آستنیت به مارتنزیت دگرگون می یابد. پیرسازی بعدی در دمای  $450-600 \text{C}$  افزایش زیاد در خواص مکانیکی همراه با مقاومت خوردگی خوب در پی دارد. مثالی از این نوع فولادها  $16\% \text{Mo}, 2\% \text{Cu}, 5\% \text{Ni}, 2\% \text{Cr}$  می باشد. مس و مولیبدن در بهبود مقاومت خوردگی سهمیم هستند. مس مکانسیم رسوب سختی را بهبود می بخشد.

کروم کاربید ساز قوی بوده و در ترکیب چندین کاربیدهایی می دهد که خیلی پایدارتر از کاربید آهن هستند. اگر درصد کمی از کروم در فولاد باشد، تشکیل سمنتیت پرویوتکتوئید و پرلیت در هنگام سرد کردن آرام و عملیات حرارتی کند می شود. حداکثر کروم در چندین چکش خوار  $0.03\%$  می باشد.

در هر دو نوع چندین معمولی و آلیاژی، درصدهای  $0.5-1.0\%$  کروم برای بهبود خواص مکانیکی بکار می رود. این درصد کروم با حذف فریت آزاد در ریزساختار باعث پایداری پرلیت می شود. در نتیجه استحکام و سختی افزایش می یابد. چندین با کروم بالا

پایداری عالی در دماهای بالا دارند و برای کاربردهای دمای بالا معمولاً دو گروه از چدن‌ها بیشتر استفاده می‌شوند: چدنهای 17 Cr و چدنهای 30 Cr % و بالاتر. هر دو نوع از چدن‌ها مقاومت حرارتی خوبی دارند اما دومی دارای مقاومت خوردگی بالاتری است.

کروم در بسیاری از چدن‌های آلیاژی وجود دارد. وجود کروم در چدن ناپهارد باعث تبدیل این چدن به چدن سفید می‌شود. در چدن‌های Niresist و Nicrosil تقریباً 1.5 درصد کروم می‌باشند تا خاصیت مقاومت خوردگی و پوسته برداری ارتقاء یابد و زمینه آستنیتی تشکیل شود. با این وجود بدلیل اینکه وجود مقادیر زیاد کاربید چندان مطلوب نمی‌باشد، مقدار کروم در این چدن‌ها محدود می‌شود.

### اثر عناصر آلیاژی بر میکروساختار و استحکام چدن خاکستری :

#### 1- مقدمه

چدن خاکستری یک گروه وسیع از آلیاژهای ریختگی آهنی است که معمولاً "بوسیله یک میکروساختار از گرافیت ورقه ای (flake graphite) در یک زمینه آهنی مشخص می‌شود. آن اساساً یک آلیاژ Fe-C-Si شامل مقادیر کوچکی از عناصر آلیاژی دیگر و بیشترین آلیاژ ریختگی مورد استفاده و با تولید جهانی سالانه 6 میلیون تن است که چندین برابر دیگر فلزات ریختگی است [1]. میکروساختار چدن خاکستری معمولاً شامل گرافیت ورقه ای و یک زمینه پرلیت و یا فریت است که خواص مکانیکی، قابلیت ماشینکاری و غیره به آن بستگی دارد. چدن‌های خاکستری معمولی، زمینه پرلیتی و استحکام کششی در محدوده 140 تا 400 Mpa دارند. وسیله اصلی برای بهبود خواص مکانیکی، کاهش کربن معادل است که درصد گرافیت را کاهش و پرلیت را افزایش می‌دهد. جدول (1) انواع تجاری چدن خاکستری و خواص مکانیکی مربوط به آنها را نشان می‌دهد. برای بهبود خواص چدن خاکستری، تحقیق بر روی گسترش میکروساختار آسفریت بیش از 40 سال انجام گرفته است [2-6]. یک بهبود مهم ویژه در خواص، نتیجه ای از گسترش چدن خاکستری آستمپر شده است [3-7]. چدن‌های خاکستری آستمپر شده به مهندس چاره هایی با ترکیبات فرایندی/موادی معمولی پیشنهاد می‌دهد [7]. از طریق آستمپرینگ، زمینه فریتی یا پرلیتی، چدن خاکستری به یک ساختار سوزنی شامل 70 تا 80٪ فریت بینیتی بدون کاربید و آستنیت باقیمانده 20 تا 30٪ تغییر می‌یابد. چنین ساختاری به اصطلاح آسفریت است [6]. نشان داده شده است که چنین ساختار زمینه ای، یک چدن خاکستری با یک ترکیب منحصر بفرد از استحکام، مقاومت سایشی، جذب صدا و یا لرزش و تافنس شکست بالا را تولید می‌کند [6 و 7]. یک عملیات حرارتی معمولی آستمپرینگ چدن خاکستری، آستنیت‌ه کردن در دمای 840-900 °C برای چند ساعت بر اساس ترکیب و ضخامت ریختگی و آستمپر کردن در 230-425 °C است [6 و 7]. در حالی که این برنامه زمانی عملیات حرارتی تولید چدن خاکستری با یک محدوده عالی از خواص، به انرژی قابل ملاحظه و فضای تولید نیاز دارد و ممکن است باعث آلودگی محیطی بعلاوه اکسیداسیون و ترک در اجزا شود. این مشکلات، تولید گسترده چدن خاکستری آستمپر شده را محدود کرده اند، بنابراین تحقیق بر روی گسترش چدن خاکستری آسفریتی را بوسیله ریخته گری مستقیم وادار می‌کنند [5]. کار حاضر قصد دارد نشان دهد که چگونه تغییرات سیستماتیک در اضافه کردن آلیاژی به یک چدن خاکستری معمولی در طی ریخته گری می‌تواند یک آلیاژ با میکروساختار فریت بینیتی-آستنیتی (آسفریتی) با خواص مکانیکی قابل مقایسه با چدن خاکستری آستمپر شده را تولید کند.

جدول (1): ترکیب و خواص مکانیکی کلاسهای مختلف چدن خاکستری

Hardness (HB)	Transverse load on test bar (kg f)	Tensile strength (MPa)	Total silicon (wt.%)	Total carbon (wt.%)	Class
56	839	152	2.30–2.50	3.40–3.60	20
174	987	179	-	-	25
210	1145	214	2.10–2.30	3.10–3.30	30
212	1293	252	-	-	35

## 2- تجربی

### 2-1- مواد و روش ریخته گری

هدف اصلی از کار حاضر تعیین تاثیر عناصر آلیاژی کلیدی بر توسعه میکروساختاری چدن خاکستری و اثر آن بر خواص مکانیکی بود. آزمایشات ریخته گری با استفاده از یک ترکیب آلیاژی اصلی حاصله از آمیزانها (جدول 2) و بوسیله تغییر سیستماتیک عناصر آلیاژی که عمده آنها: Mo, Mn, Si, Cu بود، انجام گرفت. ترکیب اصلی نشان داده شده در جدول 2 مربوط به آلیاژ کلاس 35 (جدول 1) است. جدول 2 همچنین نشان می دهد که چگونه Si, Cu, Mo, Mn بطور سیستماتیک از این ترکیب اصلی تغییر می یابند.

چدن خاکستری اصلی در یک کوره القائی در دمای 1500 °C ذوب شد که آمیزانها به مذاب برای تولید ترکیب مطلوب، اضافه شدند. از طریق ترکیب کردن در دمای 1480-1520 °C، یک قسمت از مذاب با ترکیب مورد نیاز با یک ملاقه ریخته شد که به 0/5 درصد وزنی از آلیاژ Si-25Fe75 تلقیح شد. برای نمونه های متالوگرافی، قالبهای ساخته شده از ماسه سیلیکای خشک مخلوط با رزین به همراه فالبهایی برای نمونه های تست مکانیکی تولید شده با سیلیکای خشک اما مخلوط با خاک رس و با یک رنگ گرافیتی با زمینه آب، رنگ شد. هر دو نوع قالب با همان مشخصات سرد کردن در طی ریخته گری بعلاوه همان میکروساختار تولید شد [9]. دمای ریخته گری 1380-1420 °C بود. در ادامه ریخته گری، همه فالبهایی نمونه ها در هوا با دمای اتاق، خنک شدند.

### 2-2- متالوگرافی و خواص مکانیکی

میلگردهای استوانه ای با  $\text{mm} \times 30\text{mm} \text{ } \varnothing 120$  و  $\text{mm} \times 30\text{mm} \text{ } \varnothing 350$  برای آزمایش متالوگرافی و تست مکانیکی، به ترتیب، با استفاده دومی برای تعیین تنش شکست متقاطع و تست ضربه شارپی ریخته گری شدند [9]. نمونه ها برای تعیین تنش کششی نهایی (UTS) از نیمه پایین از هر نمونه شکسته متقاطع، ماشینکاری شدند. برای یک ترکیب مفروض، سه نمونه ریخته گری شدند و میکروساختار خواص مکانیکی تعیین شدند. با ادامه گرفتن ریخته گری، نمونه ها برای متالوگرافی نوری عمود بر محور طولی میلگردهای استوانه ای قرار گرفتند و با دنبال کردن خواص مکانیکی، سطوح شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی Hitachi S4500 مورد آزمایش قرار گرفتند. اندازه گیری های کسر حجمی از میکرو اجزای زمینه (فریت، پرلیت، آسفریت، مارتنزیت و گرافیت) با استفاده از Adobe Photoshop 6.0 همراه میکروسکوپ نوری Nikon Epiphot 200 با Nikon digital camera DXM 1200 انجام گرفت. برای هر نمونه، شش مورد اتفاقی با بزرگنمایی 100 با کسر حجمی از میکرو اجزای تعیین شده بوسیله متالوگرافی کمی، مورد تحلیل قرار گرفتند.

جدول (2): محدوده آلیاژهای مورد استفاده در این کار (درصد وزنی)

عنصر	C	Mo	Mn	Si	Cu
ترکیب آلیاژ اصلی	3.2	<0.005	0.55	1.41	<0.005
ترکیب آلیاژهای کنترلی		1.0Cu	1.0Cu	1.0Cu	0.32, 0.53Mo
		0.55Mn	0.32Mo	0.32Mo	0.55Mn
		2.0Si	1.80Si	1.05Mn	2.0Si
		0.11-1.17	0.68-2.34	1.41-2.32	0.78-1.79

ترکیب آلیاژی اصلی در ردیف 2 آمده است و آلیاژهای کنترلی در ردیف 3 آمده است و عناصر آلیاژی در این آلیاژهای کنترلی بصورت ردیف 6 تغییر می یابد.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- تاثیر عناصر آلیاژی بر توسعه میکروساختاری

##### 3-1-1- مولیبدن (Mo)

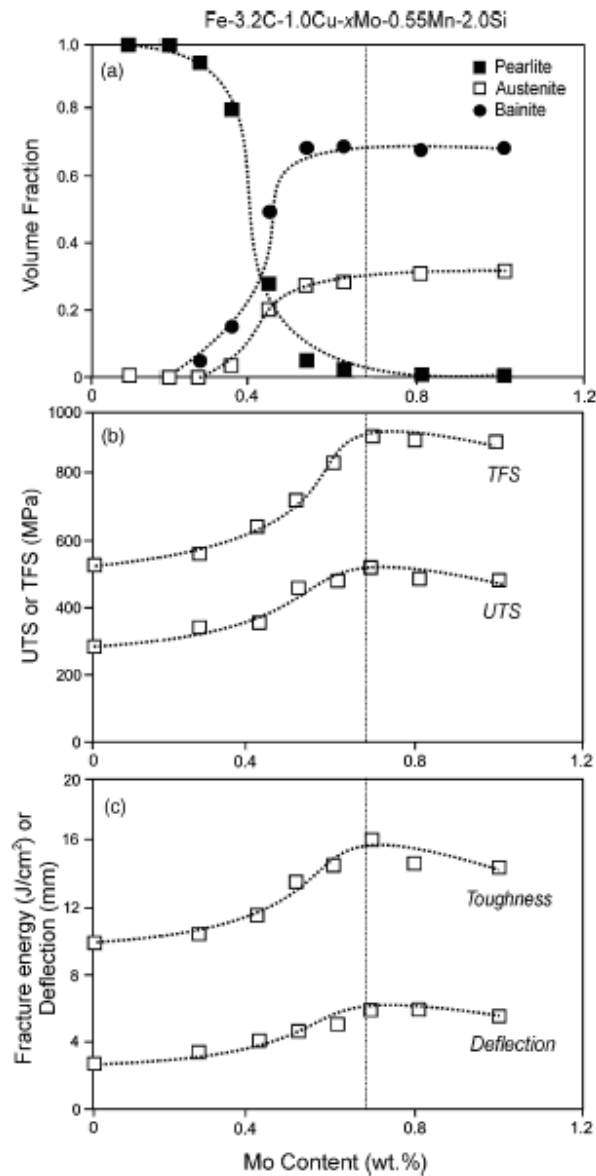
برای یک ترکیب اصلی ثابت  $Fe-3.2C-1.0Cu-0.55Mn-2.0Si$ ، مولیبدن به مذاب در محدوده  $x = 0.11-1.17$  (wt.%) اضافه شد. تاثیر مولیبدن بر توسعه میکروساختاری در جدول 3 و شکل 1-الف نشان داده شده است که آن می تواند در بزرگتر از  $Mo/0.62$  دیده شود که یک زمینه میکروساختار 100٪ آسفریت بدون تغییر در شکل گرافیت را تولید کند. میکروگرافهای SEM و نوری آلیاژ شامل  $Mo/0.62$  در شکل 2 با نشان دادن توزیع یکنواخت نوع گرافیت ورقه ای E (شکل 2-الف) در یک زمینه و (شکل 2-ب) آمده است. برای مقادیر کم Mo، پرلیت به شکل لایه ای شبیه به پرلیت در فولاد تولید می شود در حالی که برای مقادیر بالاتر Mo، آسفریت بصورت توزیع سوزنی فریت در زمینه آستنیت تولید می شود. مقدار Mo بیش از 0.95٪ برای تولید کاربید مولیبدن در مرزهای سلول یوتکتیکی معلوم شد.

##### 3-1-2- منگنز و سیلیسیم

**3-1-2-1-3 Fe-3.2C-1.0Cu-yMn-zSi**: آزمایشات ریخته گری محدود بر روی آلیاژ بدون مولیبدن بوسیله افزایش Mn و Si تا 2.75 و 2.9٪، به ترتیب، انجام گرفت [9]. در غیاب Mo، آسفریت در طی ریخته گری تولید نشد و یک ساختار پرلیتی با کسر حجمی کم از مارتنزیت تولید شد.

**3-1-2-2-1-3 Fe-3.2C-1.0Cu-0.32Mo-yMn-zSi**: برای این آلیاژ، اثر Mn و Si در محدوده 0.68-2.34 و 1.41-2.32٪، به ترتیب، بر تشکیل میکروساختار آسفریت در جدول 4 با اثر ترکیب بر میکروساختار در شکل 3 نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که با حضور  $Mo/0.32$ ، هم Mn و هم Si تشکیل آسفریت را تقویت می کنند و مقادیر Mn و Si بیشتر از 1.02 و 1.41٪، به ترتیب، برای تولید زمینه میکروساختار شامل 95٪ آسفریت و تقریباً 5٪ مارتنزیت لازم است. شکل 4 میکروساختار ریختگی چدن خاکستری شامل  $Mo/1.25$  و  $Si/2.0$  را با نشان دادن 95٪ آسفریت و تقریباً 5٪ مارتنزیت (ناحیه خاکستری سیاه در منطقه مرکزی شکل 4) و بدون گرافیت ورقه ای E را ارائه می دهد. که آن شبیه ناحیه های مارتنزیت است چنانچه در شکل 4 نشان داده شده، یک نتیجه از جدایش در آلیاژ ریختگی است بنابراین ناحیه های اشباع برای تبدیل به فریت بینیتی در طی سرد کردن ناتوان هستند اما به مارتنزیت تجزیه می شوند. برای یک مقدار Si مفروض (1.41-2.32٪)،

مقادیر Mn بزرگتر از 1.52٪، بینیت کمتری، مارتنزیت و مقداری آستنیت تولید شد (جدول 4).

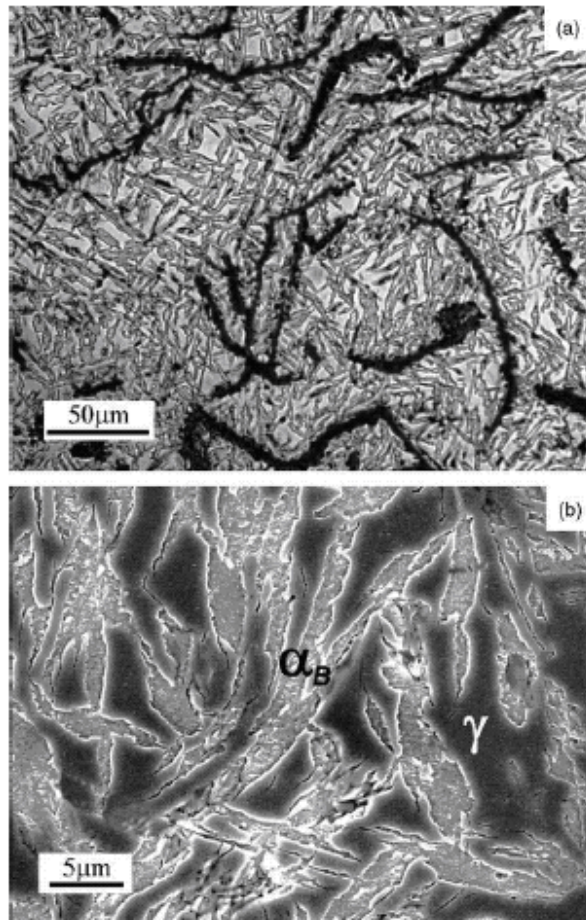


شکل (1): تاثیر Mo بر (a) Fe-3.2C-1.0Cu-0.55Mn-1.8Si: ارائه فازها در میکروساختار b,c: خواص مکانیکی

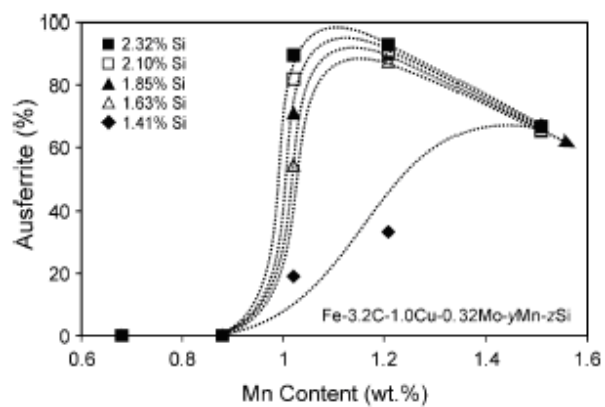
دول (3): اثر Mo بر میکروساختار ریختگی Fe-3.2C-1.0Cu-xMo-0.55Mn-2.0Si



Mo%	ساختار زمینه (%)			گرافیت ورقه ای	
	آستنیت	بینیت	پرلیت	نوع	درصد
0.11	0	0	100	E	7.5
0.22	0	0	100	E	8.2
0.31	0.8	4.7	94.5	E	7.9
0.40	3.8	16	80.2	E	7.5
0.51	21.1	50.9	28	E	6.8
0.62	27.8	68.2	5	E	6.5
0.73	28.7	69	2.3	E	6.7
0.95	31.9	68.1	0	E	6.4
1.17	31.3	68.7	0	E	6.1



شکل (2): a : نوری و b : میکروگراف SEM از چدن خاکستری ریختگی شامل  $Mo/0.62$  با نمایش توزیع گرافیت ورقه ای و زمینه کاملاً "آسفریت".



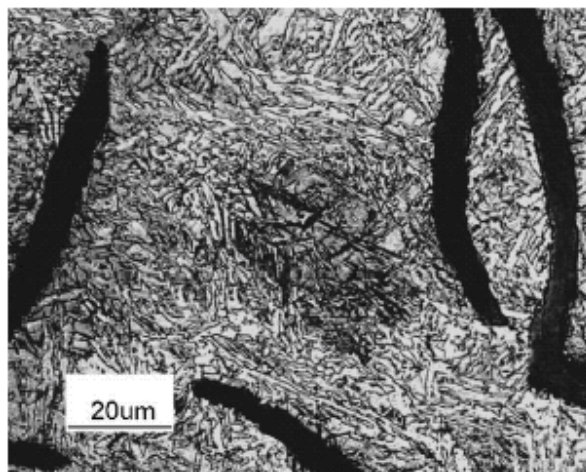
شکل (3): اثر Mn و Si بر کسر حجمی آسفریت در چدن خاکستری ریختگی ( $Mo-1.0\%Cu/0.32$ )

جدول (4): افزودنی های آلیاژی و ارائه فازها در نمونه های متالوگرافی از آلیاژ Fe-3.2C-1.0Cu-0.32Mo-yMn-zSi

Mn%	Si%	آستنیت (%)	بینیت (%)	پرلیت (%)	مارتنزیت (%)
0.68	1.41	0	0	98	1-2
	1.63	0	0	98	1-2
	1.85	0	0	98	1-2
	2.10	0	0	98	1-2
	2.32	0	0	98	1-2
	1.41	0	0	98	1-2
	1.63	0	0	98	1-2
	1.85	0	0	98	1-2
	2.10	0	0	98	1-2
	2.32	0	0	98	1-2
	1.41	5.7	13.1	78	3.1
	1.63	14.6	40.0	41.2	4.2
	1.85	20.5	50.4	27.3	1.8
	2.10	20.3	61.6	15.8	2.3
	2.32	21.1	68.7	8.7	1.5
	1.41	10.2	23.0	61.3	5.5
	1.63	22.2	65.4	7.5	4.9
	1.85	22.1	68.0	5.6	4.3
	2.10	22.6	68.4	4.8	4.2
	2.32	23.0	69.9	1.7	5.4
1.41	17.0	50.2	0	22.8	
1.63	16.5	50.5	0	33.5	
1.85	10.0	55.6	0	34.4	
2.10	9.4	56.4	0	34.2	
2.32	9.5	57.2	0	22.3	

	2.10	6.7	0	0	93.3
	2.32	7.4	0	0	92.6

همه آلیاژها شامل گرافیت ورقه ای E هستند.



شکل (4): میکروگراف نوری با نمایش میکروساختار آسفریت در Fe-0.32Mo-1.0Cu-1.25Mn-2.0Si با نشان دادن ناحیه مارتنزیتی (قسمت مشکی).

### 3-1-3 مس

برای یک ترکیب اصلی ثابت Fe-3.2C-0.55Mn-2.0Si، مولیبدن به مذاب با غلظت 0.32 و 0.53٪ اضافه شد و سپس به همراه Cu در محدوده 0.78-1.79٪ تغییر یافت. تاثیر Cu بر توسعه میکروساختار در جدول 5 داده شده است. واضح است که یک مقدار کم (0.32% Mo)، آسفریت را تولید نمی کند در حالی که Mo/0.53 برای تولید افزایشی کسر حجمی از آسفریت (0-95.9٪) با افزایش مقدار Cu کافی است. این گرایش ها عموماً "شبهه به دیگر عناصر آلیاژی هستند.

### 3-2 مورفولوژی آسفریت

آسفریت برای تشکیل در طی ریخته گری مستقیم چدن خاکستری بوسیله کنترل افزودنی های آلیاژی Mo, Mn, Si, Cu نشان داده شده است. این ترکیب معمولاً شامل فاز خشن پر مانند، معمولاً به اصطلاح فریت بینیتی [3-7]، جاسازی شده با ذرات آستنیت باقیمانده (شکل 2) است. با استفاده از پراش X-ray و میکروسکوپ الکترونی عبوری نشان داده شده است [9] که یک فاز BCC بدون کاربرد است. بعلاوه، پراش بازپختی الکترونی با دقت بالا high-resolution electron backscatter (HR-EBSD) (diffraction) در یک [11] FEGSEM نشان داده است که در آسفریت از نظر کریستالوگرافی بوسیله رابطه جهت Kurdjumov-Sachs به هم مربوط می شوند:  $\{111\}\alpha\{011\}\gamma$  و  $(110)\alpha(111)\gamma$  که مشخصات کریستالوگرافی همچون آسفریت دارد که در چدن داکتیل آستمپر شده تشکیل می یابد [12].

### 3-3 روش تجزیه آستنیت

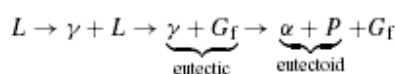
چندین نفر نشان داده اند که افزودنی های آلیاژی به چدن خاکستری بطور موثر ترتیب استحاله را برای تولید یک محدوده از میکروساختارها اصلاح می کنند. برای مثال، Hayrynen و همکاران [5]، Mo و Cu را در چدن خاکستری Fe-C-Si تغییر

دادند و نشان دادند که میکروساختار کاملاً "آسفریتی می تواند در اندازه های کوچک تولید شود که در اصل، نیاز به آستمپرینگ را حذف می کند. کار حاضر همچنین نشان داده است که تغییر سیستماتیک مقادیر Mo, Mn, Si, Cu در طی ریخته گری می تواند محدوده وسیع از میکروساختارهای ریختگی (پرلیت کامل، مارتنزیت یا آسفریت با مقادیر آلیاژی بالا همچنین تولید کننده کاربیدهای آلیاژی) را تولید کند.

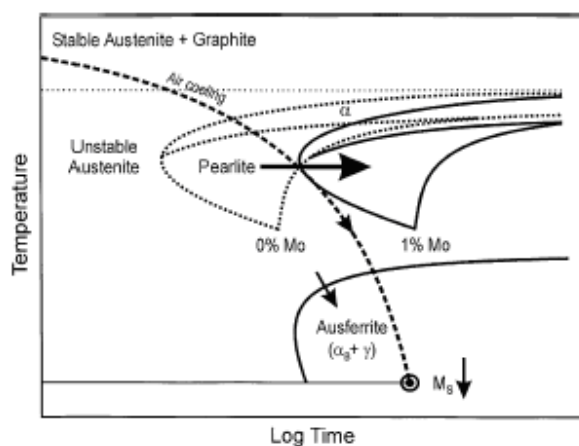
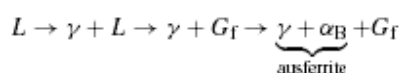
جدول (5): اثر Cu بر میکروساختار ریختگی Fe-3.2C-wCu-xMo-0.55Mn-2.0Si

Mo(%)	Cu(%)	آستنیت(%)	بینیت(%)	پرلیت(%)	گرافیت(%)
0.32	0.91	0	0	100	6.8
	1.26	0	0	100	6.5
	1.40	0	0	100	6.6
	1.48	0	3.0	97	7.1
	1.65	0	4.1	95.9	7.5
	1.72	0	3.2	96.8	7.8
0.53	0.78	2.6	10.9	86.5	6.3
	0.98	12.3	48.6	33.8	6.2
	1.05	13.4	55	31.6	6.7
	1.14	19.2	58.6	22.3	6.9
	1.36	23.5	65	11.5	7.3
	1.75	23	68.2	8.8	7.1
	1.79	27.8	68.1	4.7	7.8

ترتیب عمومی استحاله در چدن خاکستری ریختگی طی سرد شدن پیوسته تا دمای محیط شبیه به آنچه که بوسیله آستمپرینگ تولید می شود است. با وجود این، میکروساختارهای تولید شده بوسیله فرایند اخیر بطور قابل توجه تاثیر گذارند بوسیله : 1- شرایط آستنیت کردن (دمای آستنیت کردن و زمان نگهداری) 2- دما (و زمان) که آستنیت به بینیت و غیره تجزیه می شود [13]. بنابراین میکروساختار نهایی چدن خاکستری آستمپر شده به تعداد متغیراتی که آنرا برای مقایسه مستقیم با کار حاضر مشکل می کند، وابسته است. تجزیه آستنیت در چدن خاکستری ریختگی ممکن است براحتی با استفاده از دیاگرامهای استحاله سرد کردن پیوسته (CCT) توضیح داده شود. اما، این دیاگرامها برای تولید در طی ریخته گری شمشهای با قطر بزرگ (30mm) مشکل است همچنانکه نرخ سرد کردن زیاد (100-200 °C بر دقیقه در محدوده دمایی 300-600 °C) تغییر نمی یابد. یک دیاگرام CCT شماتیک برای چدن خاکستری هایپرئوتکتیک در شکل 5 داده شده است که روش مورد انتظار تجزیه آستنیت را همچون تابعی از مقدار آلیاژ (Mo در این دیاگرام) نشان می دهد. برای مقادیر کم از Mo، استحاله ها زیر مورد انتظار هستند [2و5]:



اما مقادیر بزرگتر عناصر آلیاژی همچون Mo تمایل به تغییر ناحیه تولیدی استحاله نفوذی با زمانهای طولانی تر بدون تغییر ناحیه بینیت بطور افزایشی دارد [5]، بنابراین اجازه می دهد تا آسفریت تشکیل شود :



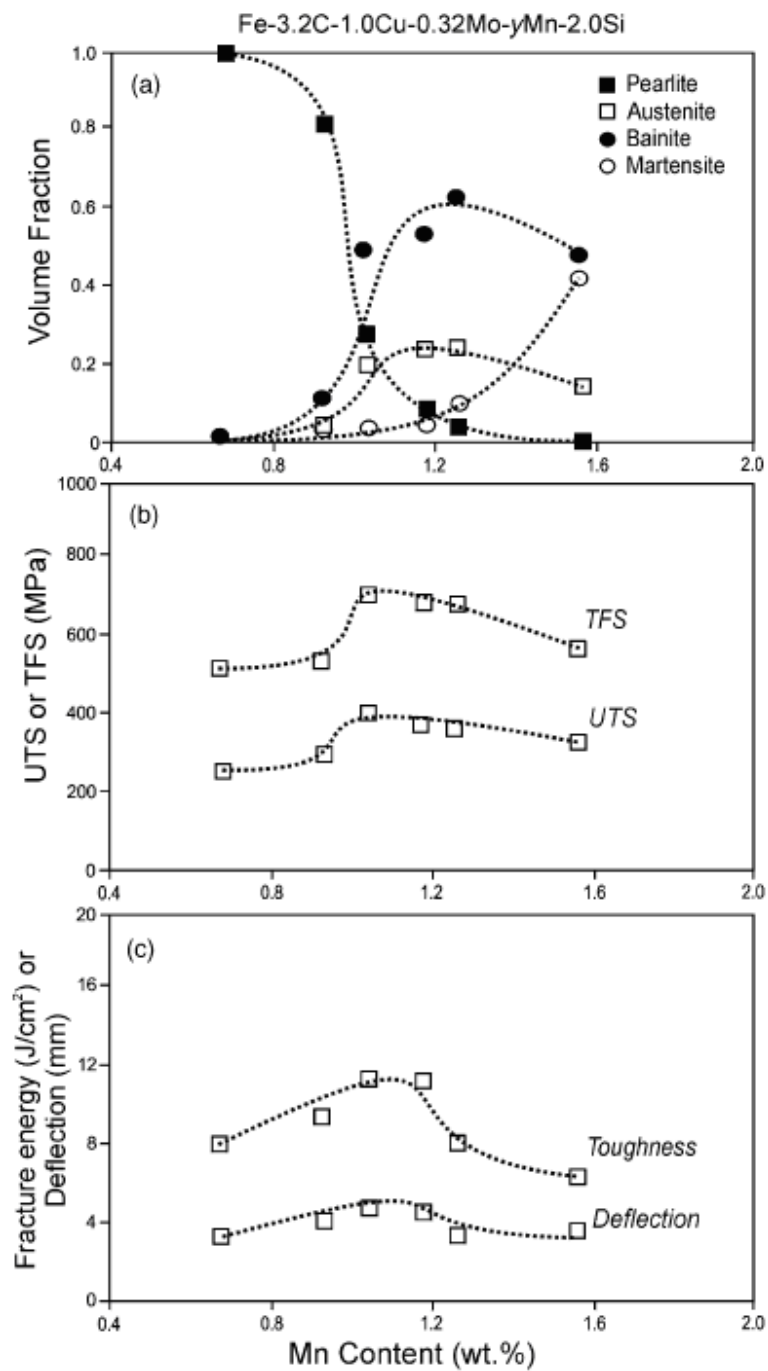
شکل (5) : دیاگرام CCT شماتیک تاثیر افزودنی های آلیاژی (همچون Mo) بر موقعیت ناحیه تولیدی استحاله ای فریت، پرلیت، آسفریت و مارتنزیت.

نوع بینیت تشکیل شده در داخل فاز آستنیت طی سرد شدن پیوسته بوسیله غلظت و نوع افزودنی های آلیاژی تاثیرگذار خواهد بود و ممکن است از بینیت بالایی تا بینیت پایینی تغییر یابد [13]. برای مقادیر پایین  $MO (>1.0\%)$ ، میکروساختار زمینه شامل فریت بینیت با کاربید آزاد و آستنیت باقیمانده با کربن اشباع شده است [5 و 9 و 13]. غلظتهای بالا از عناصر آلیاژی همچون Mn، همچنین قابلیت سختی پذیری آلیاژ را افزایش می دهد و مقداری مارتنزیت در طی سرد شدن پیوسته تشکیل می شود (همچنانچه در شکل a6 نشان داده شده است). عناصر آلیاژی معین همچنین تمایل قوی برای جدایش در محلهای مختلف در میکروساختار دارند بعلاوه کاربیدهای آلیاژی تشکیل می دهند. جدایش و تشکیل کاربید یک اثر مضر بر خواص مکانیکی چدن خاکستری دارند همچنانکه در بخش 3-4 بحث می شود.

### 3-4- تاثیر میکروساختار بر خواص مکانیکی

کلاس استاندارد 35 چدن خاکستری بطور کامل پرلیتی با یک UTS و FTS اسمی 252 و 475 MPa، (به ترتیب) می باشد [2]. آلیاژ اصلی آزمایشی داده شده در جدول (2) با یک UTS و FTS، 285 و 530 MPa (به ترتیب) معلوم شد، با وجود اینکه این آلیاژ همچنین یک میکروساختار کاملاً پرلیتی را نشان می دهد. بهبود در خواص مکانیکی احتمالاً نتیجه افزودن 1.0 Cu است که شناخته می شود که استحکام دهنده محلول جامد قابل قبول فریت و همچنین بعنوان ریزکننده فضای پرلیت عمل می کند [2].

مثالهای انتخاب شده از اثر افزودنی های آلیاژی بر خواص مکانیکی چدن خاکستری در شکل b,c1 و b,c6 داده شده، نشان می دهد که برای Fe-3.2C-1.0Cu-0.55Mn-2.0Si یک افزایش در مولیبدن، افزایش در UTS و FTS با بهبود قابل توجه در مقاومت به ضربه شاری و داکتیلیته در طی خمش عرضی را نتیجه می دهد (شکل c1). می توان دید که ترکیب بهینه خواص مکانیکی برای یک آلیاژ با مقدار 0.7 Mo بدست می آید که به میکروساختار زمینه 100٪ آسفریت مربوط می شود. در مقادیر بالاتر Mo، یک افت جزئی در خواص مکانیکی وجود دارد که احتمالاً نتیجه جدایش مولیبدن به مرزهای سلول یوتکتیک در طی ریخته گری و همچنین از طریق تشکیل کاربیدهای مولیبدن در این ناحیه ها باشد. برای Fe-3.2C-1.0Cu-0.32Mo-2.0Si، یک افزایش در منگنز تا 1/1٪ همچنین UTS و FTS (شکل b6) و مقاومت به ضربه و داکتیلیته (شکل c6) را، اما با یک مقدار کمتر از 1.0 Mo، بهبود می بخشد. در این آلیاژ، ترکیب بهینه در خواص مکانیکی با یک میکروساختار زمینه شامل 27٪ پرلیت، 70٪ آسفریت و 3٪ مارتنزیت همراه می شود (جدول 4).

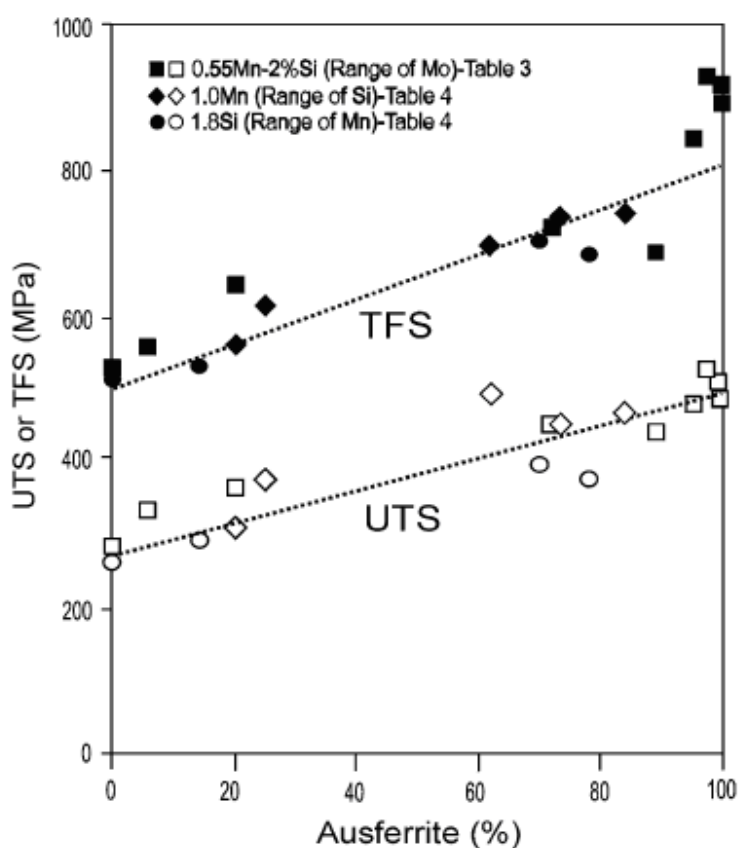


شکل 6- تاثیر منگنز بر Fe-3.2C-1.0Cu-0.32Mo-2.0Si

فازهای حاضر در میکروساختار ریختگی b,c : خواص مکانیکی.

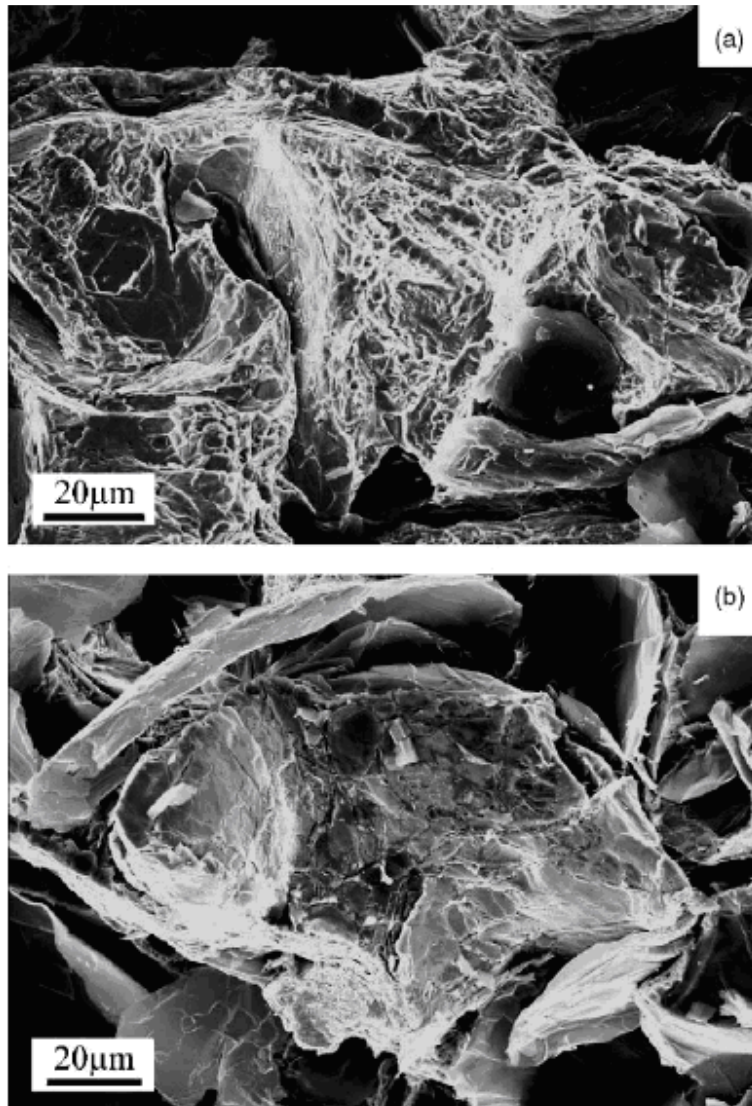


شکل 7 توضیح می دهد که چگونه UTS و FTS بوسیله میزان ارائه آسفریت در میکروساختار برای آلیاژهای داده شده در قسمت 1-3 تحت تاثیر قرار می گیرند. یک رابطه خطی معقول بین مقدار آسفریت و استحکام وجود دارد. پراکندگی در داده ها احتمالاً نتیجه تاثیر عنصر آلیاژی داده شده است: 1- استحکام دهی محلول جامد یک فاز خاص، 2- گرایش آن به جدایش به مرزها و فازهای مختلف، 3- تمایل تشکیل کاربید آن و 4- تاثیر آن بر قابلیت سختی پذیری [10]. کسرهای نسبی از فازها (پرلیت، آسفریت و مارتنزیت) در میکروساختار مفروض با نوع بینیت که نسبت آستنیت/بینیت را در آسفریت تشکیل می دهد، نیز احتمالاً فاکتورهای سهمیم در پراکندگی هستند.



شکل 7- تاثیر کسر حجمی آسفریت در میکروساختار ریختگی بر UTS و FTS

شکل 7 بطور واضح نشان می دهد که یک افزایش در آسفریت، یک افزایش اساسی در خواص مکانیکی را نتیجه می دهد. یک آزمایش سطوح شکست نمونه های TFS نشان داد که شکست بوسیله گسستگی لایه های گرافیت در مقادیر تنش پایین شروع می شود که میکرو ترک ها را ایجاد می کند (شکل a8).



شکل 8- میکروگرافهای اسکن الکترونی با نشان دادن سطح شکست a: چدن خاکستری آسفریتی و b: چدن خاکستری پرلیتی معمولی.

شکست نشان می دهد که بوسیله میکرو ترک ها از میان گرافیت و زمینه اتفاق می افتد جایی که برای مورفولوژی گرافیت مفروض، تنش شکست یک تابع از استحکام و تافنس زمینه است. در مقایسه با یک میکروساختار پرلیتی (شکل b8)، انتشار ترک از میان آستنیت بطور منطقی مشکل تر از طریق نرخ بالای کار سختی این فاز با استحاله به مارتنزیت در طی تغییر شکل، یک پدیده به اصطلاح "استحاله-پلاستیسیته" (TRIP) است [10]. بنابراین مرزهای فاز آستنیت/بینیت همراه با داکتیلیته خوب

بینیت [5]، انرژی قابل ملاحظه برای انتشار ترک نیاز دارد. در مجموع، این فاکتورها، یک استحکام و تافنس خیلی بالاتر چدن خاکستری آسفریتی را در مقایسه با گریدهای پرلیتی معمول را نتیجه می دهند [6 و 7 و 14]. نتایج حاضر نشان داده است که افزودنی های آلیاژی قویا" بر نوع و توزیع اجزای میکروسکوپی در یک چدن خاکستری ریختگی تاثیر می گذارد. یک آلیاژ با ترکیب تقریبی  $Fe-3.2C-1.0Cu-0.55Mn-0.7Mo-2.0Si$  شامل 100٪ آسفریت با این آلیاژ، ترکیب عالی از خواص مکانیکی را نشان می دهد:  $UTS=530MPa$   $TFS=920Mpa$  و انرژی ضربه شارپی و شکست  $mm6$  در طی تست عرضی (خط چین در شکل 1). توجه داشته باشید که Mo بیش از 0/7٪، تشکیل کاربید مولیبدن را در مرزهای سلول یونکتیک با یک کاهش پیوسته در خواص مکانیکی تقویت می کند. از آنجاییکه کاربیدهای آلیاژی همچنین یک اثر مضر بر قابلیت ماشینکاری چدن دارند [2]، افزودن Mo بیش از 0/7٪ باید جلوگیری شود.

#### 4- نتایج

افزودن آلیاژی Mo, Mn, Si, Cu در طی ریخته گری با قالب ماسه ای یک چدن خاکستری نوع 35 از ASTM با ترکیب Fe- $3.2C-0.55Mn-1.41Si$  برای تولید یک محدوده وسیع از میکروساختارها و خواص مکانیکی مشخص شد. معلوم شد که:

- 1- راجع به میزان و نوع افزودنی آلیاژی، گرافیت نوع E در همه آلیاژها تشکیل می شود.
- 2- برای چدن خاکستری بدون Mo، ترکیبات مختلف Mn, Cu, Si، تشکیل یک میکروساختار شامل یک پراکندگی از آستنیت و فریت بینیتی (به اصطلاح آسفریت) را تقویت می کند اما یک آلیاژ پرلیتی کامل شامل لایه های گرافیت تولید شد.
- 3- یک زمینه آسفریت در یک آلیاژ شامل Mo/0.32 بوسیله اضافه کردن بیشتر از Mn/1.02 برای همه مقادیر Si تولید شد یا برای یک مقدار ثابت Mn/1.21 و بیشتر از Si/1.41، یک میکروساختار مارتنزیتی شامل یک کسر کوچک از آستنیت باقیمانده ایجاد شد.
- 4- یک رابطه خطی معقول بین کسر حجمی آسفریت تشکیل شده و استحکام با مقداری پراکندگی در داده ها همچون یک نتیجه طبیعی از یک عنصر آلیاژی مفروض به جدایش و تشکیل کاربیدهای آلیاژی در طی ریخته گری وجود دارد.
- 5- ترکیب بهینه خواص مکانیکی در یک چدن خاکستری ریختگی با ترکیب تقریبی  $Fe-3.2C-1.0Cu-0.7Mo-0.55Mn-2.0Si$  تولید شد که یک میکروساختار 100٪ آسفریت بدون کاربید، شامل لایه های گرافیت نوع E را نشان می دهد. این آلیاژ یک میکروساختار و خواص مکانیکی قابل مقایسه با چدن خاکستری آستمپر شده را بدون مشکلات زیاد آستمپرینگ، دارد.

مراجع و مراجع:

[www.felezat.com](http://www.felezat.com)

[www.iran-eng.com](http://www.iran-eng.com)

[www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)

American Foundry Society web page: <http://www.afsinc.org>, 2002 [1]

H.T. Angus, Cast Iron: Physical and Engineering Properties, 2nd ed [2]

Butterworths, 1976

B.V. Kovacs, J.R. Keough, AFS Trans. 101 (1993) 283 [3]

(M.D. Vanmaldegiam, K.B. Rundman, AFS Trans. 94 (1986 [4]

249

(K.L. Hayrynen, D.J. Moore, K.B. Rundman, AFS Trans. 106 (1998 [5]

665

C.-H. Hsu, Y.-H. Yu, S.-C. Lee, Mater. Chem. Phys. 63 (2000) 75 [6]

K. Brandenburg, K.L. Hayrynen, J.R. Keough, Gear Technol. 18 [7]

42 (2001)

Standard Specification for Gray Iron Castings, ASTM A48-94a [8]

16 (1994)

W. Xu, M.Sc. Thesis, Xi'an University of Technology, China, 1991 [9]

R.W.K. Honeycombe, H.K.D.H. Bhadeshia, Steels – Microstructure [10]

and Properties, 2nd ed., Edward Arnold, London, UK

1995

M. Ferry, W. Xu, Mater Charact., in press [11]

T.J. Marrow, H. Cetinel, N. Wardman, I. Brough, H. Bolyan, Proceedings [12]

.of the 20th ASM Heat Treating Society Conference, St

Louis, USA, 2000, p. 491

.H.K.D.H. Bhadeshia, Bainite in Steels, 2nd ed., Institute of Materials [13]

London, UK, 2001

.W. Xu, M. Ferry, Y. Wang, Scripta Mater. 51 (2004) 709 [14]

## PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

<http://www.kf-splh.hr/periodni/en/>

**PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS**

GROUP I A 2 IIA 3 IIIB 4 IVB 5 VB 6 VIB 7 VIIB 8 VIII B 9 10 11 IB 12 IIB 13 IIIA 14 IVA 15 VA 16 VIA 17 VIIA 18 VIIIA

RELATIVE ATOMIC MASS (1)

Legend:

- Metal
- Semimetal
- Nonmetal
- Alkali metal
- Alkaline earth metal
- Transition metals
- Lanthanide
- Actinide
- Chalcogens element
- Halogens element
- Noble gas

STANDARD STATE (25 °C, 101 kPa)

- Ne - gas
- Fe - solid
- Ga - liquid
- ☒ - synthetic

Copyright © 1998-2003 E.H.G. (en)@kf-splh.hr

Editor: Aditya Varshana (advivar@netlinx.com)

تابستان 1390 مجید غفوری