

# ترک گرم و نقش فریت در جوشکاری فولادهای زنگ نزن

## آستینیتی

امیر حسینی کلورزی<sup>۱</sup>

۱- وبلاگ مهندسی جوش، [www.weldeng.net](http://www.weldeng.net)

### چکیده

فولادهای زنگ نزن آستینیتی در حین جوشکاری بشدت مستعد ترک گرم میباشند. بدین منظور در اغلب موارد برای جوشکاری این فولادها از فلز پرکننده ای استفاده میشود که جوش حاصل از آن دارای مقداری فاز فریت باشد. فاز فریت در احتمال ایجاد ترک گرم در جوش فولادهای زنگ نزن آستینیتی نقش موثری ایفا میکند. فریت در مقایسه با آستینیت، ناخالصیهایی مانند گوگرد، فسفر، سرب و قلع را بهتر در خود حل میکند. این عناصر میتوانند از ساختار خارج شده و در مرزدانه ها فازهای ثانویه با دمای ذوب پایین تشکیل دهند. این فازها در خلال سرد شدن فلز جوش میتوانند ایجاد ترک گرم نمایند. این موضوع، در مقاله حاضر تشریح شده است.

واژه های کلیدی: جوشکاری، ترک گرم، فولاد زنگ نزن، انجماد فریتی

### مکانیزم ایجاد ترک گرم

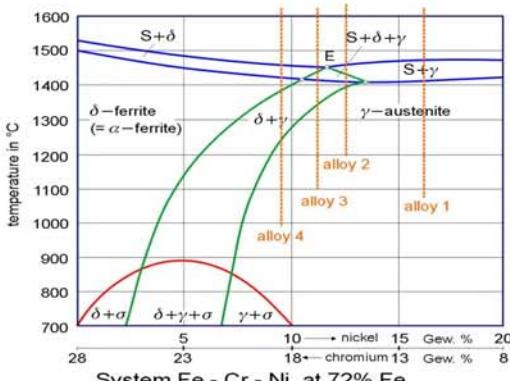
در خلال انجماد معمولاً فلز جوش منجمد شده ترکیب شیمیایی متفاوتی از فلز مذاب دارد. این تفاوت ناشی از اختلاف اکتیویته شیمیایی عناصر آلیاژی در حالت جامد و مذاب در یک غلظت مشخص میباشد. در نتیجه این پدیده، در قسمت جلوی جبهه انجماد یک لایه نازک مذاب با غلظت بیشتر یا کمتر عناصر موجود تشکیل میشود.

در سیستم Fe-Cr-Ni و خصوصاً فولادهای زنگ نزن آستینیتی این پدیده بسیار پیچیده تر است. حالیت برخی از عناصر مانند گوگرد، فسفر، سرب و قلع در فاز آستینیت بسیار پایین میباشد، در نتیجه در خلال انجماد و تشکیل فاز جامد آستینیت، لایه مذاب ذکر شده از این عناصر غنی میگردد. با پیشرفت انجماد، به نقطه ای میرسیم که تنها مقدار کمی مذاب بین دانه های منجمد شده باقی میماند که در اصل تشکیل دهنده مرزدانه ها است(شکل ۱). اما این لایه مذاب دارای درصد بالاتری از عناصر ناخالصی مانند گوگرد است در نتیجه با تشکیل ترکیبات زود ذوب حاصل از این عناصر، دمای انجماد آن پایین تر از فلز زمینه میباشد. وجود چند صدم درصد سولفور آهن در مذاب باقیمانده بین کریستالها، دمای انجماد آنرا تا حدود ۹۸۰ درجه سانتیگراد کاهش میدهد.

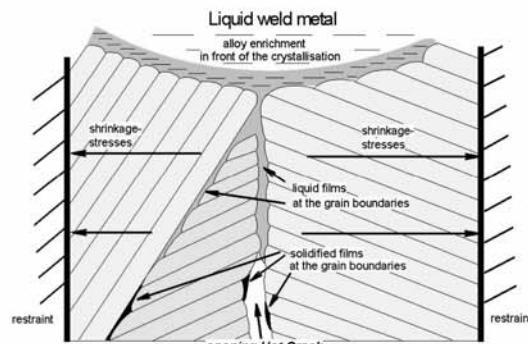
### مقدمه

ترک گرم در جوش، حاصل از گسیختگی در لایه های مذاب موجود در مرزدانه های ناحیه خمیری حوضچه جوش است. آغاز این نوع ترک ناشی از تاثیرات متقابل و پیچیده بین فاکتورهای متالورژیکی و مکانیکی ایجاد شده توسط شب حرارتی تولیدی در خلال جوشکاری میباشد. تقابل فاکتورهای متالورژیکی - حرارتی کنترل کننده میکروساختار ناحیه انجماد و تقابل فاکتورهای مکانیکی - حرارتی کنترل کننده مقادیر تنشها و کرنشهای موضعی و کلی ناحیه جوش هستند[۱].

از طرفی فولادهای زنگ نزن آستینیتی یکی از مستعدترین انواع فولادها به ترک گرم هستند و از آنجایی که کاربرد وسیعی در صنعت دارند، دانستن دلایل ایجاد و همچنین چگونگی پیشگیری از این مشکل در فرآیند جوشکاری این فولادها بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله سعی شده تا به اختصار به این مطلب پرداخته شود.

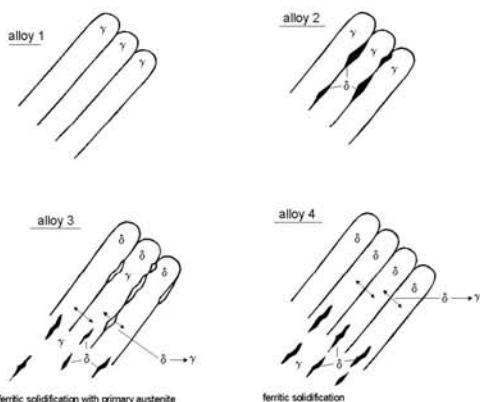


شکل ۲- نمودار فازی آهن-کرم-نیکل در مقدار آهن ۷۲٪



شکل ۱- تشکیل گرم حین انجماد در جوش فولاد زنگ نزن  
استیبی

همانطور که در شکل ۲ ملاحظه میکنید، چهار آلیاژ با مقداری مختلف کرم و نیکل در خلال انجماد در نظر گرفته شده اند. آلیاژ ۱ دارای ۱۲٪ کرم و ۱۶٪ نیکل میباشد و انجماد آن با ایجاد فاز استیتیت آغاز شده و در انتهای نیز ساختار آن کاملاً استینیتی خواهد بود. در آلیاژ ۲ انجماد با فاز استیتیت آغاز شده و مقداری فریت نیز در بین دانه ها ایجاد میشود. آلیاژ ۳ عکس آلیاژ ۲ رفتار کرده و انجماد با فاز فریت شروع شده و مقداری استیتیت نیز بین دانه ها ایجاد میگردد. اما آلیاژ ۴ بطور کامل در فاز فریت منجمد میشود. شکل ۳ ساختار این چهار آلیاژ را در زمان انجماد، بصورت شماتیک نمایش میدهد [۳].



شکل ۳- شماتیک ساختار چهار آلیاژ مشخص شده در شکل ۲ حین انجماد

در حین سرد شدن ساختار هر سه آلیاژ ۲، ۳ و ۴ باید استحالت یافته و به استینیت تبدیل شوند. اما این پدیده در حالت تعادلی اتفاق می افتد و احتیاج به زمان بالا و سرد شدن آهسته دارد. در جوشکاری بدلیل بالا بودن سرعت سرد شدن امکان تکمیل فرآیند

از طرفی در حین سرد شدن، فلز پایه شروع به انقباض میکند و در اثر این انقباض یک تنش کششی به ناحیه جوش اعمال میگردد. اگر مقدار این تنش بیشتر از 1 bar باشد، باعث گسیختگی جوش از ناحیه لایه های مذاب باقیمانده بین دانه ها میشود. این موضوع متاثر از عامل نحوه انجماد و مقدار تنشهای انقباضی و یا به عبارت دیگر ضربی انقباض فلز جوش است [۲].

### نقش فاز فریت

در فاز فریت احتمال وقوع مشکل فوق الذکر بسیار کم است، چراکه از یک طرف مقدار حلالیت عناصر ناخالصی مزبور در فاز فریت بیشتر از استینیت بوده و در نتیجه احتمال ایجاد فازهای زود ذوب ناشی از غنی شدن این عناصر در لایه های مذاب باقیمانده بین دانه ها بسیار کمتر خواهد شد. از طرف دیگر ضربی انبساط و انقباض فاز فریت تقریباً دو سوم فاز استینیت بوده و به تبع آن تنشهای انقباضی ایجاد شده حین انجماد در آن نیز کمتر خواهد بود.

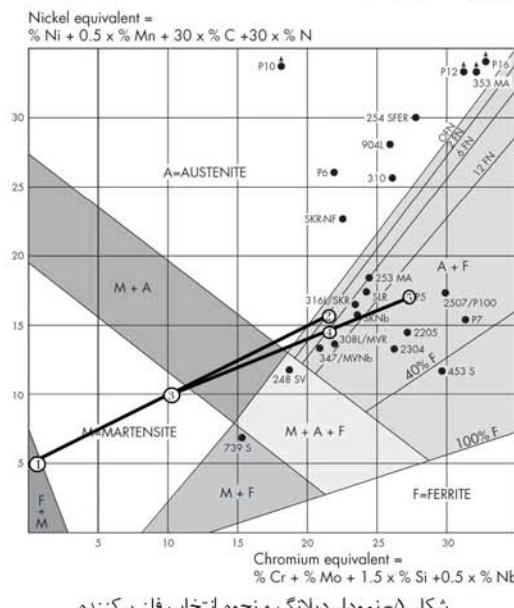
با توجه به توضیحات ارائه شده میتوان نتیجه گرفت در صورتیکه بتوان ترتیبی اتخاذ کرد که جوش فولاد زنگ نزن استینیتی در هنگام انجماد به فاز فریت تبدیل شود و یا به عبارت دیگر انجماد آن فریتی باشد، احتمال ایجاد ترک گرم بشدت کاهش خواهد یافت. برای توضیح بیشتر این موضوع از نمودار فازی آهن-کرم-نیکل در ۷۲٪ آهن (شکل ۲) استفاده میکنیم.

کمک آن میتوان اندازه فاز فریت دلتای موجود در فولاد زنگ نزن آستنیتی را با تکنیک خاص مغناطیسی اندازه گیری کرد<sup>[6]</sup>. در روش استفاده از آنالیز، مقدار فریت را میتوان بصورت درصد و یا بوسیله عدد فریتی (FN) نمایش داد. البته اغلب استفاده از عدد فریتی ترجیح داده میشود. عدد فریتی را میتوان با استفاده از دیلانگ (DeLong) و یا نمودار WRC-92 بدست آورد.

نمودار دیلانگ ابزار فوق العاده ایست برای تعیین فازها (مثلاً مقدار فریت) در فلز جوش. باید این نکته را یادآور شد که نمودارها برای شرایط جوشکاری صادق است که فلز با سرعت نسبتاً بالایی سرد میشود، نه برای شرایط ساخت فلز پایه که سرعت سرد شدن نسبتاً کم است.

در این قسمت با کمک شکل ۵ یک مثال از نحوه بکارگیری نمودار دیلانگ برای تعیین عدد فریتی جوش آورده شده است. اگر یک ورق از فولاد کربنی ( نقطه ۱ ) به یک ورق از فولاد زنگ نزن AWS A5.4:E309MoL-17 ( نقطه ۲ ) با استفاده از الکترود ۳۱۶ ( نقطه ۵ ) جوشکاری شود، برای تعیین ساختار جوش حاصله

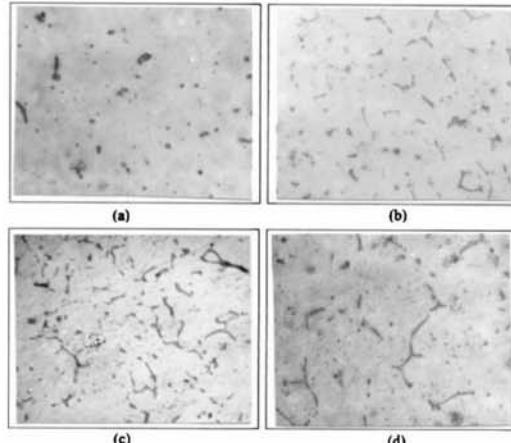
بروش زیر عمل میشود:



شکل ۵- نمودار دیلانگ و نحوه انتخاب فلز پر کننده

ابتدا دو نقطه ۱ و ۲ را که نشاندهنده محل قرارگیری دو فلز پایه در نمودار هستند، با یک خط مستقیم به یکدیگر متصل میکنیم. با فرض اینکه هر دو فلز پایه بطور مساوی در جوش ذوب شوند، وسط این خط (نقطه ۳) را مشخص میکنیم. اکنون خط دیگری از

استحاله وجود نداشته و همواره مقداری فریت در ساختار این آلیاژ ها باقی میماند. این مقدار فریت با قیمانده میتواند شاخص خوبی در انتخاب صحیح مشخصات جوشکاری در مورد کاهش ریسک ترک گرم باشد. شکل ۴ میکروساختار چهار نمونه فوق را پس از سرد شدن و استحاله نشان میدهد [۴].



شکل ۴- میکروساختر چهار الیاز مشخص شده در شکل ۲ پس از سرد شدن

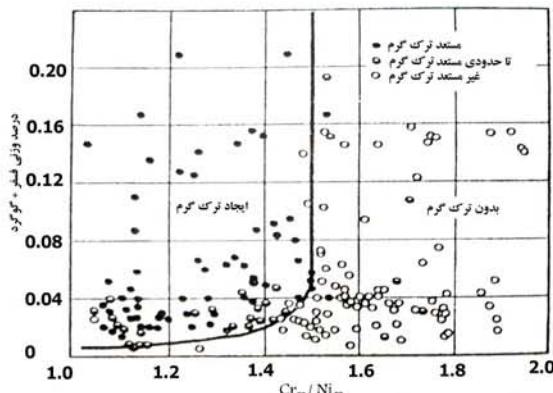
از مجموع موارد گفته شده میتوان به این نتیجه رسید که برای کاهش خطر ترک گرم در جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی باید فلز پرکننده جوش به گونه ای انتخاب شود که ترکیب فلز جوش حاصله بصورت فریتی منجوم شده و یا به عبارت ساده تر اینکه میزان فریت باقیمانده جوش از مقدار معینی بیشتر باشد.

تعیین مقدار فریت

مقدار فریت را میتوان بروشهای مختلفی تعیین نمود. عنوان مثال میتوان آنرا طبق استاندارد E562 ASTM بر اساس نسبت حجمی مشخص کرد. هرچند که روش فوق دقیقترین روش است اما اجرای آن زمان بر بوده و هزینه بردار است. بهمین دلیل مقدار فریت اغلب از طریق استفاده از تجهیزاتی مثل سنجه (Gage) مغناطیسی یا فریت اسکوب و یا بروش محاسباتی با استفاده از ترکیب شیمیایی فلز جوش تعیین میگردد<sup>[۵]</sup>. به این منظور، استاندارد AWS 4.2-91 دستورالعمل استانداردی تدوین نمود که به

استفاده شود. در این حالت حرارت ورودی باید در حداقل مقدار ممکن کنترل شود و امتزاج فلز پایه باید در کمترین حد نگاه داشته شود.

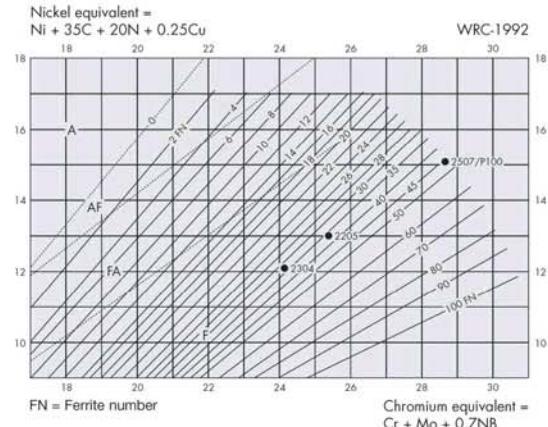
عدد فریتی 12-13 FN DeLong مقاومت خوبی نسبت به ترک گرم ایجاد میکند. تمام فلزات پرکننده آستنیتی استاندارد مانند AWS A5.4:E304L-17, E316L-17, E309MoL-17, E347-15 جوشهایی با عدد فریتی در محدوده فوق الذکر ایجاد میکند. در نتیجه این فلزات پرکننده مقاومت خوبی نسبت به ترک گرم ایجاد میکند. آزمایشات مختلفی برای تعیین ترکیب مناسب جهت کاهش احتمال ترک گرم انجام گرفته که نتایجی با اختلاف جزئی از آنها بدست آمده است. بعنوان مثال در سال ۱۹۷۲ میلادی Takalo و MoisioT Suutala ارتباطه بین نسبت کرم معادل به نیکل معادل، درصد وزنی گوگرد و فسفر موجود در فولاد و حساسیت فولاد نسبت به ترک گرم را برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی بصورت منحنی شکل ۷ نمایش دادند.



شکل ۷- رابطه بین ترکهای انجامدی و نسبت کرم معادل به نیکل معادل

همانگونه که در شکل ۷ دیده میشود وقتی نسبت کرم معادل به نیکل معادل بیشتر از  $1/5$  باشد احتمال بروز ترکهای انجامدی کاهش میابد. با توجه به این موضوع میتوان مرز ناحیه حساس به ترک و ناحیه غیر حساس را توسط یک خط با شیب  $1/5$  در نمودار دیلانگ مشخص نمود (شکل ۸).[۸]

این نقطه به نقطه نمایانگر ترکیب الکترود در نمودار (نقطه ۵) رسم میکنیم. با استفاده از این فرضیه که فلز جوش شامل  $30\%$  از فلز پایه و  $70\%$  از فلز پرکننده میگردد، نقطه ۴ را که در محلی برابر  $70\%$  طول خط رابط نقاط ۳ به ۵ است، تعیین مینماییم. این نقطه آنالیز جوش نهایی را مشخص میکند که نشاندهنده عدد فریتی ۶ برای این جوش است. از نمودار WRC-92 (شکل ۶) نیز به همین روش میتوان استفاده کرد. البته در این مثال مقدار امتزاج فلز پایه  $30\%$  و برای هردو فلز پایه یکسان در نظر گرفته شده است که برای تعیین دقیقت این مشخصات باید مقدار امتزاج واقعی محاسبه گردد. از آنجایی که هدایت حرارتی فولاد کربنی با فولاد زنگ نزن آستنیتی تفاوت زیادی دارد مسلماً مقدار امتزاج ایندو در جوش به یک نسبت نخواهد بود. اما با این وجود این روش جواب قابل قبولی ارائه میدهد[۷].



شکل ۶- نمودار WRC-92

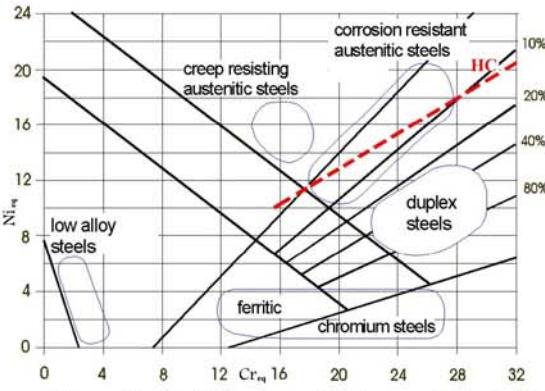
مقدار فریت کم (0-3 FN DeLong) جوشی تولید میکند که ممکن است تا حدودی به ترک گرم حساس باشد. برای جلوگیری از ترک گرم باید از فلز پرکننده ای با مقدار فریت نسبتاً بالا استفاده شود.

در برخی کاربردها مانند کارخانه تولید اوره و کاربردهای دمای پایین، استفاده از فلز پایه و جوش کاملاً آستنیتی الزامی است. در این حالت باید از فلز پرکننده آستنیتی AWS A5.4:E308L-15 کامل یا مقدار کم فریت مانند AWS A5.4:ERNiCrMo-3 و EN 1600: 18 15 3 LR

مقدار فریت در جوش ایجاد شده به عوامل متعددی پستگی دارد. از جمله این عوامل میتوان به تکنیک جوشکاری، سرعت سرد شدن و مقدار امتزاج فلز پایه در جوش اشاره کرد. بعنوان مثال نفوذ مقدار قابل توجهی نیتروژن به ناحیه جوش، میتواند مقدار فریت جوش را از ۸FN به ۰FN کاهش دهد. طول قوس نامناسب میتواند باعث افزایش مقدار نیتروژن نفوذی به جوش گردد. در نتیجه تکنیک نامناسب جوش میتواند باعث کاهش مقدار فریت جوش گردد، بطوریکه با نفوذ ۰.۱۰٪ نیتروژن عددفریتی جوش، ۸ واحد کاهش خواهد داشت. حتی در جوشهای چند پاسه و یا زنجیره ای، باید تغییرات میزان فریت را از هرپاس به پاس دیگر انتظار داشت. در نتیجه تعیین مقدار دقیق فریت باقیمانده در جوش تنها پس از اتمام جوشکاری و با روشهای دقیق متالورژیکی ممکن است. اما روشهای پیش بینی موجود نیز با تقریب قابل قبولی، در موارد طراحی و مهندسی بکار میروند.

## مراجع

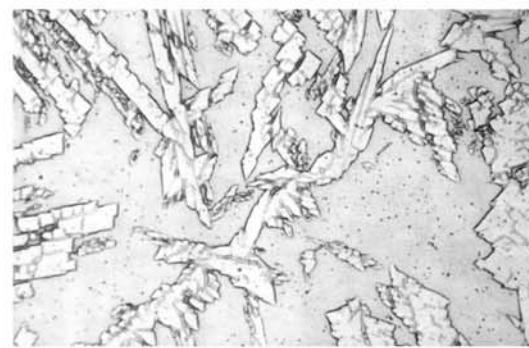
- 1- Thomas Blinghaus, " Hot Cracking Phenomena in Welds", 2005, Springer.
- 2- Dr. -Ing Mittelstädt, "Current Welding Engineer's Knowledges", 2004, SLV Duisburg.
- 3- امیر حسینی کلورزی، "ترک گرم در جوش فولاد زنگ نزن آستینیتی" ، ۱۳۸۶ ، وبلاگ مهندسی جوش، [www.weldeng.net](http://www.weldeng.net).
- 4- Martin Larén, "Avesta Welding Manual", 2004, Avesta Welding AB.
- 5- امیر حسینی کلورزی، "فریت در جوش فولادهای زنگ نزن آستینیتی" ، ۱۳۸۵ ، وبلاگ مهندسی جوش، [www.weldeng.net](http://www.weldeng.net).
- 6- مهرداد معینیان، "کلید جوشکاری" ، جلد اول، ۱۳۸۰، انتشارات آزاده.
- 7- Chuck Meadows, "Ferrite in Austenitic Stainless Steel Weld Metal", Avesta Welding AB.
- 8- محمود حائزی، "بررسی متالورژیک عیوب در جوشکاری" ، ۱۳۷۷، موسسه فرهنگی و انتشاراتی اورس.



شکل ۸- مرز نواحی حساس و غیر حساس به ترک گرم (خط چین) در نمودار دیلانگ

در مقادیر بالاتر از ۱۲ FN DeLong ممکن است یک شبکه فریتی پیوسته در ساختار ایجاد شود که در برخی محیط‌ها میتواند باعث ایجاد خوردگی انتخابی گردد. هنگامی که قطعه تحت عملیات حرارتی قرار گیرد بسته به مدت زمان و دمای عملیات، تمام و یا قسمتی از فریت میتواند به فاز سیگما تبدیل شود. این پدیده مقاومت به خوردگی و چقرمگی قطعه را کاهش میدهد.

جوش فولادهای دوبلکس دارای فریتی در محدوده ۲۵-۶۵ FN WRC-92 میباشد. مزیت مهم این شرایط افزایش استحکام کششی و تسلیم قطعه است. شکل ۹ ساختار یک فولاد زنگ نزن دوبلکس را با مقدار فریت ۵۰ FN WRC-92 نشان میدهد.



شکل ۹- میکروساختار با عدد فریتی ۵۰ از نمودار WRC-92