

اثر عناصر آلیاژی در فولادهای زنگ نزن

دکتر جلال دانش
مدیر فنی شرکت فن آوری پایا مواد



عناصر آلیاژی مختلف اثرات خاصی بر خصوصیات فولادهای زنگ نزن دارند. این اثرات در ترکیب با فرآیندهای دیگر تولید مانند عملیات حرارتی مشخص کننده خواص، یک گرید ویژه فولاد می‌باشند. هر گرید فولاد برای ایجاد خواص ویژه‌ای طراحی می‌شود. این خواص می‌تواند استحکام کششی، تنش تسلیم، چقرمگی، مقاومت به خوردگی در یک محیط خاص، انعطاف پذیری، مقاومت به اکسیداسیون، مقاومت به دمای بالا، حفظ خواص در دماهای پایین و یا ترکیبی از آنها باشد. در ادامه اثر هر عنصر آلیاژی در فولادهای زنگ نزن به طور خلاصه آورده شده است.

باید توجه داشت که اثر عناصر آلیاژی در برخی جنبه‌ها بین گروه‌های مختلف فولادهای زنگ نزن متفاوت است.

کروم (Cr)

کروم مهمترین عنصر آلیاژی در فولادهای زنگ نزن است و بطور اساسی به این فولادها با ایجاد یک فیلم اکسیدی، مقاومت در برابر خوردگی می‌دهد. تمام فولادهای زنگ نزن، حاوی حداقل ۱۰/۵ درصد کروم می‌باشند. معمولاً مقاومت در برابر خوردگی با افزایش مقدار کروم افزایش می‌یابد. کروم مقاومت در برابر اکسید شدن در دمای بالا را نیز افزایش داده و محدوده پایداری و ریزساختار فریتی را توسعه می‌بخشد.

نیکل (Ni)

دلیل اصلی برای اضافه کردن نیکل ایجاد ریزساختار آستینیتی است. نیکل عموماً انعطاف پذیری و چقرمگی را افزایش می‌دهد. همچنین نرخ خوردگی در حالت فعال را کاهش داده و بنابراین در محیطهای اسیدی سودمند است. در فولادهای رسوب سخت نظیر PH 4-17 نیز نیکل استفاده می‌شود تا ترکیبات بین فلزی که برای افزایش استحکام بکار می‌روند را شکل دهد. در فولادهای زنگ نزن مارتینزیتی، افزودن نیکل در گریدهای با محتوای کربن پایین جوش پذیری را بهبود می‌بخشد.

نیکل شکل پذیری و انعطاف پذیری را افزایش داده و باعث افزایش استحکام در دمای بالا می‌شود.

مولیبدن (Mo)

مولیبدن بطور قابل توجهی هم مقاومت در برابر خوردگی موضعی و هم خوردگی یکنواخت را افزایش می‌دهد. این عنصر در فولادهای زنگ نزن مقداری استحکام مکانیکی را افزایش داده و ریزساختار فریتی را قویاً پایدار می‌کند. ولی، مولیبدن ریسک شکل‌گیری فازهای ثانویه در فولادهای آستینیتی، داپلکس و فریتی را بالا می‌برد. در فولادهای مارتینزیتی، مولیبدن سختی حاصل از دماهای بازپخت نسبتاً بالا را با ایجاد کاربید افزایش می‌دهد. این عنصر استحکام دمای بالا و مقاومت به خزش را بهبود می‌بخشد. مولیبدن محدوده روئین شدن را گسترش داده و مقاومت به خوردگی حفره‌ای به ویژه در محیط‌های حاوی کلرید را افزایش می‌دهد.

مس (Cu)

مس مقاومت در برابر خوردگی در اسیدهای معین را زیاد می‌کند و یک عنصر آستنیت‌زا است. مس با کاهش اثر کار سختی باعث بهبود قابلیت ماشین‌کاری می‌شود. این عنصر گاهی برای بهبود شکل‌پذیری افزوده می‌شود. مس حساسیت به خوردگی تنش‌ی را کاهش داده و با ایجاد رسوب نظیر PH 4-17 می‌تواند قابلیت پیر سختی ایجاد کند.

منگنز (Mn)

منگنز در فولادهای زنگ‌نزن عموماً برای بهبود انعطاف‌پذیری داغ استفاده می‌شود. اثر آن بر تعادل فریت-آستنیت با دما تغییر می‌کند: در دمای پایین منگنز یک تثبیت‌کننده آستنیت است ولی در دماهای بالا فریت را تثبیت می‌کند. منگنز قابلیت انحلال نیتروژن را افزایش می‌دهد و برای گرفتن نیتروژن بالا در فولادهای آستنیتی و داپلکس‌بکارگیری می‌شود. منگنز همچنین به عنوان یک آستنیت‌زا در فولادهای زنگ‌نزن سری 200 می‌تواند جایگزین مقداری نیکل مورد نیاز در فولاد زنگ‌نزن شود. افزودن ۲ درصد منگنز تأثیری در استحکام، انعطاف‌پذیری و چقرمگی ندارد.

سیلیسیم (Si)

سیلیسیم مقاومت به اکسیداسیون در دماهای بالا و مقاومت به خوردگی در حلالهای اکسیدکننده در دماهای پایین را افزایش می‌دهد. این عنصر ریزساختار فریتی را پایدار کرده و باعث افزایش استحکام می‌شود. سیلیسیم پوسته مقاومی در دمای بالا ایجاد می‌کند که در سیکل‌های حرارتی پایدار می‌ماند. این عنصر مقاومت به کربوره شدن را افزایش می‌دهد. در مقادیر کم، سیلیسیم به عنوان یک اکسیژن‌زدا در اکثر فولادهای زنگ‌نزن اضافه می‌شود. همچنین سیلیسیم و مس در مقادیر کم به فولادهای آستنیتی حاوی مولیبدن افزوده می‌شوند تا مقاومت به اسید سولفوریک را افزایش دهند.

کربن (C)

کربن یک آستنیت زای قوی است و بطور قابل توجهی استحکام مکانیکی را افزایش می‌دهد. ولی، مقاومت به خوردگی بین دانه‌ای را بسبب تشکیل کاربید کاهش می‌دهد. در گریدهای جدید، به همین خاطر مقدار کربن کاهش یافته تا اثر خوردگی بین دانه‌ای کم شود. در فولادهای زنگ نزن فریتی، کربن به شدت هم چقرمگی و هم مقاومت در برابر خوردگی را کاهش می‌دهد. در فولادهای مارتنزیتی کربن سختی و استحکام را افزایش می‌دهد ولی چقرمگی را پایین می‌آورد.

نیتروژن (N)

نیتروژن یک آستنیت زای بسیار قوی است که استحکام مکانیکی را نیز به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. نیتروژن مقاومت به خوردگی موضعی را به ویژه در ترکیب با مولیبدن افزایش می‌دهد. در فولادهای زنگ نزن آستنیتی و داپلکس، نیتروژن مقاومت به خوردگی بین دانه‌ای و حفره‌ای را افزایش می‌دهد. این اثر به خاطر این است که Cr_2N به جای $Cr_{23}C_6$ در مرز دانه تشکیل می‌شود. در فولادهای زنگ نزن فریتی، نیتروژن مقاومت به خوردگی و چقرمگی را قویاً کاهش خواهد داد. در فولادهای مارتنزیتی، نیتروژن سختی و استحکام را افزایش می‌دهد ولی چقرمگی را پایین می‌آورد.

تیتانیوم (Ti)

تیتانیوم یک فریت‌زا و کاربید زای قوی است. بنابراین با کم کردن کربن محتوا تأثیر مضاعفی در ایجاد ساختار فریتی دارد. تیتانیوم در برخی فولادهای آستنیتی به منظور حذف اثر مخرب کربن اضافه شده است تا مقاومت به خوردگی بین دانه‌ای را افزایش دهد (گریدهای پایدار شده) این عنصر همچنین خصوصیات مکانیکی را در دماهای بالا افزایش می‌دهد. در فولادهای رسوب سخت، تیتانیوم جهت ایجاد ترکیبات بین فلزی برای افزایش استحکام استفاده می‌گردد. در فولادهای زنگ نزن فریتی تیتانیوم به منظور بهبود چقرمگی، شکل‌پذیری و مقاومت به خوردگی افزوده می‌شود. در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی، تیتانیوم با کربن ترکیب شده و سختی مارتنزیت را کاهش می‌دهد ولی مقاومت به تمپر را بهبود می‌بخشد. تیتانیوم می‌تواند به عنوان یک ریزکننده دانه (Grain refiner) تلقی شود.

تیتانیوم در مذاب و در حضور نیتروژن تولید نیتريد تیتانیوم (TiN) می کند ولی در فاز جامد هم نیتريد و هم کاربرد تیتانیوم (TiC) می تواند وجود داشته باشند. به منظور پایدار سازی کامل فولاد زنگ نزن نسبت استوکیومتری تیتانیوم باید به صورت زیر باشد:

$$Ti \geq 4 (\%C) + 3.4 (\%N)$$

البته Ti فلز فعالی بوده و با عناصر مختلف واکنش می دهد. مثلا در ساختار با گوگرد واکنش داده و تشکیل Ti_2S می دهد.

نایوبیوم (Nb)

نایوبیوم هم یک فریت زای قوی و کاربیدزای قوی است و مثل تیتانیوم ساختار فریتی را پایدار می کند. این عنصر در فولادهای آستینیتی اضافه می شود تا مقاومت به خوردگی بین دانه های (گریدهای پایدار شده) را بهبود بخشد، نایوبیوم همچنین خواص مکانیکی را در دماهای بالا، افزایش می دهد. در فولادهای زنگ نزن فریتی، نایوبیوم و/یا تیتانیوم بعضی اوقات اضافه می شود تا چقرمگی را بهبود بخشد و مقاومت نسبت به حساس شدن را اصلاح کند تا ریسک خوردگی بین دانه های را به حداقل رساند. در فولادهای مارتنزیتی نایوبیوم سختی را کاهش و مقاومت به بازپخت را افزایش می دهد. نایوبیوم همچنین به عنوان یک ریز کننده دانه می تواند به کار رود.

استفاده هم زمان از نایوبیوم و تیتانیوم در فلز جوش فولادهای زنگ نزن، خواص مکانیکی بهتری ایجاد می کند. این امر به خاطر ریز دانه شدن و اصلاح مورفولوژی رسوبات می باشد. در این شرایط بهترین نسبت از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\% Ti + 4/7 (\% Nb) \geq 0.15 + 4 (C + N)$$

در استانداردهای ایالات متحده نایوبیوم با نام کلمبیوم (Cb) شناخته می شود.

آلومینیم (Al)

آلومینیم در صورتی که به مقدار قابل بیانی اضافه شود مقاومت به اکسیداسیون را بهبود می دهد. در برخی آلیاژهای مقاوم به حرارت، آلومینیم به این منظور افزوده می شود. در فولادهای رسوب سخت برای

تشکیل ترکیبات بین فلزی که استحکام آلیاژ را در حالت پیرشده افزایش می دهند به کار گرفته می شود. آلومینیوم یک فریت زای بسیار قوی است و سختی پذیری فولادهای زنگ نزن را کاهش می دهد.

کبالت (Co)

کبالت به عنوان یک عنصر آلیاژی در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی به منظور افزایش سختی و مقاومت به بازیخت به ویژه در دماهای بالا بکار می رود.

وانادیوم (V)

وانادیوم در دماهای پایین ترکیبات کاربیدی و نیتریدی تشکیل می دهد. این عنصر فریت را در ریزساختار توسعه داده و چقرمگی را افزایش می دهد. وانادیوم سختی فولادهای مارتنزیتی را با اثر گذاری بر نوع کاربیدهای موجود افزایش می دهد. وانادیوم تنها در فولادهای زنگ نزن سختی پذیر استفاده شده و مقاومت به بازیخت را بالا می برد.

تنگستن (W)

تنگستن اکنون به عنوان یک ناخالصی در بیشتر فولادهای زنگ نزن معرفی شده است. هرچند در برخی گریدهای خاص این عنصر برای اصلاح مقاومت به خوردگی حفره ای اضافه می شود، مثل فولاد زنگ نزن سوپر داپلکس 4501.

گوگرد (S)

گوگرد به برخی فولادهای زنگ نزن برای ایجاد خاصیت خوش تراشی نظیر فولاد زنگ نزن 416 اضافه می شود. این مقادیر از گوگرد مقاومت به خوردگی، شکل پذیری، جوش پذیری را کمی کاهش می دهد.

سریوم (Ce)

سریوم یکی از فلزات نادر زمین است (REM) و در مقادیر کم به گریدهای مقاومت به حرارت معینی اضافه می‌شود تا مقاومت به اکسیداسیون در دماهای بالا را افزایش دهد.

اثر مرکب عناصر بر ریزساختار فولادهای زنگ نزن

اثر عناصر بر ریزساختارهای فولادهای زنگ نزن در دیاگرام شافلر دلانگ¹ خلاصه شده است. دیاگرام در حالت ساختار بدون کرنش و براساس این حقیقت بنا شده که عناصر آلیاژی می‌توانند در دو دسته پایدارکننده‌های فریت و پایدارکننده‌های آستنیت تقسیم بندی شوند. اثر پایدارکننده‌های آستنیت در شاخصی به عنوان نیکل معادل و اثر عناصر فریت زا در شاخصی بنام کروم معادل محاسبه می‌شود:

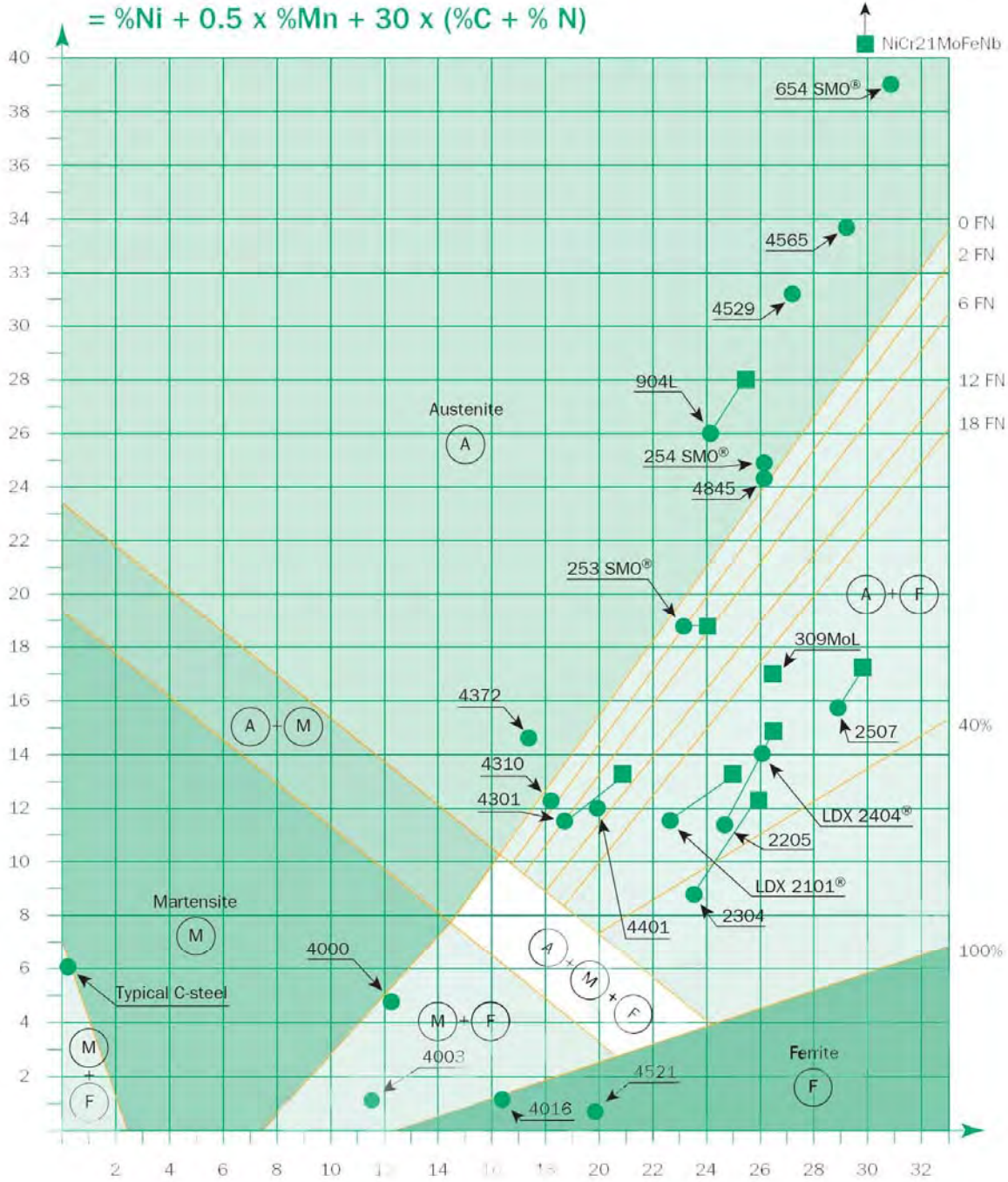
$$\text{(Nickel equivalent)} \quad \text{معادل نیکل} = \%Ni + 0.5 \times \%Mn + 30 \times (\%C + \%N)$$

$$\text{(Chromium equivalent)} \quad \text{معادل کروم} = \%Cr + \%Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%Nb$$

در این روش این امکان وجود دارد تا اثر مرکب عناصر آلیاژی را در نظر بگیریم. دیاگرام در اصل برای فلز جوش تنظیم شده است، یعنی ساختار را بعد از ذوب و سردکردن سریع شرح می‌دهد ولی این دیاگرام نمایی سودمند از اثر عناصر آلیاژی آلیاژهای کار شده و تاب دیده (آنیل شده) ارائه می‌دهد. لیکن، فولاد تاب دیده با محتوای فریت پیش بینی شده در محدوده ۵٪ - ۰ طبق دیاگرام در عمل مقادیر کمتر فریت دارا می‌باشد.

لازم به ذکر است که دیاگرام شافلر دلانگ تنها نمودار ارائه شده برای ارزیابی ساختار فولادهای زنگ نزن نیست. دیاگرامهای گوناگون متعددی تا کنون منتشر شده‌اند. دیاگرام WRC-92 با همکاری انجمن بین‌الملل جوشکاری تهیه شده و بسیار مورد استفاده قرار گرفته است.

Nickel equivalent =
= %Ni + 0.5 x %Mn + 30 x (%C + % N)



- Parent material
- Designed fillers

Chromium equivalent =
= %Cr + %Mo + 1.5 x %Si + 0.5 x %Nb

دیاگرام شفلر دلانگ