



بررسی ریزساختاری و خواص مکانیکی اتصال هم جنس آلیاژ Rene 80 با استفاده از جوشکاری لیزر Nd:YAG ضربانی

حسن اخیری اردکانی^{۱*}، سید علی اصغر اکبری موسوی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و متالورژی و مواد، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران

*Hassan.akhiri@ut.ac.ir

ارسال: اردیبهشت ماه ۹۶ پذیرش: تیر ماه ۹۶

چکیده

آلیاژ Rene 80 از سوپرآلیاژهای پایه نیکل است که به دلیل پایداری ریزساختار و حفظ خواص مکانیکی در دمای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش سعی شده است، متغیرهای مناسب جوشکاری لیزر Nd:YAG ضربانی Rene 80 به دست آورده شود. از این رو با استفاده از دستگاه جوشکاری لیزر Nd:YAG با توان ۹۰ وات تحقیقاتی بر روی اثر متغیرهای پهنای زمانی ضربان، بسامد و سرعت جوشکاری بر نمونه‌های آلیاژ Rene 80 ریخته‌گری شده به ضخامت ۱ میلی‌متر انجام شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که ریزساختار جوش شامل دانه‌های ستونی در مرز و دانه‌های محوری در مرکز جوش است. در مرز جوش گرادیان حرارتی (G) بالاتر بوده و دانه‌ها در خلاف جهت انتقال حرارت رشد کرده‌اند. ترک انجمادی از عیوب جوش در Rene 80 است که به دلیل حضور فازهای ترد و شکننده کاربیدهای MC در آلیاژهای Rene 80 ریخته‌گری شده و هم‌چنین تنش‌های حرارتی ایجاد می‌شود. می‌توان با افزایش پهنای زمانی ضربان و بسامد، هم‌پوشانی ضربان‌ها را افزایش داده که موجب کاهش شیب دمایی و در نتیجه کاهش تنش حرارتی وارده به جوش می‌شود. بنابراین با کنترل میزان تنش‌های حرارتی وارده به جوش می‌توان از ایجاد ترک انجمادی جلوگیری کرد. نتایج آزمون سختی نشان می‌دهد که سختی در جوش بالاتر از فلز پایه بوده است و مقدار آن در عرض حوضچه به دلیل تغییر ریزساختار متفاوت است.

کلمات کلیدی: جوشکاری لیزر، Rene 80، ریزساختار، ترک انجمادی.

۱. مقدمه

Rene 80 از سوپرآلیاژهای پایه نیکل است که در سال‌های گذشته در ساخت پره‌های توربین موتورهای جت به کار گرفته می‌شود. Rene 80 خواص مکانیکی بالایی دارد و در محدوده‌ی کاری دمای بالا پایداری ریزساختاری مطلوبی از خود نشان می‌دهد [۱].

استحکام سازی اولیه‌ی این آلیاژ از طریق تشکیل رسوبات مرتب بین فلزی γ که دارای ترکیب $Ni_3(Al, Ti)$ است، صورت می‌گیرد. اجزای قسمت‌های مورد استفاده در دماهای بالا در موتورهای توربین گازی تحت تنش‌های حرارتی و مکانیکی برای زمان‌های طولانی قرار می‌گیرند که سبب ایجاد ترک یا از دست رفتن قطعه می‌شود. به دلیل هزینه‌های زیاد، ترجیح داده می‌-

شود که قسمت‌های آسیب دیده تعمیر شوند. جوشکاری لیزر یکی از بهترین راهکارها در تکنیک‌های تعمیراتی و اتصال قطعات پیشرفته‌ی مورد استفاده در دمای بالا است [۲ و ۳].

تحقیقات اندکی در ارتباط با جوشکاری لیزر ضربانی Rene 80 انجام شده است. شهسواری، کوبی و همکاران، مطالعات ریزساختاری بر روی ناحیه‌ی متأثر از حرارت جوش Rene 80 در روش جوشکاری TIG با شرایط پیش از جوش متفاوتی انجام داده اند که نشان می‌دهد انحلال ذرات γ و تشکیل لایه‌ی مذاب برای تمامی نمونه‌های جوشکاری رخ می‌دهد. ناحیه‌ی مذاب در نمونه‌های بدون عملیات حرارتی پیش از جوش از کاربدهای MC و جزایر یونکتیک γ - γ' ، در جوش‌های پیرسازی شده از کاربدهای MC و ترکیبات بوراید Rene 80 و در جوش‌های با عملیات محلول‌سازی پیش از جوش از کاربدهای MC تشکیل شده اند [۴].

صفری و ناطق بر روی ریزساختار رنه ۸۰ ناشی از عملیات حرارتی GE Class A تحقیقاتی انجام داده‌اند. آن‌ها دریافتند که اگر چه عملیات حرارتی محلول‌سازی سبب انحلال رسوب γ' می‌گردد اما تمامی ذرات در رنه ۸۰ ریخته‌گری را حل نمی‌کند. پیرسازی اولیه باعث رشد ذرات γ' باقی‌مانده از عملیات محلول‌سازی و ذرات جدید γ' که در عملیات سرد کردن بعد از انحلال‌سازی ایجاد شده‌اند، می‌شود. پیرسازی نهایی، آخرین مرحله‌ی عملیات حرارتی نیز سبب رشد نهایی ذرات γ' مکعبی و ایجاد ذرات γ' کروی ثانویه می‌شود [۱].

مرادی و قریشی پژوهشی را در مورد متغیرهای جوشکاری لیزر بر هندسه‌ی حوضچه‌ی جوش رنه ۸۰ به انجام رسانده‌اند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که حرارت ورودی و متغیرهای فرآیند جوشکاری بر هندسه‌ی جوش تأثیرگذار است. سرعت جوشکاری مهم‌ترین متغیر است و فشار گاز خنثی به عنوان دومین متغیر مهم می‌باشد. افزایش بیش از حد فشار سبب ایجاد عیوب در حوضچه‌ی جوش می‌گردد [۵].

انتخاب صحیح مقدار متغیرهای جوشکاری لیزر از جمله عواملی است که بر رفتار جوش لیزر تأثیر مستقیم دارد. متغیرهای جوشکاری لیزر عبارتند از: ولتاژ، قطر پرتوی لیزر، پهنای زمانی ضربان، بسامد و سرعت جوشکاری. در این پژوهش تلاش شده است، بررسی‌های دقیقی بر تأثیر متغیرهای پهنای زمانی ضربانی و بسامد جوشکاری لیزر بر ریزساختار و عیوب جوش انجام شود. هدف از پژوهش دست‌یابی به جوش‌کاری از هرگونه عیوب در ساختار است.

۲. روش تحقیق

برای جوشکاری لیزر از دستگاه میکرولیزر ضربانی ساخت شرکت کاسمو لیزر استفاده شده است. مشخصات فنی دستگاه لیزر (متغیرها و محدوده‌ی آن‌ها) در جدول ۱ نشان داده شده است. نمونه‌های اولیه Rene 80 به شکل ورق و به ضخامت ۱ میلی-متر می‌باشند که در داخل محلول استون شست‌وشو داده شده‌اند. از یک فیکسچر مخصوص جهت ثابت نگه داشتن نمونه و حفظ موقعیتش در طول فرآیند جوشکاری استفاده شده است. در طول فرآیند گاز آرگون با دبی ۸ لیتر بر دقیقه از حوضچه‌ی جوش محافظت کرده است. ولتاژ دستگاه لیزر، قطر پرتوی لیزر در حالت متمرکز و سرعت جوشکاری ثابت و به ترتیب برابر ۴۵۰ ولت، ۰/۶ میلی‌متر و ۱/۲۵ میلی‌متر بر ثانیه بوده است. فاصله‌ی کانونی در تمام موارد برابر ۱۶ میلی‌متر است.

ترکیب شیمیایی Rene 80 در جدول ۲ نشان داده شده است. بعد از قرارگیری نمونه‌ها در داخل فیکسچر، اشعه لیزر به صورت خطی و با سرعت قابل تنظیم در امتداد نمونه حرکت می‌کند. از یک قطعه‌ی مسی به ضخامت ۱۲ میلی‌متر به عنوان پشتی استفاده شده است.

۱.۲. آزمایش‌ها

در این پژوهش از بین متغیرهای جوشکاری لیزر، پهنای زمانی ضربان و بسامد جهت درک چگونگی تأثیر این متغیرها بر عیوب جوش لیزر، مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها طبق جدول ۳ انجام شد. در این آزمایش‌ها سعی شده تا اثر متغیرهای گفته

شده بر عیوب و خواص مکانیکی جوش لیزر با تغییر در هر متغیر بررسی شود تا بتوان متغیر مناسب جهت ایجاد جوش عاری از عیب را شناسایی کرد.

۲.۲. متالوگرافی

به منظور بررسی ریزساختار و عیوب جوش، نمونه‌های جوشکاری شده از سطح مقطع عرضی جوش برش داده شده‌اند. پس از سمباده‌زنی و پولیش از محلول ماربل محتوی ۱۰ گرم سولفات مس، ۵۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک و ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر برای حکاکی شیمیایی نمونه‌ها استفاده گردید. نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند.

جدول ۱- مشخصات فنی دستگاه جوش لیزر

پارامتر	مقدار
طول موج	۱۰۶۴Nm
توان متوسط	۹۰W
بسامد	(۰/۱-۱۴)Hz
تعداد لامپ	۱
انرژی ضریان	(۰/۵-۶) μ
ولتاژ ضریان	(۰-۵۵۰)V
پهنای زمانی ضریان	(۱-۱۰)ms
قطر پرتو در حالت متمرکز	(۰-۲)mm
برق مصرفی	۲۵A / ۵۰Hz / ۲۲۰V

جدول ۲- ترکیب شیمیایی Rene 80 مورد استفاده

نام عنصر	نماد	درصد وزنی
نیکل	Ni	پایه
کروم	Cr	۱۴/۷۸
کبالت	Co	۹/۵۰
آلومینیم	Al	۳/۱۸
نیوبیم	Nb	۳/۹۸
تیتانیوم	Ti	۴/۶۸
تنگستن	W	۴/۰۸
کربن	C	۰/۱۷

جدول ۳- متغیرهای جوشکاری Rene 80

شماره نمونه	پهنای زمانی ضریان (ms)	بسامد (Hz)	سرعت جوشکاری (mm/s)	قله متوسط توان (KW)	حرارت ورودی (J/mm)
۱	۳	۵	۱/۲۵	۲/۶۶	۲۰
۲	۶	۵	۱/۲۵	۰/۸۳	۲۰
۳	۹	۵	۱/۲۵	۰/۵۵	۲۰
۴	۶	۳	۱/۲۵	۰/۸۳	۱۲
۵	۶	۶	۱/۲۵	۰/۸۳	۲۴
۶	۶	۹	۱/۲۵	۰/۸۳	۳۶

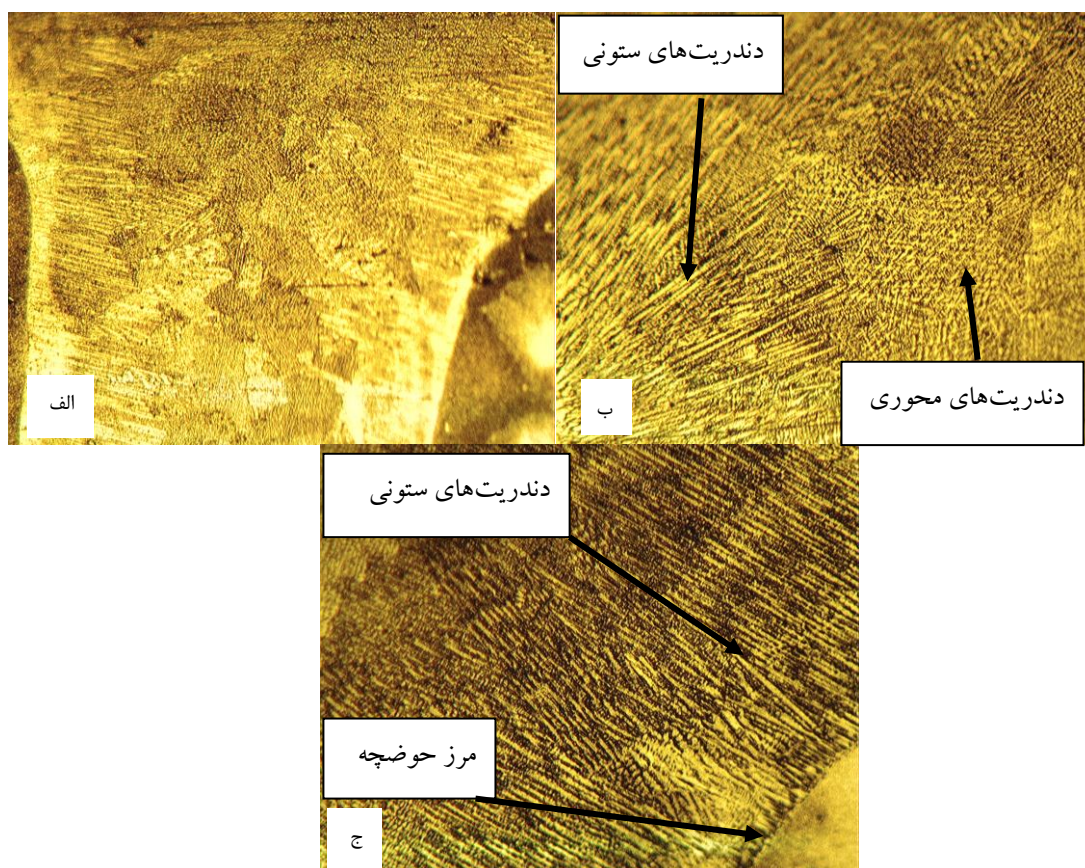
۳. نتایج و بحث

جوشکاری‌ها مطابق با متغیرهای درج شده در جدول ۳ انجام شده‌اند. با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی مجهز به EDS به بررسی ریزساختار و عیوب در جوش‌ها پرداخته شده است.

۱.۳. ریزساختار

ساختار جوش متشکل از دانه‌های محوری در مرکز جوش و دانه‌های ستونی در اطراف مرز جوش است. به دلیل میزان گرادیان حرارتی (G) و سرعت رشد (R) و در نتیجه میزان تحت تبرید که با نسبت G/R متناسب است، ساختار دندریتی در نواحی دور از مرز جوش و نواحی مرکزی حوضچه‌ی جوش هم‌محور و ساختار دندریتی در نواحی نزدیک مرز جوش ستونی و درشت است. زیرا شیب حرارتی بیشتر، در نواحی مرز جوش سبب می‌شود تا دندریت‌ها در خلاف جهت انتقال حرارت رشد کنند و دندریت‌های ستونی حاصل شود. از طرفی شیب حرارتی کمتر در داخل و نواحی مرکزی حوضچه‌ی جوش و نرخ سرمایش بالای جوش لیزر سبب می‌شود تا G/R کاهش یابد و در نتیجه تحت تبرید بالا می‌رود و ساختار به صورت دندریت‌های هم‌محور تشکیل می‌شود. قابل توجه است که سرعت بالای انجماد و رشد از مشخصه‌های جوشکاری لیزر است.

ریزساختار متشکل از دانه‌های ستونی و دانه‌ها محوری در همه‌ی نمونه‌ها دیده می‌شود. شکل ۱ تصاویر بعضی از ریزساختارهای حوضچه‌ی جوش Rene 80 را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصاویر مشخص است در کنار مرز حوضچه جوش، دانه‌ها به صورت ستونی و در مرکز حوضچه، دانه‌ها محوری است.



شکل ۱- ریزساختار حوضچه‌ی جوش Rene 80 (الف) نمونه ۳ با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر، (ب) نمونه ۴ با بزرگنمایی ۲۵۰ برابر، (ج) نمونه ۶ با بزرگنمایی ۲۵۰ برابر.

۲.۳. عیوب جوشکاری

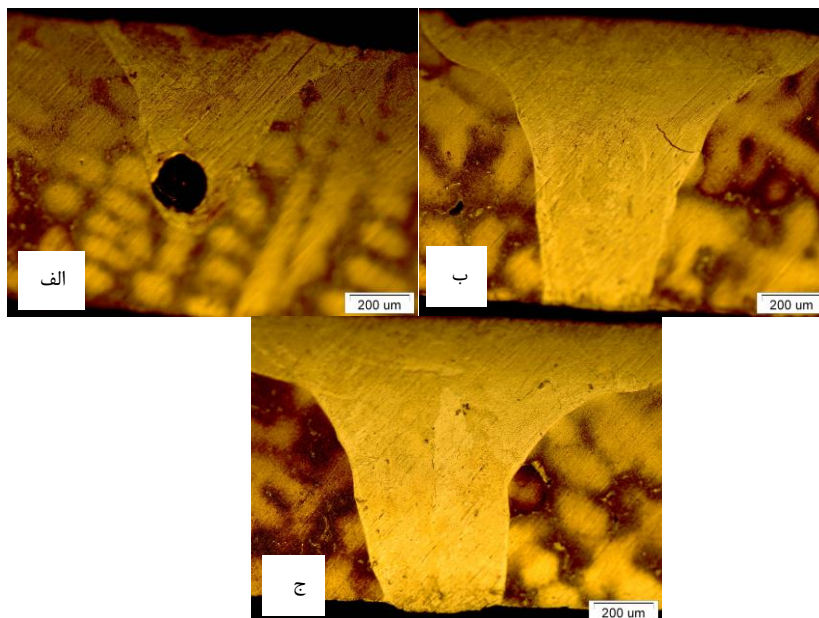
از جمله‌ی معیارهای مهم در انتخاب جوش مناسب، یکی عمق نفوذ و شکل مناسب حوضچه و دیگری عدم وجود عیب در ساختار جوش است. تمامی نمونه‌ها جهت بررسی‌های دقیق متالوگرافی، عکس‌برداری شده است. عیوب مشاهده شده در نمونه‌ها تخلخل و ترک انجمادی بوده است.

۱.۲.۳. تخلخل

مطابق جدول ۳، نمونه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ مربوط به افزایش پهنای زمانی ضربان هستند. در شکل ۲ تصاویر مربوط به این نمونه‌ها نشان داده شده است. تصویر الف شکل ۲ دارای تخلخل است اما با افزایش پهنای زمانی ضربان در نمونه‌های ۲ و ۳ تخلخل حذف شده است. قله‌ی متوسط توان، عامل مؤثر در تشکیل تخلخل در ساختار جوش است که از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید. هر چه قله‌ی متوسط توان بیشتر باشد، احتمال تشکیل تخلخل بیشتر است. طبق رابطه‌ی ۱، با افزایش پهنای زمانی ضربان، مقدار قله‌ی متوسط توان کاهش می‌یابد و بنابراین تخلخل حذف می‌شود [۶].

$$App = \frac{Ep (J)}{Tp (s)} \quad (1)$$

که در رابطه‌ی (۱) App قله‌ی متوسط توان بر حسب ژول بر ثانیه، Ep انرژی ضربان لیزر بر حسب ژول و Tp پهنای زمانی ضربان بر حسب ثانیه می‌باشد.



شکل ۲- تأثیر پهنای زمانی ضربان بر عیوب حوضچه جوش Rene 80، الف) نمونه ۱ با پهنای ضربان ۳ میلی‌ثانیه، ب) نمونه ۲ با پهنای ضربان ۶ میلی‌ثانیه، ج) نمونه ۳ با پهنای ضربان ۹ میلی‌ثانیه

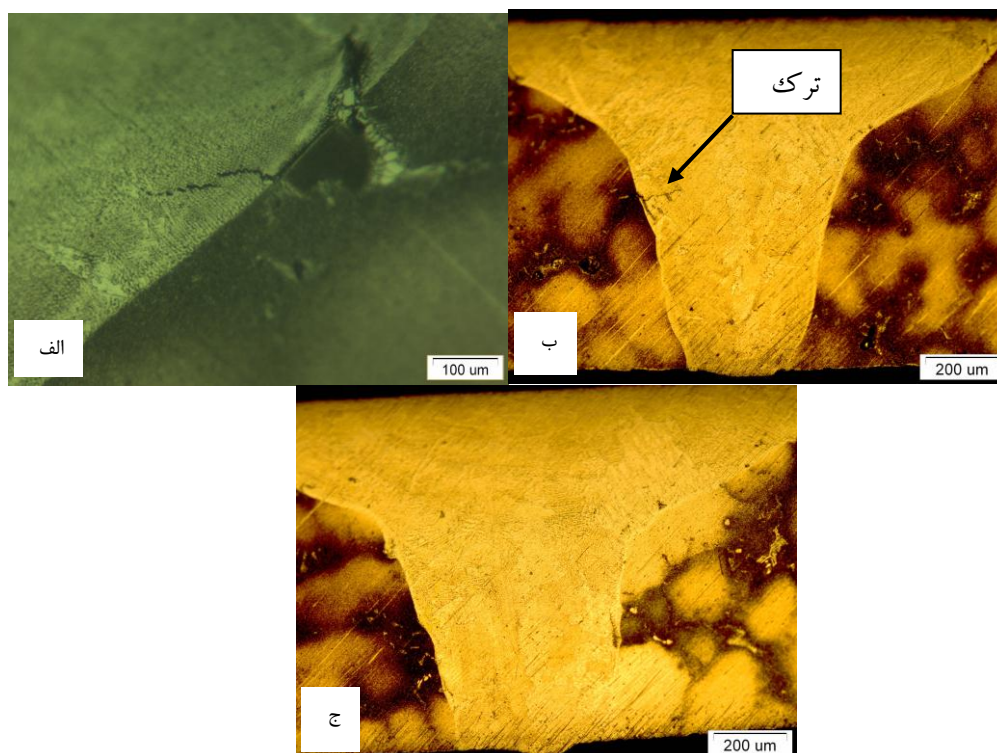
۲.۲.۳. ترک

از دیگر عیوب مشاهده شده در ساختار جوش، ترک‌های انجمادی نزدیک مرز جوش است. ایجاد ترک‌های انجمادی به حضور دو عامل متالورژیکی و مکانیکی به صورت هم‌زمان در جوش بستگی دارد. عامل متالورژیکی وجود فازهای ترد و شکننده در ساختار است. تنش‌های انقباضی و حرارتی موجود در ساختار جوش نیز عامل مکانیکی ایجاد ترک انجمادی هستند [۷].

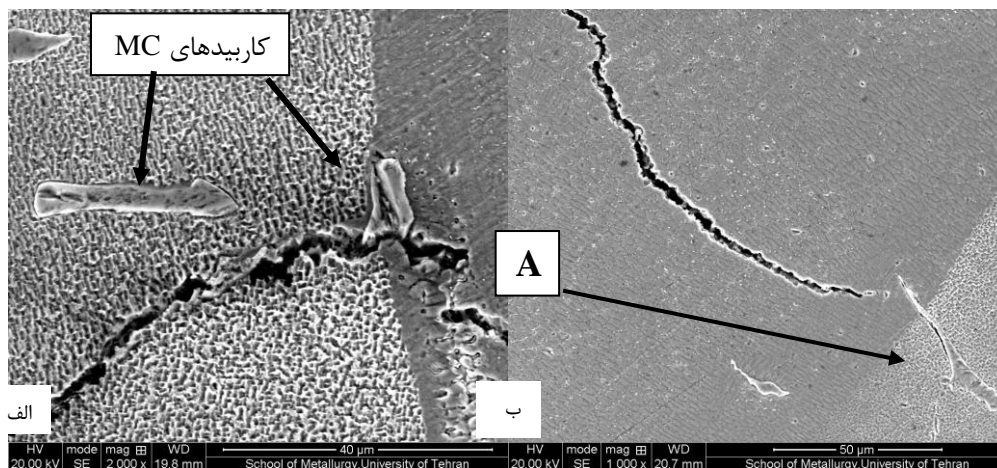
ترک در نمونه‌های شماره‌ی ۲، ۴ و ۵ از جدول ۳ مشاهده شده است. ترک‌های ایجاد شده در امتداد فازهای سفید رنگ تشکیل شده است. نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی (EDAX) این ترکیبات نشان می‌دهد که ترکیبات کاربید به فرم MC هستند

که در آن‌ها M می‌تواند Ti، Mo و W باشد. آلیاژ Rene 80 مورد استفاده به صورت ریخته‌گری تهیه شده است و بنابراین حضور کاربیدهای MC در آن قابل توجه است. عامل ایجاد ترک در نمونه‌ها حضور هم‌زمان فازهای ترد و شکننده‌ی کاربید MC و تنش‌های حرارتی وارد شده به آن‌ها در جوشکاری لیزر می‌باشد [۴].

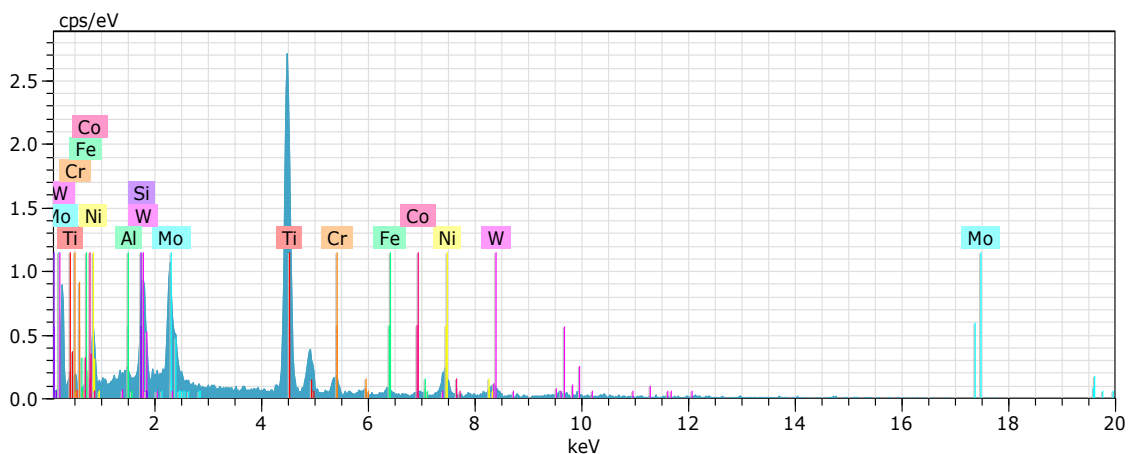
در شکل ۲ از تصویر ب به ج با افزایش پهنای زمانی ضربان از ۶ به ۹ میلی‌ثانیه ترک حذف شده است. مطابق با شکل ۳ در نمونه‌های ۴ و ۵ از جدول ۳، ترک مشاهده شده است. ترک‌های انجمادی در نمونه ۴ و ۵ با افزایش بسامد در نمونه‌ی ۶ حذف شده‌اند. افزایش پهنای زمانی ضربان و بسامد باعث می‌شود تا اثر پیش‌گرم ضربان قبلی بر روی ضربان بعدی افزایش یابد و به همین دلیل میزان شیب دمایی در جوش کاهش می‌یابد. با کاهش شیب دمایی میزان تنش‌های حرارتی در قطعه کمتر شده است. کاهش تنش‌های حرارتی راهی برای کاهش ترک‌های انجمادی می‌باشد. شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی ترک-ها را در نواحی اطراف کاربیدهای MC نشان می‌دهد. شکل ۵ و جدول ۴، آنالیز مربوط به ترکیب A در شکل ۴ می‌باشد. نتایج آنالیز نشان می‌دهد که عناصر W، Ti و Mo به ترتیب ۵۹/۴، ۱۲/۸ و ۱۰/۸ درصد وزنی از این ترکیبات را به خود اختصاص می‌دهند. با توجه به این امر که کاربیدهای MC غنی از این عناصر هستند، کاربیدی بودن ترکیب A مشخص می‌گردد [۸ و ۹].



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری الف) نمونه ۴ دارای ترک، ب) نمونه ۵ دارای ترک، ج) نمونه ۶ فاقد ترک



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی از الف) ترک نمونه شماره ۵، ب) ترک نمونه شماره ۲



شکل ۵- آنالیز شیمیایی ترکیب A مربوط به شکل ۴

جدول ۴- آنالیز شیمیایی ترکیب A مربوط به شکل ۴ (جدول شکل ۵)

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Ti	22	K-series	52.20	59.38	71.53	1.67
W	74	L-series	11.22	12.77	4.01	0.76
Mo	42	L-series	9.48	10.79	6.49	0.45
Ni	28	K-series	7.21	8.20	8.06	0.42
Cr	24	K-series	4.47	5.09	5.64	0.30
Fe	26	K-series	2.49	2.83	2.92	0.24
Co	27	K-series	0.50	0.57	0.55	0.11
Al	13	K-series	0.17	0.20	0.42	0.05
Si	14	K-series	0.16	0.18	0.38	0.05
Total:			87.90	100.00	100.00	

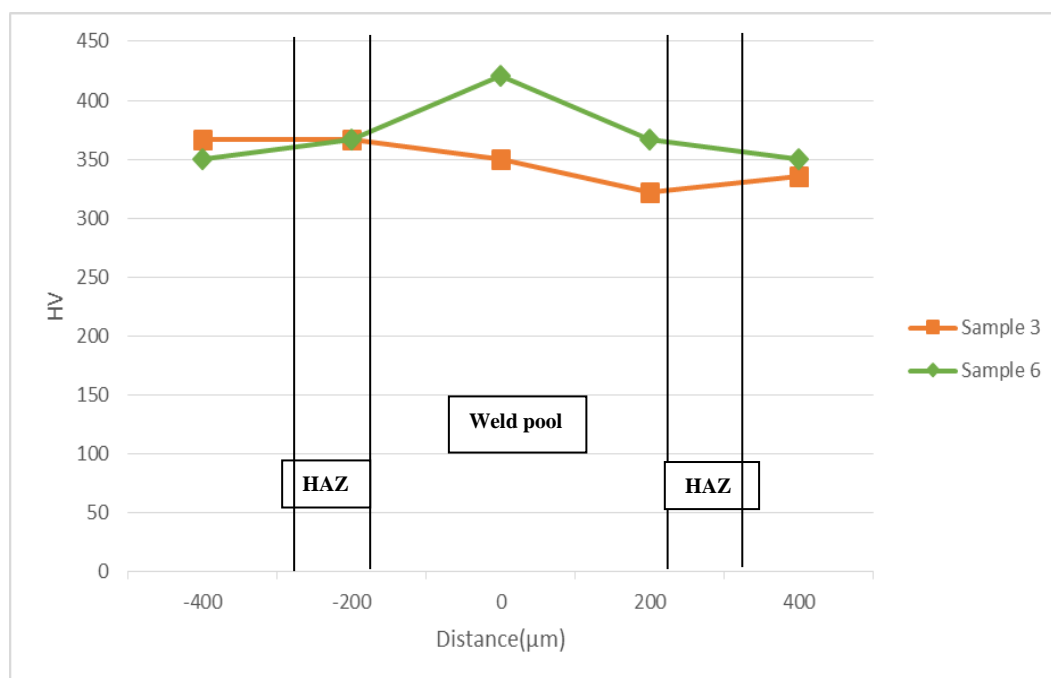
۳.۳. خواص مکانیکی

با توجه به آنچه گفته شده نمونه ۱ به دلیل تخلخل، نمونه‌های ۲، ۴ و ۵ به دلیل ترک مردود تلقی شده است. از نمونه‌های ۳ و ۶ که بدون عیوب و دارای عمق نفوذ کافی هستند، آزمون میکروسختی به عمل آمده است. نتایج به صورت شماتیک در نمودار ۲ آمده است. با توجه به نمودار حاصل، نمونه‌ی جوشکاری ۶ دارای بالاترین حد سختی نسبت به سایر نمونه‌هاست و بنابراین متغیرهای جوشکاری آن به عنوان متغیرهای بهینه انتخاب می‌گردد.

مقدار سختی مرکز جوش در اکثر نمونه‌ها، بالاتر از نواحی متأثر از حرارت و مرزی جوش است. یکی از دلایل آن را می‌توان ریزساختار و دانه‌بندی حوضچه‌ی جوش نام برد. زیرا در مرکز حوضچه‌ی جوش، دانه‌ها محوری و در نواحی مرزی، دانه‌ها ستونی هستند. یکی دیگر از دلایل افزایش سختی در حوضچه نسبت به نواحی اطراف آن، تنش‌های موجود در حوضچه‌ی جوش است که از سرعت بالای سرمایه‌ش در جوشکاری لیزر ناشی می‌شود. در نمونه‌ی ۶ نیز به دلیل بسامد بالاتر نسبت به سایر نمونه‌ها میزان حرارت ورودی طبق رابطه‌ی ۲ بیشتر بوده و بنابراین تنش‌های حرارتی بیشتری به حوضچه‌ی جوش وارد شده است.

$$\text{Heat input } \left(\frac{J}{mm} \right) = \frac{E_p (J) \times F (Hz)}{V \left(\frac{mm}{s} \right)} \quad (2)$$

که در رابطه‌ی (۲)، E_p انرژی ضربان بر حسب ژول، F بسامد لیزر بر حسب هرتز و V سرعت جوشکاری بر حسب میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد.



شکل ۶- تست میکروسختی ویکرز از حوضچه جوش و نواحی اطراف جوش

۴. انتخاب متغیر بهینه

با توجه به نتایج به دست آمده از تصاویر متالوگرافی و آزمون سختی، از بین متغیرهای مورد استفاده در جدول ۳، متغیرهای مربوط به نمونه‌ی شماره‌ی ۶ را می‌توان به عنوان متغیرهای بهینه برای جوشکاری لیزر Nd:YAG ضربانی بر روی ورق‌های به ضخامت ۱ میلی‌متر آلیاژ Rene 80 استفاده کرد. زیرا جوش حاصل از این متغیرها دارای شکل و عمق نفوذ مناسب بوده و عاری از هر گونه عیب می‌باشد. در نتایج آزمون سختی نیز بالاترین میزان سختی را از خود نشان داده است.

۵. نتیجه‌گیری

- ریزساختار جوش Rene 80 متشکل از دندریته‌های محوری در مرکز جوش و دندریته‌های ستونی در مرز حوضچه‌ی جوش است.
- شیب حرارتی بالاتر در نواحی مرز جوش سبب می‌شود تا دندریته‌ها در خلاف جهت انتقال حرارت رشد کنند و دندریته‌های ستونی ایجاد گردد.

- یکی از عیوب در جوش Rene 80 می تواند تخلخل باشد که با افزایش پهنای زمانی ضربان و در نتیجه کاهش قله‌ی متوسط توان، از احتمال ایجاد آن کاسته می شود.
- ترک‌های انجمادی ایجاد شده در نزدیکی مرز جوش Rene 80 به دلیل حضور هم‌زمان هر دو عامل فاز ترد و شکننده و هم‌چنین تنش در حوضچه‌ی جوش است.
- با افزایش پهنای زمانی ضربان و بسامد، شیب دمایی در جوش کاهش و بنابراین از میزان تنش‌ها کاسته می‌شود، در این صورت احتمال تشکیل ترک نیز کم می‌شود.
- مقدار سختی در مرکز حوضچه‌ی جوش بالاتر است که به دلیل حضور دانه‌های هم‌محور و هم‌چنین تنش حرارتی در جوش است.
- متغیرهای بهینه برای جوشکاری لیزر ورق با ضخامت ۱ میلی‌متر Rene 80 برابرند با: ولتاژ ۴۵۰ ولت، پهنای زمانی ضربان ۶ میلی‌ثانیه، بسامد ۹ هرتز، سرعت جوشکاری ۱/۲۵ میلی‌متر بر ثانیه و قطر پرتوی ۰/۶ میلی‌متر.

۶. مراجع

1. J. Safari and S. Nategh, "On the heat treatment of Rene-80 nickel-base superalloy," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 176, no. 1-3, pp. 240-250, 2006.
2. Osoba, "On preventing HAZ cracking in laser welded DS Rene 80 superalloy," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 5, pp. 897-902, 2011.
3. W. Osterle, S. Krause, T. Moelders, A. Neidel, G. Oder, and J. Volker, "Influence of heat treatment on microstructure and hot crack susceptibility of laser-drilled turbine blades made from Rene 80," *Mater. Charact.*, vol. 59, no. 11, pp. 1564-1571, Nov. 2008.
4. H. A. Shahsavari, A. H. Kokabi, and S. Nategh, "Effect of preweld microstructure on HAZ liquation cracking of Rene 80 superalloy," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 5, pp. 547-555, 2007.
5. M. Moradi and M. Ghoreishi, "Influences of laser welding parameters on the geometric profile of Ni-base superalloy Rene 80 weld-bead," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 55, no. 1-4, pp. 205-215, 2011.
6. X. Cao, M. Jahazi, J. P. Immarigeon, and W. Wallace, "A review of laser welding techniques for magnesium alloys," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 171, no. 2, pp. 188-204, 2006.
7. E. M. Anawa and A. G. Olabi, "Control of welding residual stress for dissimilar laser welded materials," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 204, no. 1-3, pp. 22-33, 2008.
8. M. J. Torkamany, S. Tahamtan, and J. Sabbaghzadeh, "Dissimilar welding of carbon steel to 5754 aluminum alloy by Nd : YAG pulsed laser," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 1, pp. 458-465, 2010.
9. W. J. Han, J. G. Byeon, and K. S. Park, "Welding characteristics of the Inconel plate using a pulsed Nd:YAG laser beam," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 113, no. 1-3, pp. 234-237, 2001.