

انواع ترک گرم در جوش

رضا کلاتریان^۱، اسلام رنجبر نوده^۲

۱- مؤسسه گسترش علم و فن جوش

r.klntrn@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

islam_ranjbar@yahoo.com

چکیده

ترک گرم (Hot Crack) یک ناپیوستگی از نوع شکست است که که حین انجماد فلز جوش یا سرد شدن آن در فلز جوش یا در منطقه متأثر از حرارت (HAZ) رخ می دهد و بر اساس محل و دماهای تشکیل آن دارای سه نوع ترک انجمادی (Solidification Crack)، ترک ذوبی (Liquation Crack) و ترک افت انعطاف پذیری (DDC) است. ترک انجمادی در فلز جوش و ترک ذوبی در منطقه ذوب جزیبی (FL) رخ داده و هر دو در محدوده دمای تردی فلز جوش (BTR) یا در محدوده دمای تردی که تا دمای یوتکتیک گسترش یافته است اتفاق می افتد. ترک افت انعطاف پذیری، بیشتر در فلزات با ساختار FCC در فلز جوش یا در منطقه متأثر از حرارت در محدوده دمای افت انعطاف پذیری (DTR) اتفاق می افتد. عواملی از قبیل دامنه انجماد، فاز اولیه انجماد، کشش سطحی مذاب در مرز دانه ها، مقدار و توزیع مذاب حین انجماد نهایی، ساختار دانه فلز جوش، تنش های انقباضی و هندسه جوش بر حساسیت فلز جوش به ترک گرم موثر می باشد.

واژه های کلیدی: جوشکاری، ترک گرم، ترک انجمادی، ترک ذوبی، ترک افت انعطاف پذیری

Types of Hot Cracks In The Weld

R.Kalantarian, I. Ranjbar Nodeh

Abstract

Hot crack is a discontinuity of type of fracture that occurs in the weld metal or in the heat affected zone (HAZ) during solidification or cooling of the weld metal. Hot crack has three types based on location and formation temperature: Solidification Crack, Liquation Crack, and Ductility-Dip Crack (DDC)

Keywords: Welding, Hot Crack, Solidification Crack, Liquation Crack, Ductility-Dip Crack

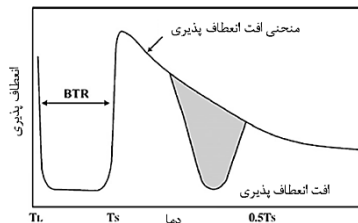
مقدمه

جوش پذیری یک فلز نقش مهمی در طراحی جوشکاری یک سازه و عملکرد آن دارد. بنابراین فاکتورهایی هنگام ارزیابی جوش پذیری فلز جوش و فلز پایه در نظر گرفته می شود. این فاکتورها عبارتند از: امکان اجرایی جوشکاری، پایداری قوس، حساسیت به حفره در فلز جوش، سیالیت فلز جوش، استحکام، خواص خستگی، مقاومت به اکسیداسیون فلز جوش، مقاومت به خوردگی، مقاومت فلز جوش به ترک گرم و غیره (۱). در میان این خواص، در جوشکاری آلیاژهای فلزاتسی از قبیل آلومینیوم، نیکل و فولادهای زنگ نزن آستنیتی، به مقاومت فلز جوش در برابر ترک گرم توجه بیشتری شده است. ترک گرم یک ناپیوستگی از نوع شکست و ترکی است که در یک فلز هنگام انجماد یا در دمای بالا اتفاق می افتد، این ترک می تواند در HAZ و یا در فلز جوش باشد (۲) که بر اساس محل و دماهای تشکیل آن به ترک انجمادی، ترک ذوبی و ترک افت انعطاف پذیری دسته بندی می شود. دماهای تشکیل ترک گرم شامل محدوده دمای تردی فلز جوش (BTR) و محدوده دمای افت انعطاف پذیری (DTR) (۳).

۱- انواع ترک گرم

۱-۱- ترک انجمادی

نمودار انعطاف پذیری برای انعطاف پذیری گرم عادی و برای یک ماده با افت انعطاف پذیری گرم (قسمت خاکستری رنگ) در شکل ۱ نشان داده شده است. ترک انجمادی معمولاً در خط مرکزی فلز جوش در حال انجماد و در محدوده دمای تردی فلز جوش (BTR) اتفاق می افتد. تشکیل ترکیبات زود ذوب یوتکتیک می تواند BTR را از T_L تا T_E گسترش دهد (۴).

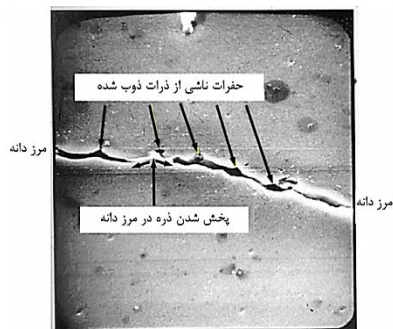


شکل ۱- منحنی انعطاف پذیری گرم (۳)

به دلیل غلظت بیشتر عناصر در جلوی جبهه انجماد، دمای مذاب جبهه انجماد، کمتر از دمای انجماد کل مذاب است (در صورتیکه ضریب جدایش بیشتر از یک باشد) بنابراین مذاب باقی مانده حین انجماد می تواند بین دانه ها جاری شده و یک لایه نازک در مرز دانه ها تشکیل دهد. انقباض مناطق انجماد یافته و نیز انقباض فلز پایه هنگام سرد شدن، باعث وارد شدن تنش های کششی از دو طرف به لایه های مذاب شده و در صورتی که مقادیر تنش های انقباضی بیشتر از حدود ۱ بار باشد این تنش ها می تواند لایه های نازک مذاب موجود در مرز دانه ها را باز کند و ترک انجمادی را تشکیل دهد (شکل ۲) (۵). در واقع تشکیل ترک انجمادی رقابت بین مقاومت ماده به ترک و نیرو محرکه ترک حین انجماد فلز جوش است. پارامتر تعیین کننده مقاومت ماده، نمودار انعطاف پذیری در BTR، حین انجماد است در حالی که پارامتر تعیین کننده نیرو محرکه ترک، کرنش های مکانیکی انباشته شده در BTR است که هردو پارامتر تابعی از دما هستند. ترک انجمادی زمانی اتفاق می افتد که نیرو محرکه ترک بزرگتر از مقاومت ماده به ترک در BTR شود (شکل ۳).

(منتشر شده در شماره ۴۲ فصلنامه مهندسی جوش)

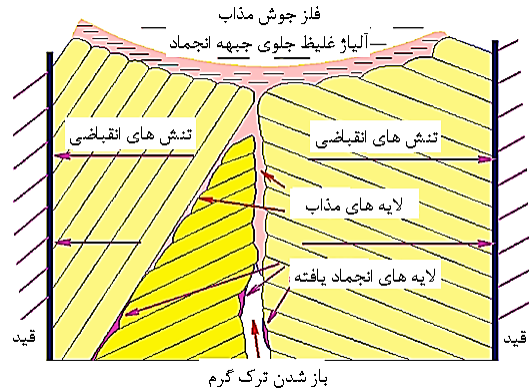
آن در فرایند جوشکاری تحت کنترل نیست. شکل ۴ ترک ذوبی در فولاد زنگ نزن ۱/۴۸۷۸ (به دلیل حضور ۰/۰۶۷ بور در ترکیب) را نشان می دهد. حفرات ناشی از ذرات ذوب شده ای است که مذاب آنها وارد مرز دانه ها شده است. در این شکل ذره مذابی دیده می شود که در حال پخش شدن در مرز دانه است. ترک در PMZ متأثر از تنش های حرارتی وارده، تنش های انقباضی و نرخ پرکنندگی است (۷).



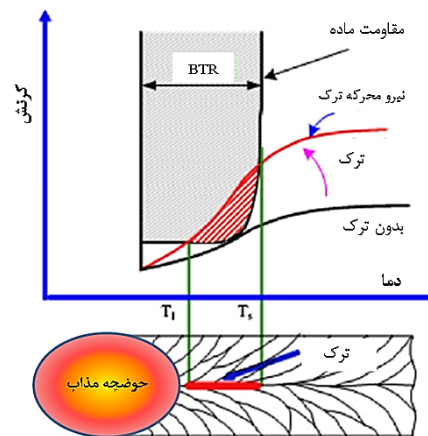
شکل ۴- ترک ذوبی در فولاد زنگ نزن ۱/۴۸۷۸ (۵)

۱-۳- ترک افت انعطاف پذیری

DDC یک پدیده حالت جامد است که معمولاً در ریز ساختارهای FCC اتفاق می افتد و ناشی از افت ناگهانی انعطاف پذیری در دمایی بالاتر از نصف نقطه ذوب ماده (DTR) به دلیل جدایش ناخالصی ها در مرز دانه و یا تنش های موضعی مرز دانه ای تولید شده توسط رسوبات است. پارامترهای موثر بر DDC فلز جوش عبارتند از: ترکیب شیمیایی فلز جوش، ناخالصی ها، موانع و مهاجرت مرز دانه ها، جدایش در مرز دانه ها و جهت گیری مرز دانه نسبت به کرنش های اعمالی (۸) (۹) (۱). رامیرز (Ramirez) گزارش داده است که DTR برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی $T_m (0/5-0/7)$ است وقتی در شرایط مقید قرار گیرند. در جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی تشکیل ترکیبات یوتکتیک زود ذوب باعث تشکیل ترک گرم خصوصاً از نوع انجمادی و DDC خواهد شد. ممکن است در جوشکاری چند پاسی از طریق ذوب مجدد و افزایش حرارت ورودی بتوان از ترک انجمادی جلوگیری نمود اما در شرایط



شکل ۲- تشکیل ترک انجمادی در فلز جوش

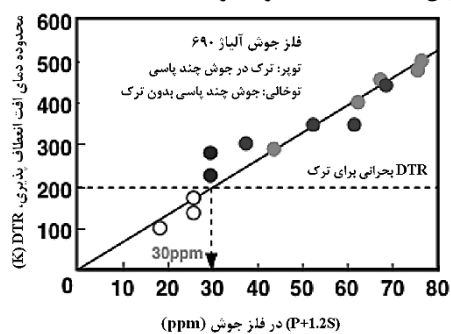


شکل ۳- طرح وقوع ترک های انجمادی در فلز جوش (۶)

۱-۲- ترک ذوبی

ترک ذوبی در PMZ زیر خط ذوب (FL) اتفاق می افتد و می تواند در فلز پایه یا فلز جوش گسترش یابد. حرارت ورودی جوشکاری می تواند باعث ذوب موضعی زمینه، ذرات کاربیدی، ترکیبات بین فلزی، ذرات یوتکتیک و ناخالصی ها در PMZ شود. با عبور منبع حرارتی، مذاب یوتکتیک تشکیل شده از مناطق ذوب شده با گسترش در مرز دانه ها یا با تشکیل حوضچه های مذاب درون دانه ها، شرایطی شبیه ترک گرم را به وجود می آورد که در نهایت باعث ترک ذوبی خواهد شد (۴). ترک ذوبی نسبت به ترک انجمادی محدودکننده تر است چون در فلز پایه اتفاق می افتد و ترکیب شیمیایی

فولادها و آلیاژهای پایه نیکل جدایش ناخالصی ها (خصوصاً گوگرد و فسفر) و عناصر آلیاژی (مانند تیتانیوم و نیوبیوم) در مرز دانه و تشکیل ترکیبات با نقطه ذوب پایین، همچنین وقوع واکنش های یوتکتیک پس از انجماد (مثلاً در سوپر آلیاژهای حاوی نیوبیوم) باعث گسترش دامنه انجماد و تشویق تشکیل ترک انجمادی خواهد شد. واکنش ذرات بین فلزی از قبیل Al_2Cu در آلیاژهای آلومینیوم، سولفید تیتانیوم در فولاد مارچینگ، فاز لاهه Nb_3Ni در آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و کاربیدها در سوپر آلیاژهای پایه نیکل با تشکیل مذاب یوتکتیک باعث ترک ذوبی می شود، همچنین در فولادهای زنگ نزن آستنیتی و دوفازی ذوب ناشی از جدایش عناصر آلیاژی یا ناخالصی ها به درون مرز دانه ها که باعث کاهش نقطه ذوب مرز دانه ها می شود عامل ترک های ذوبی است. البته در برخی آلیاژها مانند آلیاژهای پایه نیکل ذوب شدن به تنهایی برای نفوذ مایع در مرز دانه ها کافی نیست و مهاجرت مرزهای دانه نیز لازم است (۱۰). هیرونوری و همکاران وی (۹) در بررسی DDC در جوشکاری چند پاسی سوپر آلیاژ پایه نیکل ۶۹۰ نشان دادند، افزایش فسفر و گوگرد در فلز جوش باعث افزایش DTR می شود (شکل ۷). همچنین افزایش سیکل های حرارتی به دلیل جوشکاری چند پاسی این آلیاژ باعث جدایش بیشتر و افزایش غلظت فسفر و گوگرد در مرز دانه و در نتیجه افت بیشتر انعطاف پذیری گرم خواهد شد. شکل ۷ نشان می دهد DTR بحرانی برای عدم تشکیل ترک های ریز در فلز جوش حدود ۲۰۰ کلوین خواهد بود اگر مقدار (P+1.2S) در فلز جوش تا 30 ppm محدود شود.



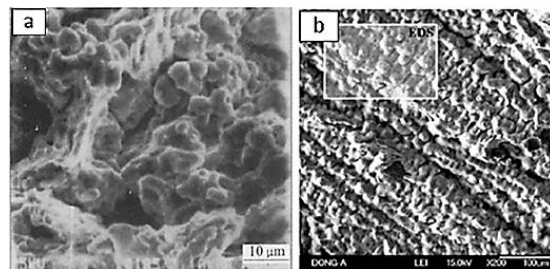
شکل ۷- رابطه (P+1.2S) در فلز جوش و DTR در جوش چند پاسی با Ni-Cr-Fe الکترودهای

۲-۳- فاز اولیه انجماد

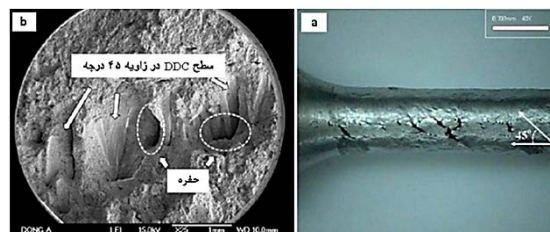
تنش های خستگی و خستگی خوردگی، DDC نیاز به توجه بیشتر دارد (۳)

۲- مورفولوژی سطح شکست ترک گرم

استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف سنجی تفکیک انرژی (EDS) نشان می دهد سطح شکست حاصل از ترک انجمادی، اغلب دارای مورفولوژی دندربتی فلز جوش با لایه ای از یوتکتیک زود ذوب است که گاهی همراه با حفرات و گسیختگی در پل های فلزی است (شکل ۵) اما سطح شکست DDC در جوش فولاد زنگ نزن AISI 304L نشان می دهد که DDC ها در امتداد شیارهای تیز با زوایای ۴۵ درجه شکل گرفته و برخلاف سطح شکست ترک انجمادی و ذوبی هیچ اثری از مذاب باقی مانده در سطح آن ها دیده نمی شود (شکل ۶).



شکل ۵- تصویر SEM از مورفولوژی سطح شکست ترک انجمادی (a) آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ همراه با حفرات و گسیختگی در پل های فلزی (۱) (b) ترک انجمادی در پاس اول جوش فولاد AISI 304L (۳)



شکل ۶- (a) زاویه ۴۵ درجه ترجیحی تشکیل DDC روی سطح نمونه کشش (b) سطوح DDC و حفرات در فلز جوش. (۳)

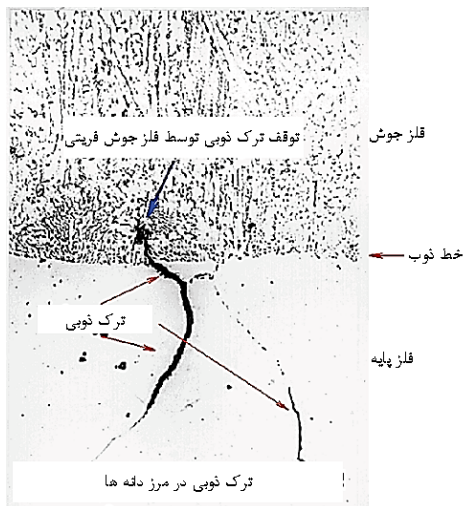
۳- عوامل حساسیت به ترک گرم

۱-۳- جدایش و دامنه انجماد

هرچه محدوده دمایی انجماد بیشتر باشد منطقه ضعیف و حساس به ترک خوردن انجمادی نیز وسیع تر خواهد بود. در

(منتشر شده در شماره ۴۲ فصلنامه مهندسی جوش)

می تواند مانع از توسعه ترک گرم شود (شکل ۹) کمی پایین تر از سطح فلز جوشی که با فریت اولیه انجماد یافته است، فریت به آستنیت (با مقداری فریت باقی مانده) تبدیل می شود. این منطقه به دلیل استحاله مذکور انقباض زیادی یافته و تنش های فشاری زیادی در منطقه سلول های فریتی القاء می نماید. این اثر قوی تر از تنش های انقباضی ناشی از سرمایش است، بنابراین در حین انجماد فلز جوش ترک گرم نمی تواند گسترش یابد چون منطقه فریتی نزدیک حوضچه مذاب جوش دارای تنش فشاری است (۵).

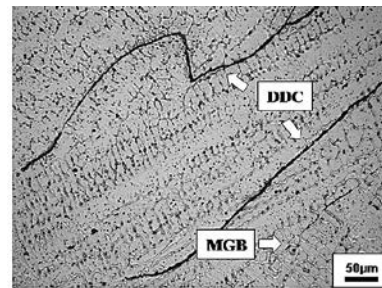


شکل ۹- توقف ترک ذوبی توسط فلز جوش فریتی

۳-۳- کشش سطحی مذاب

کشش سطحی کم مذاب باعث تشکیل لایه پیوسته مذاب در مرز دانه خواهد شد. شکل ۱۰ نشان می دهد هرچه زاویه تماس مذاب مرزدانه ای در آلیاژهای آلومینیوم بیشتر و مورفولوژی آنها کروی تر باشد حساسیت به ترک خوردن انجمادی کاهش می یابد. FeS به دلیل کشش سطحی کم لایه ای پیوسته در مرز دانه های فولاد تشکیل می دهد. مذاب MnS دارای مورفولوژی کروی و نقطه ذوب بالاتر ضرر بسیار کمتری نسبت به FeS خواهد داشت. به همین دلیل در فولادهای کربنی و کم آلیاژ افزایش نسبت منیزیم به سولفور فلز جوش تاثیر قابل ملاحظه ای بر ترک خوردن انجمادی دارد. اما در مقادیر کربن بیشتر از ۰/۲ تا ۰/۳ درصد این افزایش موثر نخواهد بود و در این مورد

لی و همکاران وی (۳) در جوشکاری آلیاژ AISI 304L با سه نوع الکتروود FCAW نشان دادند، نمونه ای که فلز جوش آن در نمودار شفلر در منطقه کاملاً آستنیتی قرار دارد دارای ترک انجمادی در پاس اول و DDC در قسمت های مختلف فلز جوش و در امتداد مرزدانه های توسعه یافته (MGB) است. مطالعه سطح ترک انجمادی نمونه کاملاً آستنیتی آثار لایه زود ذوب یوتکتیکی را نشان می دهد که احتمالاً حاوی FeS ، MnS - γ و Ti_2S ، $\text{Ti}_4\text{S}_2\text{C}_2$ و سیلیکات ها می باشد. (شکل ۸b و ۸a)



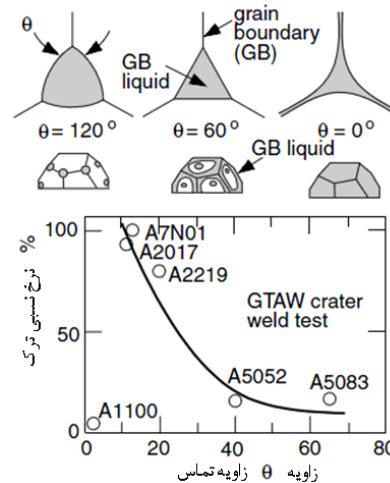
شکل ۸- گسترش DDC در امتداد MGB، عدم وجود فریت در مرز دندریت های آستنیت

ناخالصی ها حلالیت بیشتری در فریت δ نسبت به آستنیت دارند. بنابراین با حضور بیشتر فریت δ غلظت ناخالصی ها در مرز دانه های آستنیت و در نتیجه اثرات مخرب آنها بر ترک انجمادی کاهش خواهد یافت. در فولادهای زنگ نزن آستنیتی افزایش نسبت کروم معادل به نیکل معادل باعث تغییر فاز اولیه انجماد از آستنیت به فریت و افزایش فاز فریت خواهد شد. تا کالو (Takalo) و همکاران وی نشان دادند در جوشکاری قوسی این تغییر در $\text{Cr}_{eq} / \text{Ni}_{eq} = 1/5$ رخ می دهد. بطور کلی در فولادهای زنگ نزن آستنیتی حضور ۵ تا ۱۰ درصد فریت δ مقاومت خوبی در برابر ترک انجمادی ایجاد می نماید. اما میزان بیشتر فریت باعث کاهش مقاومت به خوردگی بسیار کم و تشکیل فریت شکننده σ در محدود ۶۰۰ تا ۸۵۰ درجه سانتیگراد و کاهش شدید خواص مکانیکی خواهد شد. مطابق نمودار آهن-کربن در فولادهای کربنی نیز محدوده دمایی انجماد در مقادیر کربن بیشتر گسترده تر بوده و در کربن بیش از ۰/۵۳ فاز اولیه انجماد به آستنیت تبدیل خواهد شد. بنابراین در این نوع فولادها با افزایش درصد کربن ترک خوردن انجمادی محتمل تر خواهد بود (۴). همچنین فلز جوش فریتی

۳-۵- ریز ساختار

ریز ساختار دندردیتی هم محور با مقدار زیاد مذاب در بین دانه ها بسیار راحت تر از ساختار دندردیتی ستونی درشت تغییر شکل می دهد. ریز ساختار با دانه های هم محور ریز به دلیل انعطاف پذیری بیشتر در برابر کرنش ها ، امکان تغذیه موثرتر مذاب و ترمیم ترک های اولیه حساسیت کمتری نسبت به ترک گرم دارد همچنین دانه های ریز به دلیل سطح دانه بیشتر، امکان تجمع کمتر عناصر مضر در مرز دانه را فراهم می نمایند. برخورد دانه های ستونی رشد کننده از جهات مقابل در حوضچه جوش اشکی شکل و تشکیل لایه مذاب پیوسته از جدایش های با نقطه ذوب پایین در خط مرکزی جوش، حساسیت به ترک انجمادی در خط مرکزی جوش را نسبت به جوش های با حوضچه جوش بیضوی شکل تشدید می نماید (۴).

کاهش میزان کربن فلز جوش از طریق استفاده از الکترودهای کم کربن در جوش های چند پاسی یا تکنیک لایه دهی (Buttering) توسط الکترودهای فولادهای زنگ نزن آستنیتی یا الکترودهای پایه نیکلی تاثیر بیشتری خواهد داشت (۴).



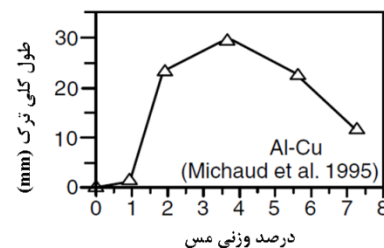
شکل ۱۰- مورفولوژی مذاب مرزدانه آلیاژهای آلومینیوم و حساسیت به ترک

۳-۶- تنش های انقباضی

بدون حضور تنش های کششی، هیچ ترک گرمی وجود نخواهد داشت. منشاء این تنش های کششی اختلاف میزان انقباض فلز جوش و انقباض فلز پایه می باشد. انقباض فلز جوش ناشی از انقباض حرارتی و انقباض ناشی از انجماد است (۴) در تنش های انقباضی ضریب انبساط فلز جوش خیلی مهم است. ضریب انبساط ساختار آستنیتی ۱٫۵ برابر بیشتر از ساختار فریتی است پس تمایل به ترک گرم در ساختار آستنیتی خیلی بیشتر است (۵). به همین دلیل فولاد زنگ نزن آستنیتی مستعد ترک انجمادی است. اما ترک خوردن انجمادی در آلیاژهای آلومینیوم (مخصوصاً آلیاژهای با دامنه انجماد وسیع) به دلیل ضریب انبساط حرارتی زیاد و انقباض زیاد ناشی از انجماد جدی تر است (۴). استفاده از منبع حرارتی با شدت زیاد باعث کاهش پیچیدگی قطعه کار و کاهش کرنش های حرارتی می شود. استفاده از مهار کم و پیشگرم مناسب نیز می تواند باعث کاهش این کرنش ها شود. جوشکاری لیزر نقطه ای متناوب (Laser Overlap Spot Welding) آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیوم با پارامترهای عادی

۳-۴- مقدار مذاب مرز دانه ای

شکل ۱۱ نشان می دهد حداکثر حساسیت به ترک در ترکیبی بین آلومینیوم خالص و آلومینیوم با عناصر آلیاژی کمتر از ۶ درصد وزنی رخ می دهد. آلومینیوم خالص فاقد یوتکتیک با نقطه ذوب پایین در مرزدانه است از طرف دیگر در آلومینیوم با عناصر آلیاژی زیاد، مذاب یوتکتیک بین دانه ها می تواند به قدری زیاد باشد که ترک های ایجاد شده در بین دانه ها را ترمیم نماید. اما بین این دو مقدار، میزان مذاب فقط می تواند لایه نازک ممتد در مرز دانه تشکیل دهد و ماده به ترک خوردن انجمادی حساس می شود.



شکل ۱۱- اثر ترکیب بر حساسیت به ترک بعضی آلیاژهای آلومینیوم (۴)

می توان افت انعطاف پذیری را کاهش و ترک های DDC را در این آلیاژها کاهش داد. برانزا و همکاران وی (۱۱) پیشنهاد نمودند برای کاهش ریسک تشکیل ترک حالت جامد و ترک انجمادی در جوشکاری فلزات با انعطاف پذیری کم، از تعداد پاس های کم، فیلر متال با انعطاف پذیری بالا و استحکام کمتر نسبت به فلز پایه، پیشگرمایش تا دمای حدود ۴۰۰ درجه سانتیگراد و تکنیک لایه دهی (Buttering) با آلیاژهای آهن - نیکل با مقدار نیکل کمتر از ۵۲٪ استفاده کرد. لایه دهی با الکترودهای پایه نیکلی از ترک فلز پایه جلوگیری کرده اما باعث ترک انجمادی در خود لایه خواهد شد.

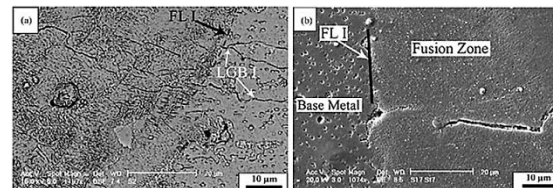
۷-۳- هندسه جوش

جوش گلوبی تک پایه با پروفیل مقعر به دلیل کشیده شدن از طرف گوشه (Toe) و ریشه (Root) جوش حساسیت بیشتری به ترک انجمادی نسبت به پروفیل محدب دارد، در جوش های لب به لب چند پایه نیز در صورتیکه پاس های جوش عریض و مقعر باشند ترک های انجمادی از سطح شروع می شود. همچنین جوش های باریک عمیق که معمولاً در جوشکاری های پرتو الکترونی و جوشکاری زیرپودری ایجاد می شود به دلیل زاویه تند بین دانه های ستونی و رسیدن آنها در خط مرکزی جوش به یکدیگر به ترک انجمادی حساس تر است (۱۲).

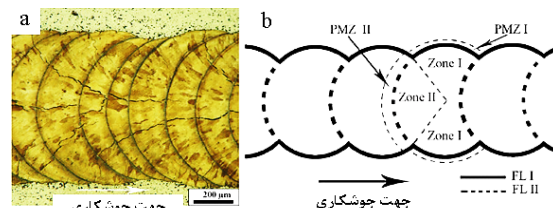
۸-۳- نرخ سرمایش و نرخ کرنش

در شکل ۳ شیب مماس بر منحنی انعطاف پذیری $(-\frac{d\epsilon}{dT})$ ، نرخ کرنش بحرانی برای افت دما (CST) نامیده می شود. براساس تحقیقات ناکاتا و ماتسودا (۱۳) CST بهترین معیار حساسیت به ترک فلز جوش است. اگر $-\frac{d\epsilon}{dT} < CST$ از ترک خوردن ماده جلوگیری خواهد شد. با توجه به اینکه $-\frac{d\epsilon}{dT} = (\frac{\delta\epsilon}{\delta t})(-\frac{\delta T}{\delta t})$ ، کاهش نرخ کرنش و افزایش نرخ سرمایش به اندازه ای که $-d\epsilon/dt < CST$ شود از وقوع ترک گرم جلوگیری خواهد کرد (۴). ژیبو دانگ و همکاران وی (۶) در پیش بینی ترک های انجمادی در جوشکاری چند

نشان می دهد تقریباً همه ترک های انجمادی در جوش با ترک های ذوبی در فلز پایه مرتبط است (شکل a-۱۲) اما با کاهش انرژی هر پاس ترک های ذوبی فلز پایه کمتر بوده و شروع ترک های انجمادی در فلز جوش از خط ذوب (FL) می باشد (شکل b-۱۲). در PMZII نیز مشابه PMZI مرزهای مذاب دانه تمایل به تشکیل کانل پیوسته با مرز دانه های فلز جوش دارد اما در PMZII به دلیل گرادیان حرارتی کمتر و توسعه ترک های انجمادی نقطه جوش قبلی دارای تنش های کمتر است و در نتیجه ترک های انجمادی به ندرت از PMZII یا FLII آغاز می شوند و یا اگر آغاز شوند گسترش نمی یابند، اما این عوامل نمی تواند از رشد ترک های بزرگ که از نقاط جوش قبلی هستند جلوگیری کند چون نرخ کرنش های اعمالی بزرگتر از نرخ پرکنندگی و ترمیم ترک هاست. (شکل a-۱۳، b-۱۳، ۷).

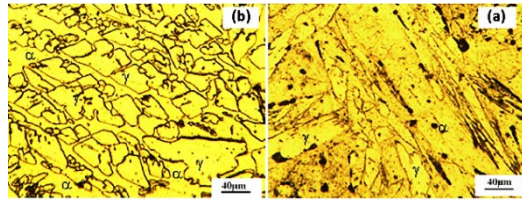


شکل ۱۲- رفتار ترک در zone 1 در جوش ایجاد شده با (a) قدرت پیک ۱/۸ کیلو وات و انرژی پالس ۱۵ ژول (b) قدرت پیک ۱/۸ کیلووات و انرژی پالس ۷ ژول



شکل ۱۳- (a) جوش لیزر پالسی آلومینیوم (b) نمایش مناطق تعریف شده

یانگ و همکاران وی (۸) نشان دادند در تشکیل DDC آلیاژهای Ni-Cr اثر تشکیل کاربیدهای کروم از نوع $(Cr,Fe)_{23}C_6$ به دلیل تولید تنش های موضعی مرز دانه ای خیلی بیشتر از جدایش ناخاضی ها یی از قبیل گوگرد در مرز دانه است. بنابراین با به حداقل رساندن رسوب کاربیدهای کروم از طریق افزودن نیوبیوم و تیتانیوم همچنین افزایش همراستایی رسوبات وزمینیه از طریق کاهش غلظت کروم و نیز کاهش تنش های انقباضی در جوش

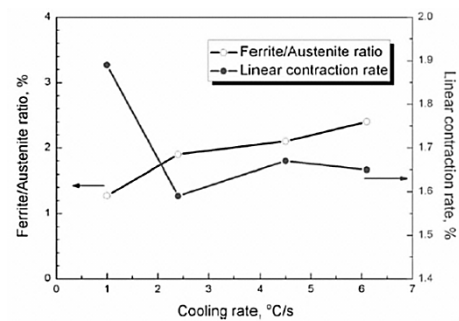


شکل ۱۵- ریز ساختار فولاد زنگ نزن دو فازی (a) نرخ سرمایش 6°C/S و (b) نرخ سرمایش 1°C/S

لینرت (Lienert) نشان داده است در جوشکاری لیزر ضربانی حساسیت به ترک انجمادی در نسبت کروم معادل به نیکل معادل در محدوده ۱٫۶ تا ۱٫۷ رخ می دهد. نسبت بیشتر در اینجا به این دلیل است که در سرعت های سرد شدن خیلی زیاد، به دلیل تحت انجماد نوک دندریت، فلز جوشی که به طور معمول به صورت فریت منجمد می شود می تواند به صورت آستنیت اولیه منجمد شود. این اتفاق برای آلیاژهایی که به زاویه راس مثلث سه فازی در نمودار فازی Fe-Cr-Ni نزدیک تر هستند (مانند فولادزنگ نزن ۳۰۹) محتمل تر است (۴). نرخ کرنش اثر متفاوتی بر حساسیت به ترک انجمادی در آلیاژهای آلومینیوم با مدل های ترک خوردن متفاوت دارد. به کمک آزمون ویراسرینت عرضی و آزمون کشش در دمای بالا مشخص می شود مدل های ترک خوردن انجمادی در آلیاژهای آلومینیوم متفاوت است مدل های ترک خوردگی دینامیک را می توان به سه نوع تقسیم نمود: مدل دارای اثر خود ترمیمی مانند آلیاژ ریختگری ZL۱۰۱ که می تواند کاملاً عاری از ترک باشد (شکل ۱۶-a). مدل دوم دارای تغییر شکل پلاستیک و شکستن پل های فلزی مانند آلیاژ ۵۰۸۳ می باشد (شکل ۱۶-c). در مدل سوم فیلم مذاب در امتداد مرز دانه ها دارای گسیختگی است مانند آلیاژ ۶۰۸۲ که دارای بیشترین حساسیت به ترک انجمادی است (شکل ۱۶-b). در مدل اول و دوم، نرخ کرنش تاثیر زیادی بر اثر خود ترمیمی و تغییر شکل پلاستیک پل های فلزی دارد بنابراین در آلیاژهای ZL۱۰۱ و ۵۰۸۳ نرخ کرنش بیشترین اثر را بر ترک خوردگی انجمادی دارد. اما آلیاژ ۶۰۸۲ در نرخ کرنش های متفاوت دارای ترک انجمادی است بنابراین نرخ کرنش کمترین اثر را بر حساسیت به ترک خوردگی انجمادی در این آلیاژ دارد (۱).

پاسی فولادزنگ نزن SUS 310 به وسیله شبیه سازی سه بعدی آزمون ویراسرینت عرضی (TVT) نمودار انعطاف پذیری ماده را اصلاح نموده و با منحنی نیرومحرکه ترک (حاصل از ترکیب نمودارهای دما-زمان و کرنش-زمان) مقایسه نمودند. این کار مشخص نمود بیشترین نیرومحرکه تشکیل ترک های انجمادی در پاس اول و انتهای هر پاس جوش است.

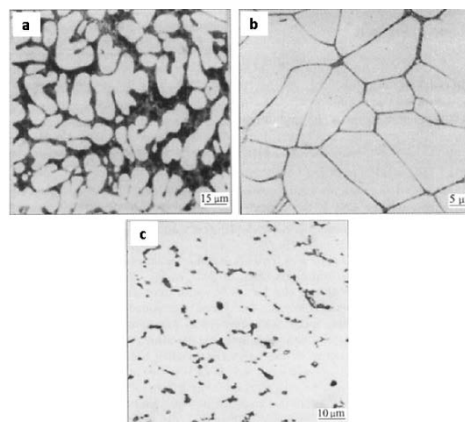
ژیجون لی و همکاران وی (۱۴) اثر نرخ سرمایش بر حساسیت به ترک گرم یک فولاد زنگ نزن دو فازی (Fe-22.68Cr-5.5Ni-3.2Mn-0.4Si-0.87Mo-0.023C-0.022P) را مطالعه نمودند. شکل ۱۴ نشان می دهد با کاهش نرخ سرمایش، نسبت فریت به آستنیت کاهش یافته و نرخ انقباض خطی افزایش می یابد. با کاهش نرخ سرمایش مناطق آستنیتی با مورفولوژی دندریتی در نرخ سرمایش بالاتر (شکل ۱۵-a) به جزایری مجزا با زمینه فریت δ تبدیل می شود (شکل ۱۵-b). بر اساس دیگرام فازی این فولاد، استحاله فاز فریت به آستنیت در محدوده دمای ۱۰۰۰ تا ۱۳۵۰ درجه سانتیگراد انجام می شود بنابراین نگهداری بیشتر در این محدوده دمایی باعث افزایش میزان آستنیت در ساختار و افزایش ریسک ترک گرم به دلیل کاهش میزان حلالیت ناخالصی ها، افزایش قابلیت ترکندگی موثر فیلم مذاب در مرز دانه ها و انقباض تحمیلی ناشی از تفاوت بین فاز دوم و آلیاژ زمینه حین انجماد خواهد شد.



شکل ۱۴ نسبت فریت به آستنیت و انقباض خطی به عنوان تابعی از نرخ سرمایش

منابع

1. **Ren-pie, Liu et al.** Solidification crack susceptibility of aluminum alloy weld metals. Trans. Nonferrous Met. SOC. China, 16(2006), pp.110-116.
2. **American Welding Society.** Standard Welding Terms and Definitions. AWS A3.0M/A3.0: 2010.
3. **Lee, D.J. et al.** The dependence of crack properties on the Cr/Ni equivalent ratio in AISI 304L austenitic stainless steel weld metals. Materials Science and Engineering A, 513-514 (2009), pp.154-159.
4. **Kou, S.** Welding Metallurgy, second ed., John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, (2003), pp.263-319.
5. **SLV DUISBURG.** " The Welding Enginner's Current Knowledge", 2005, IWE-3/2.16-3, pp.1-12.
6. **Dong, Zhibo et al.** Predicting weld solidification cracks in multipass welds of SUS310 stainless steel, Computational Materials Science, 38 (2006), pp.459-466.
7. **Malek Ghaini, F. et al.** The relation between liquation and solidification cracks in pulsed laser welding of 2024 aluminium alloy, Materials Science and Engineering A, 519 (2009), pp. 167-171.
8. **Young, G. A. et al.** the mechanism of ductility-dip cracking in nickel chromium alloys, weldig journal,42(2008), pp.31-43.
9. **Hironori, O. et al.** metallurgical mechanism of ductility-dip cracking in multipass welds of alloy 690, Trans.JWRI, vol.39(2010)no.2, pp. 221-223.
10. **Pepe, J. and Savage, W.F.** Weld. J., 46:411S, 1967.
11. **Branza, T. et al.** Study and prevention of cracking during weld-repair of heat-resistant cast steels, journal of materials processing technology, 209 (2009), pp.536-547.
12. **Blodgett, O.W.** Weld innovation Q., 2(3):4, 1985.
13. **Nakata, K. and Matsuda, F.** Trans.JWRI,24:83, 1995.
14. **Li, Zhijun et al.** Effect of cooling rate on hot-crack susceptibility of duplex stainless steel, Materials Science and Engineering A, 506 (2009), pp.191-195.



شکل ۱۶- (a) فلز جوش آلیاژ ZL۱۰۱ (b) آلیاژ ۶۰۸۲ در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد و کویچ در آب (c) آلیاژ ۵۰۸۳ در ۵۹۰ درجه سانتیگراد و کویچ در آب

نتیجه گیری:

ترک های گرم به سه گروه ترک های انجمادی، ترک های ذوبی و ترک های افت انعطاف پذیری تقسیم می شوند. ترک انجمادی ناشی از باز شدن لایه های نازک مذاب موجود در مرز دانه های فلز جوش در حال انجماد، توسط تنش های انقباضی جوشکاری است. ترک ذوبی نیز نتیجه ذوب ترکیبات زود ذوب در منطقه ذوب جزئی با حضور تنش ها انقباضی جوشکاری می باشد. حضور فاز فریت دلتا، کاهش تنش های انقباضی ناشی از جوش و کاهش دامنه انجماد فلز جوش، کاهش کشش سطحی مذاب، سهولت تغذیه حفرات بوجود آمده در مذاب بین مرز دانه ای مقاومت فلز جوش به ترک های انجمادی و ذوبی را بیشتر خواهد نمود. پدیده حالت جامد DDC ناشی از افت ناگهانی انعطاف پذیری در DTR به دلیل جدایش ناخالصی ها در مرز دانه و یا تنش های موضعی تولید شده در مرز دانه توسط رسوبات عمدتاً کاربیدی است. کاهش تنش های انقباضی در جوش، جلوگیری از تشکیل کاربیدها، افزایش همراستایی رسوبات و زمینه و کاهش تعداد پاس های جوش در آلیاژ های مستعد به تردی مرزدانه ای در جوش های چند پاسی از راه های کاهش ترک های افت انعطاف پذیری است.