

بررسی ریز ساختار و سطوح شکست جوش لیزر Nd:YAG پالسی فولاد زنگ نزن ۳۰۴

اصغر قره داغی^۱ و سید علی اصغر اکبری موسوی^{۲*}

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی متالورژی و مواد- پردیس دانشکده فنی - دانشگاه تهران

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی متالورژی و مواد- پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۱/۲۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۶/۶، تاریخ تصویب ۸۸/۲/۲۹)

چکیده

در مقاله حاضر فولاد زنگ نزن ۳۰۴ با دو ترکیب اندکی متفاوت بوسیله لیزر Nd:YAG پالسی جوش کاری شده و ریزساختارهای آنها در شرایط جوش کاری مختلف جهت اعمال سرعت سرمایش متفاوت، بررسی شده اند. طبق نتایج، در فلز جوش فولاد با نسبت کرم معادل به نیکل معادل برابر ۱/۷، انجماد فریتی و در فلز جوش فولاد با نسبت کرم معادل به نیکل معادل ۱/۶۱، انجماد آستنیتی اتفاق می افتد. به علاوه با افزایش سرعت سرمایش (در شرایط جوش کاری با توان لیزر بیشتر) در فولاد با نسبت کرم معادل به نیکل معادل برابر ۱/۷، مقدار فریت افزایش می یابد و در فولاد با نسبت کرم معادل به نیکل معادل ۱/۶۱ لبه های جوش به صورت فریتی منجمد می شود. نمونه ها تحت آزمایش نشت سنجی پارگی قرار گرفته و سطوح شکست و علل شکست آنها بررسی شده است. نتایج تحقیق نشان می دهد که مکانیزم شکست، شکست نرم است و عیوبی مانند حفره های گازی و کاهش عمق نفوذ جوش به تسهیل شکست کمک کرده اند.

واژه های کلیدی: فولاد زنگ نزن ۳۰۴، لیزر Nd:YAG پالسی، کرم معادل، نیکل معادل، انجماد فریتی و آستنیتی،

شکست نرم و سطوح شکست

مقدمه

کار باعث افزایش درجه حساسیت به رسوب کاربید (به وسیله کاهش سرعت سرد شدن و زمان دادن به رسوب کاربید) می شود. پیشگرم کردن و گرم کردن بین پاسی هم چنین می تواند باعث افزایش پیچش و تمایل به ایجاد ترک شود [۴].

ضریب انبساط حرارتی آستنیت ۳۰ تا ۴۰ درصد بیشتر از فریت است که این مسئله می تواند منجر به پیچش و تنس پسماند بیشتری در اثر جوش کاری در این آلیاژها شود. نقطه ذوب فولادهای زنگ نزن آستنیتی کمتر از فولادهای کربنی است [۵ و ۴].

در این تحقیق، فولاد زنگ نزن ۳۰۴ بوسیله لیزر Nd:YAG پالسی جوش کاری شده است و تأثیر متغیرهای جوش کاری بر ریزساختار و حالت انجمادی جوش بررسی شده است. حالت های انجمادی فریتی و آستنیتی می تواند در فولادهای زنگ نزن آستنیتی رخ دهد که به ترکیب شیمیایی و سرعت سرمایش بستگی دارد.

قطعه مورد آزمایش در این تحقیق، دارای اندازه درز خیلی کم نزدیک به صفر میلی متر است، مقطع دایره ای داشته و

جوش کاری لیزر یکی از روش های پیشرفته جوش کاری است. لیزرها انواع مختلفی دارند که لیزر گازی CO₂ و لیزر جامد Nd:YAG (نایوبیم، ایتريم، آلومینیم، گارنت) بیشتر در جوش کاری کاربرد دارند. هر دو نوع لیزرها را می توان به صورت پیوسته یا پالسی به کاربرد که با تبدیل لیزر پیوسته به حالت پالسی می توان لیزر را افزایش داد. در حالت پالسی متغیرهای بیشتری توسط دستگاه لیزر نسبت به جوش کاری حالت پیوسته قابل کنترل است که عملیات را پیچیده می کند. این متغیرها در دستگاه مورد استفاده (COSMOLASER) این تحقیق عبارتند از: فرکانس، زمان پالس و توان متوسط هر پالس [۱ و ۲].

فولاد زنگ نزن ۳۰۴، معروف ترین و پرکاربردترین آلیاژ در خانواده فولادهای زنگ نزن است و مقاومت به خوردگی خوب، شکل پذیری عالی، ساخت آسان و استحکام مناسبی نیز دارد [۳].

به علت این که فولادهای زنگ نزن آستنیتی در اثر سریع سرد شدن، دچار استحاله مارتنزیتی نمی شوند پیشگرم و کنترل دمای بین پاسی در آنها لازم نیست. در حقیقت این

مشخصات دستگاه لیزر مورد استفاده

با توجه به اندازه بسیار کم درز اتصال و دقت زیاد مورد نیاز برای جوش کاری، روش‌های جوش کاری لیزر و اشعه الکترونی (EBW) مناسب تشخیص داده شدند و در این تحقیق از روش جوش کاری لیزر استفاده شده است. دستگاه لیزر مورد استفاده Nd:YAG پالسی است. به دلیل کم بودن توان متوسط دستگاه لیزر مورد استفاده که حدود ۸۰ وات است، عمق نفوذ جوش‌ها نسبت به پهنای آنها کمتر شده است.

جوش کاری نمونه‌ها طبق متغیرهای طراحی شده انجام شد. مقادیر این متغیرها در جداول (۲) و (۳) آورده شده است. درصد روی هم‌افتادگی پالس‌ها طبق معادله ۳ محاسبه شده [۷] و در جداول (۲) و (۳) آورده شده است.

$$Op = \frac{H - H'}{H} * 100\% \quad (3)$$

$$H = L + V * t_d$$

$$H' = V * t_f$$

در معادله شماره ۳، L قطر اثر پالس لیزر، V سرعت حرکت قطعه کار، t_d پهنای پالس لیزر و t_f زمان تأخیر بین دو پالس پی‌درپی است.

در این تحقیق از گاز محافظ آرگون با خلوص ۹۹/۹ درصد (که ناخالصی عمده آن نیتروژن است) و با دبی ثابت ۱۰ لیتر بر دقیقه و زاویه اعمال حدود ۷۵ درجه استفاده شده است.

بررسی‌های میکروسکوپی

برای آماده‌سازی نمونه‌ها برای تصویربرداری مراحل زیر انجام شد. برای اچ الکتروشیمیایی از محلول اچ "20NaOH + 80Distilled water" استفاده شد. در اچ الکتروشیمیایی، نمونه‌ها در ولتاژ ۲۰ ولت به مدت ۶ الی ۸ ثانیه در محلول اچ قرار داده شدند و از کاند فولاد زنگ‌نزن آستینیتی مشابه استفاده شد [۸]. با انجام اچ الکتروشیمیایی با محلول اچ استفاده شده در این تحقیق، می‌توان فریت دلتای موجود در ریزساختار را مشاهده کرد.

در بررسی‌های میکروسکوپی از میکروسکوپ نوری (OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. تأثیر عوامل مختلف مانند ترکیب شیمیایی و سرعت سرمایش در ریزساختار فلز جوش بررسی شده است.

اندازه قطر آن ۱۲ میلی متر و ضخامت لبه‌های آن ۰/۶ میلی متر است. عیوبی مختلفی در جوش کاری ممکن است به وجود آید که منجر به شکست در هنگام آزمایش نشت‌سنجی می‌شود. در این تحقیق آزمایش نشت‌سنجی انجام شده و سطوح شکست آنها بررسی شده و علل شکست و عیوب مشاهده شده در ریزساختار مورد مطالعه قرار گرفته است.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق با تعبیه فیکسچری دقیق با قابلیت تنظیم سرعت دوران، اثر متغیرهای جوش کاری لیزر بر روی نمونه‌های جوش کاری، بررسی شده است.

مواد

مواد استفاده شده در این تحقیق از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با دو ترکیب شیمیایی متفاوت بودند و به صورت فولادهای شماره ۱ و ۲ شماره‌گذاری شده‌اند و ترکیب شیمیایی آنها در جدول (۱) آمده است. نسبت کرم معادل به نیکل معادل فولادهای شماره ۱ و ۲، رابطه WRC-92 (۱) و (۲) که دارای دقت قابل قبولی است، به کار برده شد [۶].

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0.5Nb \quad (1)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N + 0.25Cu \quad (2)$$

همان گونه که در جدول آمده است، فولاد شماره ۱ میزان نسبت کرم معادل به نیکل معادل بیشتری را دارد و انتظار می‌رود که فریت بیشتری در ریزساختار داشته باشد. شکل (۱) ظاهر نمونه‌های جوش کاری شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمونه جوش کاری شده فولاد شماره ۱.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی و نسبت کرم معادل به نیکل معادل فولادهای استفاده شده.

عنصر ماده	C	Cr	Ni	Mn	Mo	S	P	Ti	Cu	Fe	Creq/Nieq (WRC-92)
فولاد شماره ۱	0.08	18.29	8.2	1.75	0.42	0.03	0.04	0.003	0	69.97	1.7
فولاد شماره ۲	0.063	18.4	8.8	1.3	0	0.06	0	0	0.22	71.21	1.61

جدول ۲: متغیرهای جوش کاری و مقادیر آنها.

متغیرها شماره اتصال	ولتاژ (ولت)	سرعت جوش کاری (دور بر دقیقه)	زمان پالس (میلی ثانیه)	فرکانس (هرتز)	قطر اشعه (میلیمتر)	درصد روی هم افتادگی پالس ها
۱	۴۵۰	۴	۴	۱۲	۰/۴	۸۰/۶۲
۲	۵۵۰	۴	۴	۱۲	۰/۴	۸۰/۶۲

جدول ۳: پارامترهای جوش کاری نمونه های اتصال داده شده از فولاد شماره ۱ برای آزمایش نشت سنجی.

پارامترها شماره نمونه	ولتاژ (ولت)	سرعت (دور بر دقیقه)	زمان پالس (میلی ثانیه)	فرکانس (هرتز)	قطر اشعه (میلی متر)
۱	۴۵۰	۴	۴	۸	۰/۴
۲	۵۵۰	۴	۴	۸	۰/۴
۳	۴۵۰	۹	۴	۸	۰/۴
۴	۴۰۰	۱	۴	۱۲	۰/۴
۵	۴۵۰	۹	۴	۱۲	۰/۴
۶	۵۰۰	۴	۴	۱۲	۰/۴
۷	۵۰۰	۴	۴	۱۲	۰/۴

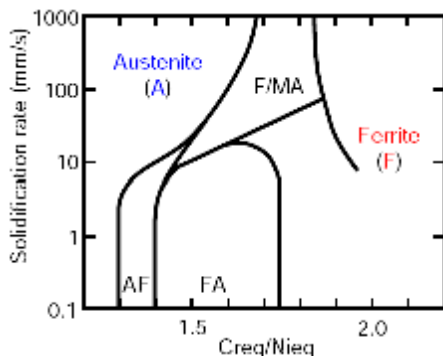
نتایج و بحث

انواع حالت های انجمادی که در فولاد های زنگ نزن آستنیتی رخ می دهند عبارتند از: کاملاً آستنیتی (A)، آستنیتی- فریتی (AF)، فریتی- آستنیتی (FA) و کاملاً فریتی (F). در انجماد نوع A ریزساختار کاملاً آستنیتی به وجود می آید. در انجماد نوع AF در هنگام انجماد اولین فازی که جوانه می زند آستنیت است و سپس فریت

آزمایش نشت سنجی تا تسلیم (یا آزمایش پارگی)

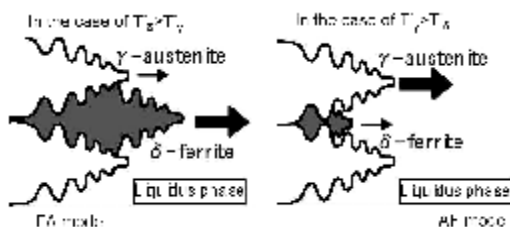
آزمایش پارگی طبق استاندارد MIL-M-8856b انجام شد [۹]. در آزمایش پارگی، فشار هیدرولیک تا شکست نمونه افزایش می یابد. تعداد ۱۴ نمونه از فولاد شماره ۱ تحت آزمایش پارگی قرار گرفتند که عوامل جوش کاری مربوط به آنها در جدول (۳) آمده است. پس از آزمایش و پارگی نمونه ها، شکست نگاری ماکرو و میکرو انجام گرفت.

انجمادی در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی از فریت اولیه به آستنیت اولیه تغییر خواهد کرد. همان گونه که در شکل (۲) نشان داده شده‌است، با افزایش سرعت انجماد، حالت انجمادی از AF به A و از FA به آستنیت اولیه تغییر می‌کند، ولی آنها تأثیر پالسی بودن لیزر را در ریزساختار در نظر نگرفته‌اند [۳، ۱۲ و ۱۳].



شکل ۲: تأثیر سرعت انجماد بر حالت انجمادی [۳].

تحقیقات زیادی در بررسی علل این پدیده انجام شده است و تئوری‌هایی نیز مانند تئوری دمای نوک دندریت^۳ گزارش شده‌است. طبق این تئوری (شکل ۳) با تغییر سرعت انجماد، دمای نوک دندریت فازهای δ و γ (به ترتیب T^*_δ و T^*_γ) تغییر می‌کند. در سرعت‌های سرمایه‌گذاری کم، دمای نوک دندریت فاز δ بیشتر است و حالت انجمادی FA اتفاق می‌افتد، ولی در سرعت‌های سرمایه‌گذاری زیاد، دمای نوک دندریت فاز γ بیشتر بوده و حالت انجمادی AF رخ می‌دهد [۳ و ۱۲].



شکل ۳: تأثیر دمای نوک دندریت بر حالت انجمادی [۱۲].

با بررسی شکل ریزساختارها و فریت تشکیل شده در آنها، به نظر می‌رسد که حالت‌های انجمادی فریت اولیه، آستنیت اولیه و آستنیتی در جوش‌ها اتفاق افتاده‌است. با بررسی دو فولاد با شماره‌های ۱ و ۲ با متغیرهای جوش کاری مختلف، تأثیر ترکیب شیمیایی و متغیرهای جوش کاری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جوانه‌زنی می‌کند. انجماد نوع FA برعکس بوده و ابتدا فریت جوانه‌زنی می‌کند و در F ابتدا ریزساختار تماماً فریتی به وجود آمده و سپس طی استحاله حالت جامد $\delta \rightarrow \gamma$ مقداری آستنیت به وجود می‌آید [۱۰]. اینکه کدامیک از حالت‌های انجمادی رخ می‌دهد به ترکیب شیمیایی فولاد (Creq/Nieq) و سرعت سرمایه‌گذاری بستگی دارد [۳].

جوش‌هایی که فاز انجمادی اولیه آنها آستنیت است، به طور ذاتی تمایل بیشتری به ترک انجمادی نسبت به جوش‌هایی که فاز انجمادی اولیه آنها فریت دلتا است، دارند. بنابراین کنترل رفتار انجمادی جوش برای اطمینان از عدم ایجاد ترک لازم است [۱۰ و ۱۱]. در جدول (۴) واکنش‌هایی که در هر نوع انجماد رخ می‌دهد، نشان داده شده‌است [۳].

جدول ۴: حالت‌های انجمادی و واکنش‌های مربوط به آن [۳].

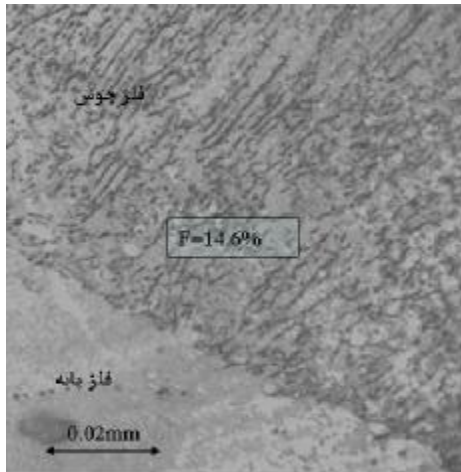
واکنش‌ها	حالت انجمادی
$L \rightarrow L+A \rightarrow A$	A
$L \rightarrow L+A \rightarrow L+A+(L+A)eut \rightarrow A+Feut$	AF
$L \rightarrow L+F \rightarrow L+F+(F+A)per/eut \rightarrow F+A$	FA
$L \rightarrow L+F \rightarrow F \rightarrow F+A$	F

تغییر حالت انجمادی در اثر فوق سرمایه‌گذاری زیاد (تفاوت حالت انجمادی در جوش کاری لیزر با جوش کاری معمولی)

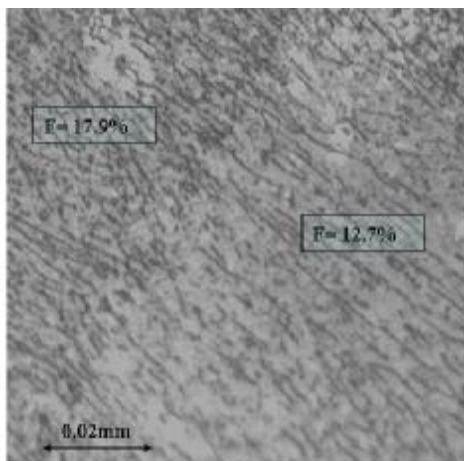
روابط شافلر (۱۹۷۲)، WRC-۹۲ و غیره با محاسبه نسبت کرم‌معادل به نیکل‌معادل، حالت انجمادی اولیه و مقدار فریت دلتا را پیش‌بینی می‌کنند. این گونه روابط در روش‌های جوش کاری معمولی مانند جوش کاری دستی (SMAW)^۱، جوش کاری با گاز محافظ آرگون (GTAW) و غیره صدق می‌کنند. دیوید (David) و همکاران (۱۹۸۷) نشان داده‌اند که در جوش کاری‌های با دانسیته انرژی بالا مانند جوش کاری لیزر و جوش کاری اشعه الکترونی (EBW)^۲ به دلیل سرعت سرمایه‌گذاری زیاد، حالت انجمادی و نوع ریزساختار تغییر خواهد کرد و دیاگرام‌های شافلر و غیره قادر به پیش‌بینی درست میزان فریت نخواهند بود [۳].

طبق تحقیقات دیوید (David)، لیپولد (Lippold) و ویتک (Vitek) و دیگران، با افزایش سرعت سرمایه‌گذاری در روش‌های جوش کاری لیزر و اشعه الکترونی، حالت

۰/۰۹ درصد در نسبت کرم معادل به نیکل معادل، می تواند منجر به اختلاف در حالت انجمادی شود (سرعت انجمادی آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، طبق منبع [۷] حدود ۱۰۰ mm/s است).



الف) لبه جوش



ب) وسط مقطع فلز جوش

شکل ۴: ریزساختار فولاد شماره ۱ جوش کاری شده با متغیرهای شماره ۱.

تأثیر سرعت سرمایش

تأثیر سرعت سرمایش را می توان با تغییر دادن ولتاژ جوش کاری بررسی کرد، زیرا به طور مثال با افزایش ولتاژ (متغیرهای جوش کاری شماره ۲ نسبت به متغیرهای جوش کاری شماره ۱)، مقدار گرمای ورودی به قطعه افزایش یافته و سرعت سرمایش کاهش می یابد. هر دو نوع فولاد با متغیرهای جوش کاری شماره ۲ اتصال داده شده و نتایج آنها در اشکال (۱۱) و (۱۳) آورده شده است.

در حالت های انجمادی فریت اولیه و آستنیت اولیه، به دلیل استفاده از جوش کاری لیزر پالسی در این تحقیق، حرارت پالس های بعدی باعث حل شدن و تغییر شکل مقداری از فریت موجود در ریزساختار فلز جوش پالس های قبلی شده و تفکیک حالت های انجمادی فریت اولیه و آستنیت اولیه مشکل می شود. بنابراین در تحلیل ریزساختار، نام انجماد فریتی به جای دو حالت انجمادی آستنیت اولیه و فریت اولیه استفاده شده است. هر چند نسبت انجماد به صورت آستنیت اولیه به فریت اولیه بسیار اندک است.

در ریزساختار فلز جوشی که به صورت فریتی منجمد می شود، با اچ الکتروشیمیایی، ساختار انجمادی و سلول های اولیه چندان نمایان نیستند و فریت در فلز جوش قابل شناسایی است، ولی در انجماد آستنیتی به علت تغییرات کم پس از انجماد در حین سرمایش، ساختار انجمادی و سلول های اولیه نمایان هستند.

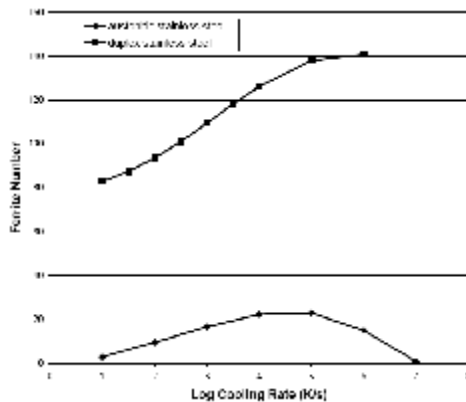
در جوش های انجماد یافته به صورت فریتی (اشکال ۴ و ۵)، فریت ها و درصد حجمی فریت با علامت F نشان داده شده است. مقادیر فریت نشان داده شده، توسط نرم افزار تحلیل گر تصویری^۴ به دست آمده است.

تأثیر ترکیب شیمیایی

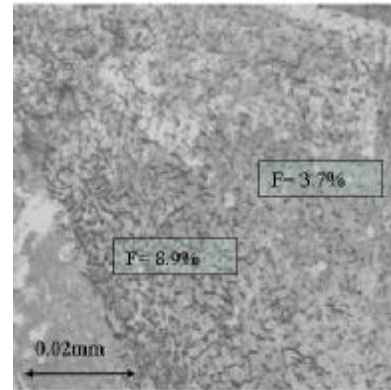
شکل (۴) ریزساختار فلز جوش فولاد شماره ۱ و شکل (۶) ریزساختار فلز جوش فولاد شماره ۲ را نشان می دهند. جوش های نشان داده شده با متغیرهای جوش کاری شماره ۱ به وجود آمده اند. در انجماد آستنیتی شکل (۶)، روند رشد جبهه انجماد و ریزدانه های دندریتی و سلولی نشان داده شده است. بنابراین، در شکل (۴) ریزساختار فریتی و در شکل (۶) ریزساختار آستنیتی مشاهده می شود. یعنی در فولاد شماره ۱ انجماد فریتی و در فولاد شماره ۲ انجماد آستنیتی اتفاق می افتد که به دلیل اختلاف در نسبت کرم معادل به نیکل معادل فولاد ۳۰۴ شماره ۱ و ۲ است. نسبت کرم معادل به نیکل معادل فولاد ۳۰۴ شماره ۱ و ۲ به ترتیب برابر ۱/۷ و ۱/۶۱ است، بنابراین فولاد شماره ۱ نسبت کرم معادل به نیکل معادل بیشتری داشته و در فلز جوش آن، حالت انجماد فریتی اتفاق می افتد. این اختلاف با مشاهده شکل (۲) قابل توجیه است. در شکل (۲) که حاصل تحقیقات لیپولد و همکاران است [۳]، مشاهده می کنیم که در سرعت انجماد حدود ۱۰۰ mm/s، اختلاف

تأثیر سرعت سرمایش در حالت انجمادی فریتی

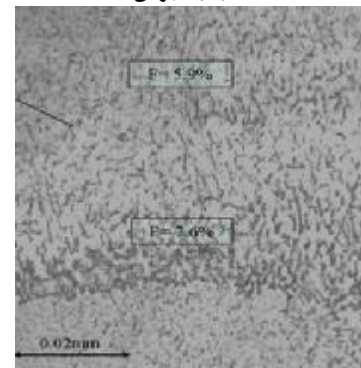
ریزساختار فولاد شماره ۱ که با متغیرهای شماره ۲ جوش کاری شده، در شکل (۵) نشان داده شده است. قبلاً عنوان شد که روابط شافلر و غیره قادر به پیش‌بینی دقیق مقدار فریت و حالت انجمادی در روش‌های جوش کاری همراه با انجماد سریع نیستند. در تصحیح این روابط، ویتک (Vitek) و همکاران [۱۴] دریافته‌اند که با افزایش سرعت سرمایش در جوش کاری فولاد زنگ‌نزن آستنیتی، نسبت به روش‌های جوش کاری معمولی، ابتدا مقدار فریت افزایش و سپس کاهش می‌یابد (شکل ۷). در مرحله اول که شیب نمودار عدد فریت بر حسب سرعت سرمایش مثبت است، حالت انجمادی فریت اولیه حاکم است و با افزایش سرعت سرمایش زمان استحالته حالت جامد ($\delta \rightarrow \gamma$) کاهش یافته و فریت بیشتری در ریزساختار باقی می‌ماند. ولی از سرعت سرمایش حدود $10^{4.5}$ K/s به بعد که شیب نمودار منفی است، حالت انجمادی آستنیت اولیه حاکم بوده و با افزایش سرعت سرمایش، زمان کمتری برای تشکیل فریت بعد از انجماد وجود داشته و فریت ریزساختار کاهش می‌یابد. طبق شکل (۷) در فولادهای دوفازی با افزایش سرعت سرمایش مقدار فریت افزایش می‌یابد [۱۴]. بنابراین با مقایسه شکل (۵) با شکل (۴) در می‌یابیم که در فولاد شماره ۱ با کاهش سرعت سرمایش، مقدار فریت در فلز جوش کاهش می‌یابد، زیرا زمان برای تبدیل فریت به آستنیت در هنگام سرمایش افزایش یافته و فریت کمتری باقی می‌ماند. همچنین در آخرین پالس از فلز جوش ایجاد شده در سرعت سرمایش بیشتر (شکل ۴)، انجماد آستنیتی



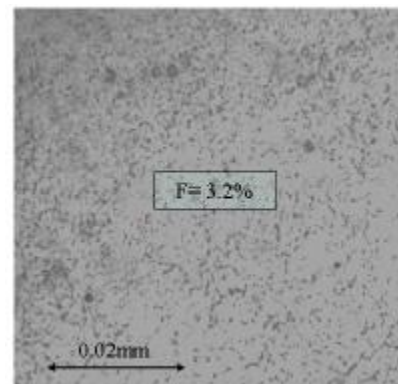
شکل ۷: تأثیر سرعت سرمایش در عدد فریت در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی و دوفازی [۱۴].



الف) لبه جوش

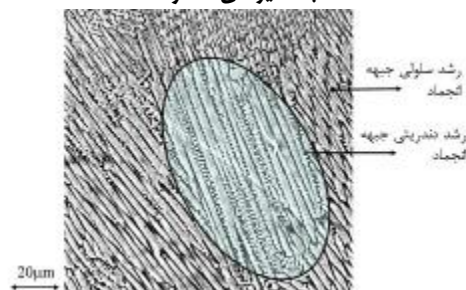


ب) وسط مقطع جوش



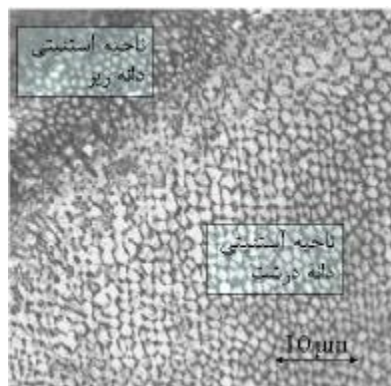
ج) بالای مقطع جوش

شکل ۵: ریزساختار فولاد شماره ۱ جوش کاری شده با متغیرهای شماره ۲.

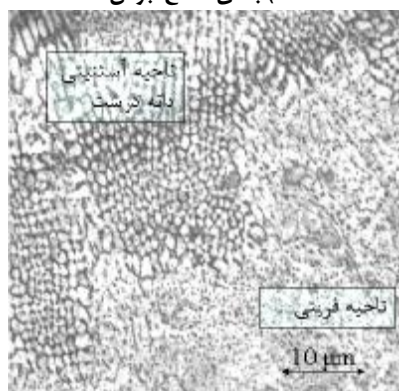


شکل ۶: انجماد آستنیتی در فلز جوش فولاد شماره ۲ جوش کاری شده با متغیرهای شماره ۱.

حاصل از هر پالس لیزر به تدریج کاهش می‌یابد. از دلایل این رخداد می‌توان به این موارد اشاره کرد:



الف) بالای مقطع جوش



ب) وسط مقطع جوش

شکل ۸: ریزساختار فولاد شماره ۲ جوش کاری شده با متغیرهای شماره ۲.

۱- تأثیر حرارت پالس بعدی در حل شدن فریت، ۲- تأثیر نیتروژن موجود در گاز محافظ که منجر به کاهش نسبت کرم‌معادل به نیکل‌معادل می‌شود (با توجه به فرمول نیکل معادل ملاحظه می‌کنیم که با افزایش نیتروژن، مقدار نیکل معادل افزایش یافته مقدار نسبت کرم معادل به نیکل معادل کاهش می‌یابد)، این تأثیر به تدریج از پایین تا بالای هر مقطع افزایش می‌یابد.

گاز محافظ مورد استفاده آرگون با خلوص ۹۹/۹ درصد است و بقیه آن ناخالصی بوده و عمده ناخالصی آن (۷۰ درصد) نیتروژن است. این مقدار نیتروژن می‌تواند در صورت وارد شدن در فلز جوش و به دام افتادن آن که در سرعت سرمایش زیاد در جوش کاری لیزر می‌تواند اتفاق افتد، با ضریب ۲۰ برابر در مقدار نیکل معادل (Ni_{eq}) $(Ni+35C+20N+0.25Cu)$ و در نتیجه در نسبت کرم معادل به نیکل معادل فلز جوش تأثیر داشته و منجر به تغییراتی در ریزساختار و حالت انجمادی رخ دهد. لازم به ذکر است

رخ داده است که علاوه بر افزایش سرعت سرمایش، می‌تواند به دلیل افزایش تأثیر نیتروژن موجود در گاز محافظ نیز باشد. به نظر می‌رسد تأثیر نیتروژن بیشتر است.

فریت‌های تشکیل شده در همه اتصال‌ها کرمی شکل هستند، ولی در سرعت سرمایش بالاتر (شکل ۴ نسبت به شکل ۵) بخصوص در فلز جوش پالس‌های اولیه کشیده‌تر هستند، زیرا مقدار و پیوستگی آنها افزایش یافته است.

تأثیر سرعت سرمایش در حالت انجمادی آستنیتی

در شکل (۸)، ریزساختار فولاد شماره ۲ جوش کاری شده با متغیرهای شماره ۲ نشان داده شده است.

در این شکل مشاهده می‌شود که به دلیل کاهش سرعت سرمایش نسبت به متغیرهای شماره ۱، مقداری از فلز جوش به صورت فریتی منجمد شده است. در حالی که در متغیرهای شماره ۱ در فولاد شماره ۲، ریزساختار کاملاً آستنیتی حاصل می‌شود (شکل ۶). تشخیص ناحیه فریتی و آستنیتی (یعنی به ترتیب نواحی که به صورت فریتی و آستنیتی منجمد شده‌اند) با تجزیه و تحلیل ریزساختارهای حاصله از محققانی چون دیوید، ویتک، لیپولد [۱۲، ۱۴ و ۱۵] و غیره و مقایسه ریزساختارهای به دست آمده در این تحقیق با آنها، انجام گرفته است.

در حالت کلی برای این کار می‌توان از فریت اسکوپ و ریزسختی نیز استفاده کرد که نمونه‌های موجود در این تحقیق، به دلیل کوچکی بیش از حد فلز جوش امکان استفاده از فریت اسکوپ میسر نبوده است.

مقدار ریز سختی فاز فریت، به طور معمول کمتر از مقدار ریز سختی فاز آستنیت است. اما اگر عملیات ایجینگ انجام پذیرد سختی آستنیت از فریت کمتر است. مقدار متوسط سختی فاز فریت و آستنیت حاصل از پنج نقطه مختلف در این تحقیق، به ترتیب برابر ۲۰۰ و ۲۲۰ ویکرز است که با سختی استاندارد مطابقت دارد [۱۲، ۱۴ و ۱۵].

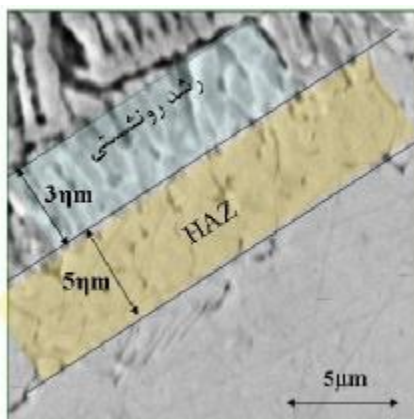
تغییرات ریزساختاری در حالت انجمادی فریتی

همان‌طور که در شکل (۴) و (۵) (انجماد فریتی) مشاهده می‌شود، در مقطع یک جوش معین، شکل ریزساختار در نواحی مختلف متفاوت است. طبق نتایج پژوهش، در مقطع حوضچه جوش، مقدار فریت از پایین تا بالای فلز جوش

می‌تواند منتج به رشد رونشستی آستنیت روی آستنیت شود (شکل ۱۰ برای فولاد شماره ۲). میزان رشد این ناحیه در حدود ۳ میکرومتر است.

ناحیه تحت تأثیر حرارت (HAZ)

در جوش کاری لیزر به دلیل انرژی ورودی بسیار کم ناحیه متأثر از حرارت بسیار کوچکی تشکیل می‌شود که گاهی قابل ملاحظه نیست. اگر مناطقی از HAZ به دمای استحاله برسند، فریت در مرزخانه‌های HAZ تشکیل می‌شود و به دلیل سرعت سرد شدن بالا، امکان برقراری تعادل وجود نداشته و مقداری فریت در دمای اتاق در ساختار باقی می‌ماند (شکل ۱۰). طبق شکل، عرض ناحیه HAZ در حدود ۴ الی ۶ میکرومتر است.



شکل ۱۰: رشد رونشستی و ناحیه متأثر از حرارت در فولاد شماره ۲.

آزمایش نشت سنجی تا تسلیم (آزمایش پارگی)

در این آزمایش، ۷ نمونه از جنس فولاد شماره ۱ تحت آزمایش پارگی قرار گرفتند که نتایج آنها در جدول (۶) آمده است.

جدول ۶: نتایج آزمایش شماره ۳.

شماره نمونه	فشار پارگی (bar)
۱	۱۴۴۳
۲	۱۵۱۸
۳	۳۷۰
۴	۱۶۹۸
۵	۱۷۵۹
۶	۱۹۰۲
۷	۱۷۴۰

شکل نمونه ترکیده و تصویر سطح شکست برای هر

که انتخاب نوع حالت انجمادی فریتی و آستنیتی بر مبنای ریزساختار بر اساس تحقیقات دیوید (David)، لیبولد (Lippold) و ویتک (Vitek) [۳ و ۱۵] بوده است.

۳- بیشتر بودن سرعت سرمایش در ابتدای هر پالس.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که فریت کمتری در پالس‌های بعدی، تحت استحاله فریت به آستنیت قرار گرفته و حل می‌شود. این مهم، به این دلیل است که در پالس‌های بعدی حرارت جذب شده بعد از انجماد کمتر است و بنابراین فریت کمتر حل می‌شود.

علاوه بر این تغییرات همان‌گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، در حالت انجمادی فریتی علاوه بر تفاوت‌های ریزساختاری در یک مقطع جوش که بیشتر توضیح داده شد، تغییرات دیگری نیز در مقدار فریت اتفاق می‌افتد. این تغییرات ناشی از جدا شدن عناصر آلیاژی و سرعت‌های مختلف سرد شدن و وجود شیب دمایی در مناطق مجاور در فلز جوش است.

تغییرات ریزساختاری در حالت انجمادی آستنیتی

در اتصال‌های انجام شده در فولاد شماره ۲ حالت انجمادی غالب حالت آستنیتی بوده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده شد، برخی از مناطق در جوش به روش آستنیتی و برخی از مناطق به روش فریتی منجمد شده بودند. در این جوش در پالس‌های اولیه در یک مقطع جوش انجماد فریتی رخ داده است و به تدریج در پالس‌های بعدی به آستنیتی تبدیل شده‌است که می‌تواند به علت افزایش تأثیر نیتروژن گاز محافظ آرگون (که به صورت ناخالصی در آن وجود دارد و در هنگام جوش کاری مقداری از آن به دلیل سرعت بالای انجماد در جوش کاری لیزر در فلز جوش به دام می‌افتد) باشد. همچنین در قسمت‌هایی از سطح مقطع جوش که به روش آستنیتی منجمد شده‌اند، با حرکت به فلز جوش پالس‌های بعدی در بالای سطح مقطع جوش، اندازه ریزدانه‌ها ریزتر شده است. این مهم به دلیل سرعت سرمایش بیشتر با تأثیر کمتر پالس‌های لیزر بعدی و افزایش تأثیر جریان گاز محافظ است.

رشد رونشستی ۵

اگر جهت‌های مناسب کریستالی بر روی هم قرار گیرند، ساختار کریستالی در مرز ناحیه ذوب در هنگام انجماد،

نمونه در اشکال زیر آورده شده‌اند.

نمونه شماره ۱

همان طور که در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود، در نمونه ۱، شکست از انتهای پاس جوش شروع شده و به دو طرف پیش‌روی کرده است. در سطح مقطع شکست این نمونه شیار ناشی از عدم اتصال مناسب ابتدا و انتهای درز جوش و ناحیه لهیده شده دیده می‌شود. ناحیه لهیده شده ممکن است حین شکست یا بعد از آن به وجود آمده باشد.

نمونه شماره ۲

در نمونه ۲ حفره های بزرگ در سطح شکست مشاهده می‌شود که منجر به تسهیل شکست شده‌اند (شکل ۱۲). این حفره ها می‌تواند ناشی از چربی های سطحی و یا دمش نامناسب گاز محافظ باشد که به صورت مک در فلز جوش به دام افتاده اند.

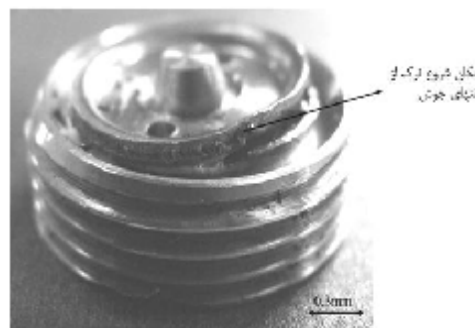
مناسب ابتدا و انتهای درز جوش رخ داده است (شکل ۱۳). به دلیل اکسید شدن سطحی جوش میزان اختلاط و چسبندگی در ابتدا و انتهای جوش که روی هم می‌افتند کاهش می‌یابد و می‌تواند موجب کاهش استحکام در این نقطه شود.

نمونه شماره ۴

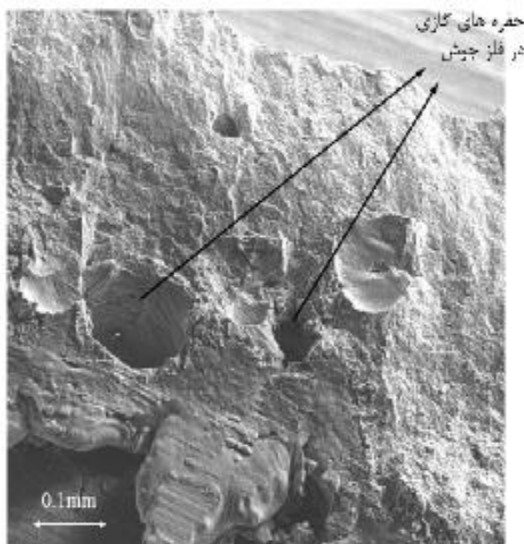
در نمونه ۴، ولتاژ کم جوش کاری سبب عمق نفوذ کم جوش شده و در نتیجه مسیر رشد ترک اکثراً در درون جوش بوده است. در ضمن به نظر می‌رسد، شکست از نقطه خاصی شروع نشده است، بلکه از چند نقطه به طور همزمان رخ داده است (شکل ۱۴).



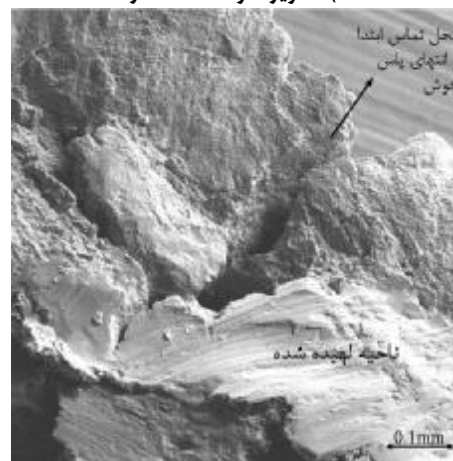
الف) تصویر نمونه ۲ نشت کرده



الف) تصویر نمونه ۱ نشت کرده



ب) تصویر سطح شکست
شکل ۱۲: نمونه شماره ۲.



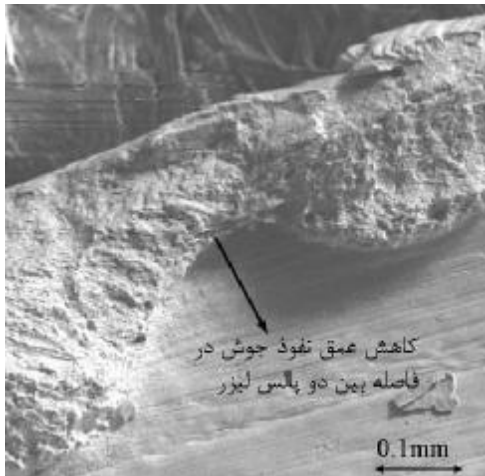
ب) تصویر سطح شکست
شکل ۱۱: نمونه شماره ۱.

نمونه شماره ۳

در نمونه ۳، شکست در مرحله ۱ به دلیل عدم اتصال



الف) تصویر نمونه ۵ نشست کرده



ب) تصویر سطح شکست
شکل ۱۵: نمونه شماره ۵.

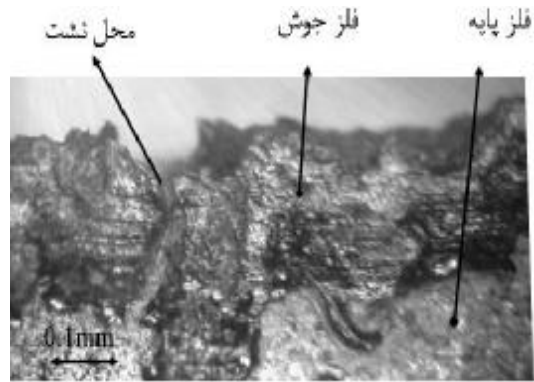
نمونه شماره ۶

در سطح شکست نمونه ۶، در یک نیمه سطح شکست
لهیدگی در اثر تغییر فرم حین شکست مشاهده می‌شود
(شکل ۱۶).

نمونه شماره ۷

مسیر رشد ترک در این نمونه، به طور واضح از کنار
محل‌های ریزش مذاب در هر پالس آغاز شده و به درون فلز
جوش امتداد یافته است (شکل ۱۷).

نتایج آزمایش پارگی نمونه‌ها، نشان می‌دهد که ترک از
کنار فلز جوش آغاز شده و به درون فلز جوش یا لبه جوش
امتداد یافته است (شکل‌های ۱۸ و ۱۹). فولاد مورد
آزمایش دارای داکتیلیته حدود ۳۰ درصد بوده و بنابراین
مشاهدات ریزساختاری سطوح شکست که حاکی از شکست
نرم است، صحیح است و احتمال تغییر در نوع شکست به
کلیواژ وجود ندارد، مگر با افزایش سیکل اعمال تنش و
کاهش قابل ملاحظه دمای محیط که در این تحقیق مد
نظر نبوده است.



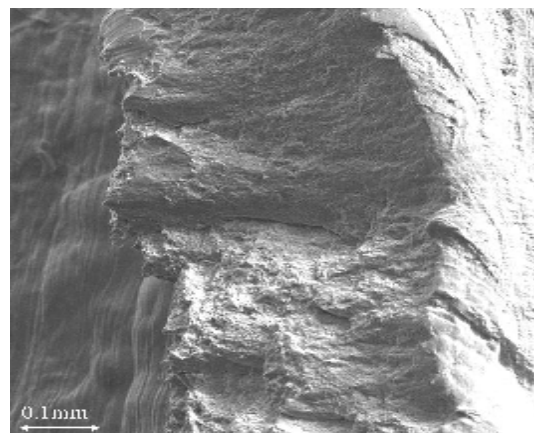
شکل ۱۳: محل نشست در نمونه شماره ۳.

نمونه شماره ۵

در سطح شکست نمونه ۵، حفره‌های ریزی مشاهده
می‌شود و علاوه بر آن، کاهش شدید عمق نفوذ بین دو
پالس لیزر (شکل ۱۵) در اثر کم بودن درصد روی هم
افتادگی پالس‌ها، باعث تمرکز تنش و تسهیل شکست شده
است. در قسمتی از جوش شکست در لبه جوش ادامه یافته
است.

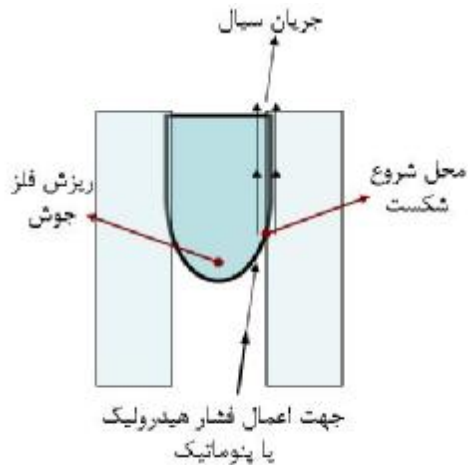


الف) تصویر نمونه ۴ نشست کرده



ب) تصویر سطح شکست

شکل ۱۴: نمونه شماره ۴.



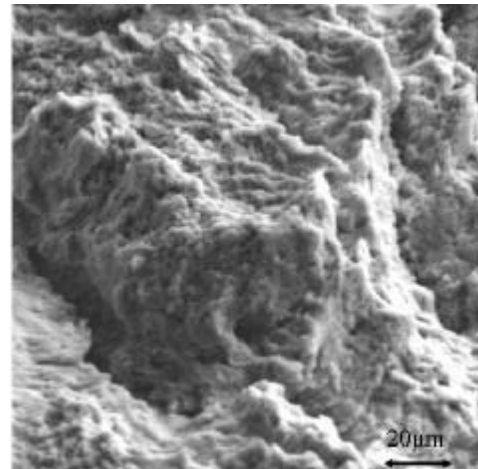
شکل ۱۸: شماتیک مکانیزم شکست نمونه‌ها در حالت کلی.



شکل ۱۹: مکانیزم شکست نمونه‌ها در حالت کلی.



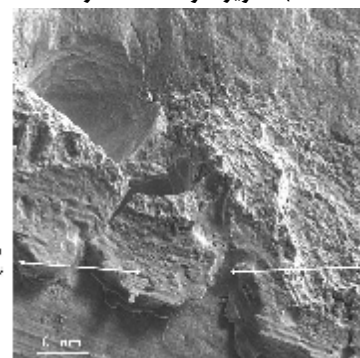
الف) تصویر نمونه ۵ نشست کرده



ب) تصویر سطح شکست
شکل ۱۶: نمونه شماره ۶.



الف) تصویر نمونه ۷ نشست کرده



ب) تصویر سطح شکست
شکل ۱۷: نمونه شماره ۷.

نتیجه‌گیری

موارد زیر از مشاهده سطوح شکست نمونه‌های آزمایش نشست سنجی قابل توجه است.

۱. در فولاد با درصد کرم معادل به نیکل معادل بیشتر (۱/۷) انجماد فریتی و در فولاد با درصد کرم معادل به نیکل کمتر (۱/۶۱) انجماد آستنیتی رخ داده است.

۲. در انجماد فریتی با کاهش سرعت سرمایش مقدار فریت کاهش می‌یابد.

۳. در انجماد آستنیتی با کاهش سرعت سرمایش (در اثر افزایش گرمای ورودی به جوش) با در نظر گرفتن میزان کرم معادل به نیکل معادل، احتمال تبدیل حالت انجمادی آستنیتی به فریتی وجود دارد که در فولاد با درصد کرم معادل به نیکل معادل برابر ۱/۶۱ این اتفاق رخ داده است.

کنترل شوند.

فهرست علائم

F : فریت

HAZ : ناحیه متأثر حرارت در جوش

OM : میکروسکوپ نوری

SEM : میکروسکوپ الکترونی روبشی

C_{req} : کرم معادل

Ni_{eq} : نیکل معادل

OP : درصد رویهم افتادگی پالس‌های لیزر

۴. با مشاهده سطوح شکست همه نمونه‌ها، در می‌یابیم که مورفولوژی سطح شکست آنها در آزمایش پارگی اتصال حفره‌ها بوده که مؤید شکست نرم و جذب انرژی بالا حین شکست است.

۵. نتایج آزمایش پارگی نمونه‌ها نشان می‌دهد که ترک از کنار فلز جوش آغاز شده و به درون فلز جوش یا لبه جوش امتداد یافته است.

۶. در برخی از نمونه‌ها عواملی دیگر نظیر حفره‌های گازی، سردجوشی، وجود کاهش عمق نفوذ بین پالس‌های لیزر و تمرکز تنش ناشی از آن، در تسهیل شکست مؤثر بوده اند و برای افزایش مقاومت به شکست این جوش‌ها، لازم است مقدار این عیوب

مراجع

- 1 - Norish, J. (1992). *advanced welding processes*, Iup, British.
- 2 - Christopher Dawes, (1992). *laser welding*, Abington publishing.
- 3 - Lippold, J. C. and Kotecki in, D. J. (2004). *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*, edited by Wiley Intersection, Publications/ A John Wiley & Sons, INC.
- 4 - ASM HANDBOOK, (1995). *Welding, Brazing and Soldering – Selection of Wrought Austenitic Stainless Steels*, Vol. 6.
- 5 - Castner, H. R. (1993). "What you should know about austenitic stainless steels." *Weld. J. Apr.*
- 6 - ATI Allegheny Ludlum Technical data stainless steel types 321, 347, 348.
- 7 - Lung Kwang Pan, Che Chung Wang, Ying Ching Hsiao, Kye Chyn Ho. (2004). "Optimization of Nd:YAG laser welding onto magnesium alloy via Taguchi analysis." *Optics & Laser Technology*, Vol. 37, PP. 33 – 42.
- 8 - Dillinger, L. (2002). "Revealing delta ferrite in martensitic stainless steels." *Met-Tips, Ideas for Metallographic Procedures*, No. 5, PP. 118-123.
- 9 - Military standard, MIL-M-8856b.
- 10 - Shankar, V., Gill, T. P. S., Mannan, S. L. and Sundesan, S. (2003), "Solidification cracking in austenitic stainless steel welds." *Sadhana*, Vol. 28, Jun/Aug.
- 11 - ASM Handbook, (1995), Vol.6, "Welding, brazing and soldering." *ASM International*.
- 12 - Lippold, J. C. (1994). "Solidification behavior and cracking susceptibility of pulsed laser welds in austenitic stainless steels." *Welding Journal*, Vol. 73, No. 6, June, PP.129-139.
- 13 - Gou, W. and Kar, A. (1999). "Prediction of microstructures in laser welding of stainless steel AISI 304." *Journal of laser applications*, August.
- 14 - Vitek, J. M. and David, S. A. (2002). "Improved ferrite number prediction that accounts for cooling rate effects." *Welding Journal*, March, PP. 43-50.
- 15 - David, S.A., Vitek, J. M. and Hebble, T. L. (1987). "Effect of Rapid Solidification on Stainless Steel Weld Metal Microstructures and Its Implications on the Schaeffler Diagram." *Welding Journal*. Vol. 66, No. 10, PP. 289 -300.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Shielded Metal Arc Welding
- 3 - Dendrite Tip Temperature
- 5 - Epitaxial Growth

- 2 - Electron Beam Welding
- 4 - Image Analyzer