



جوشکاری سوپر آلیاژ پایه نیکل روسوب سخت شونده

محمد رضا محقق نیا^۱، رضا تقی آبادی^۲

^۱ فارغ تحصیل کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام خمینی قزوین (ره)، قزوین، ایران

^۲ دانشیار، بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام خمینی قزوین (ره)، قزوین، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹-۹-۱۶ تاریخ دریافت: ۱۳۹۹-۹-۱۰

چکیده: ترکیبی از خواص مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی در دمای بالا در آلیاژهای پایه نیکل سبب گردیده، که در کارکردهای دما بالا در ساخت توربین های توید برق به کار برود. به جهت تولید این تجهیز و به ضرورت اتصال نهایی، به کرات از فرآیند جوشکاری در اتصال این قطعات به هم استفاده می گردد. در این مقاله به بررسی متغیرهای فرآیند جوشکاری و تاثیر آن بر زیر ساختار نهایی پرداخته می شود. این خانواده با بهره گیری از رسوبات بین فازی، مقاومت بالایی در کارکرد دما بالا دارند. این مقاومت در اثر عملیات آنیل-روسوب سختی، پس از اتمام فرآیند تولید، ایجاد می گردد. با توجه به حساسیت قطعه با توجه به عملیات فوق، میبایست تنش و عوامل ایجاد کننده ترک در فرآیند جوشکاری توجه ویژه ای داشت. در اثر وجود عناصر آلیاژی و فرآیند های رسوب سختی این خانواده مستعد به ترک دار شدن ناشی از فرآیند جوشکاری و عملیات های پس از آن می باشند.

واژه های کلیدی: سوپر آلیاژ پایه نیکل، جوشکاری GTAW آرگون، ترک منطقه متاثر از حرارت جوشکاری، مطالعه ریزساختار

۱. مقدمه

در دهه ۱۹۵۰، در اثر شناسایی خواص استحامی و مقاومت به خوردگی ناشی از فرآیند ایجاد رسوبات در آلیاژهای پایه نیکل سبب توسعه فناوری ساخت توربین های جت گردید. در اثر وجود عناصر آلیاژی (Cr, Co, Fe, Mo, W, and Ta) سبب ایجاد ذرات رسوب شامل عناصر (Ti, CR, Ta Al and Nb) شده که این امر سبب بهبود خواص خوردگی و مکانیکی تا دماهای بالا می گردد. همچنین در این مواد با بهره گیری از مواد آلیاژی B,ZR خواص خزشی را جهت انجام فعایت در دمای با بهبود داده اند. عنصر آلیاژی Hf به عنوان بهبود ضربه پذیری سبب ارتقاء چقرمگی آلیاژ شده است.

در هنگام جوشکاری و در اثر انجماد سریع در منطقه نفوذی، امکان ایجاد ذرات فاز دوم وجود نداشته و از این رو فازهای رسوبی در این منطقه کاهش می یابد. این امر سبب جدایش در منقه جوش شده و در نتیجه سبب کاهش جوش پذیری در آلیاژ و خواص نهایی جوش می شود. بنابراین برای حذف نتایج نامطلوب عملیات پس گرمایی بر روی جوش مورد نیاز می باشد؛ که متأسفانه این امر می تواند با ترکیب با کرنش ناشی از پیرسازی سبب تریک بین دانه ای شود. که در مجموع سبب استحکام کمتر در اثر جدایش رخ می شود. لذا برای بهبود خواص عملیات حرارتی بعد از جوشکاری رخ می دهد. در شکل ذیل پوتکتیک ایجاد شده در منطقه جوشه نمایش درآمده است.

فازهای رسوبی γ' و γ'' ناشی از ترکیبات Ni 3(Ti, Al) سبب ایجاد آرایه ای منظم در زیرساختار آلیاژ شده؛ در نتیجه این نظم، سبب افزایش استحکام دما بالا به دلیل ممانعت از حرکت نابجایی ها می شود. فلذا جهت عبور از نابجایی می بایست، این فاز تقویت کننده را برش داده و یا آن را دور بزنند.

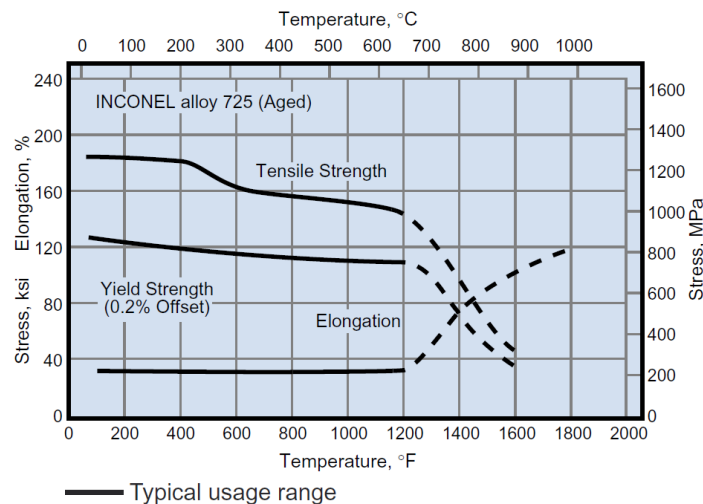
آلیاژ ۷۲۵، با مصارف متنوع در صنایع نفت، نظامی، هوایی و دریایی یکی از پرکاربردترین آلیاژهای این خانواده می‌باشد. این آلیاژ در اثر عملیات حرارتی به چقرمگی بالا و در نتیجه مقاومت به ترک ناشی از هیدروژن و تنش دست می‌یابد. ترکیب شیمیایی و خواص آلیاژ به شرح ذیل می‌باشد. در ذیل به بیان خواص این آلیاژ به عنوان نماینده این گروه پرداخته می‌شود.

جدول ۱- ترکیب آلیاژی آلیاژ UNS N07725 ASTM B 805, ASME Code Case 2217 [1]

55.0 – 59.0 Ni	1.0 – 1.7Ti	0.20 max. Si
Cr 19.0 – 22.5	0.35 max. Al	0.015 max. P
7.0 – 9.5 Mo	0.03 max. C	0.010 max. S
2.75 – 4.0 Nb	0.35 max. Mn	Balance Fe

جدول ۲- خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ UNS N07725 ASTM B 805, ASME Code Case 2217 [1]

Density, lb/in ³	0.300
g/cm ³	8.31
Melting Range, }F.....	2320 – 2449
}C.....	1271 – 1343
Permeability at 200 Oersted (15.9 kA/m)	<1.001
Coefficient of Expansion, 70 – 200 }F, 10 ⁻⁶ in/in • }F.....	7.22
20 – 100 }C, }m/m • }C	13.0
Thermal Conductivity, Btu • in/ft ² • h • }F.....	73.8
W/m • }C	10.6
Electrical Resistivity, ohm • circ mil/ft.....	688
} • m	1.144



شکل ۱- نمودار دما- خواص مکانیکی آلیاژ UNS N07725 ASTM B 805, ASME Code Case 2217 [1]

۲. جوش پذیری

در فرآیند جوشکاری این خانواده از آلیاژهای پایه نیکل، تمایل له ترک دار شدن گرم در فرآیند جوشکاری می‌باشد. این ترک‌ها حتی امکان ایجاد ترک‌های ریز عرضی وجود دارد. دلیل ایجاد این ترک‌ها، وجود فاز مایع در مرز دانه و همچنین تنش ناشی از خنک شدن سریع ناشی از جوشکاری می‌باشد. معمولاً سوپرآلیاژ پایه نیکل مقاومت خوبی در برابر ترک دار شدن دارد. یکی از عوامل مشکل ساز در فرآیند جوشکاری، وجود آلاینده‌ها که مهمترین آن کربن، اکسیژن و گوگرد می‌باشد. [2]

برای جوشکاری این خانواده از آلیاژها معمولاً از روش‌های ذوبی مانند EBW و GTAW و یا در روش‌های نوین جوشکاری با لیزر و یا ترکیبی از موارد مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای مهم مورد مطالعه، استفاده توان‌های متفاوت دستگاه منبع انرژی می‌باشد که این امر با توجه به نوع جنس ماده و قطبیت جریان متفاوت است؛ معمولاً در این فرآیند از جریان مستقیم با قطبیت منفی استفاده می‌شود. این قطبیت سبب افزایش عمق نفوذ در فرآیند جوشکاری می‌شود. محدودیت دیگر در فرآیند جوشکاری ایجاد ترک خوردگی در منطقه جوش و منطقه متأثر از حرارت در نتیجه تنش‌های موضعی و عواملی مانند هیدروژن می‌باشد. که این امر سبب کاهش عمر و عدم کارایی قطعه کار می‌گردد. عملیات حرارتی پس از جوشکاری نیز سبب بهبود خواص می‌گردد.

۱-۲- جوشکاری با روش GTAW

فرایند GTAW بدون ماده مصرفی برای مقاطع تا ضخامت ۳ میلی متر و در ضخامت‌های بالای آن از فیلر استفاده می‌شود. فرآیند اجرای این روش می‌تواند به صورت دستی و یا اتوماتیک به کار رود. بر اساس مطالعات انجام شده برای بهینه یابی پارامترهای جوش، برای کنترل می‌بایست با ترکیب آمپر و ولتاژ و سرعت غذا دهی سیم جوش کنترل نمود. اندازه دانه شبیه روش معمول GTAW می‌باشد. در این روش اعوجاج ناشی از فرایند کاهش یافته است. و در نهایت به بررسی خواص مکانیکی و سختی ناشی از جوش در نقاط زیرلایه، منطقه متأثر از حرارت، منطقه جوش بر اساس استانداردهای AWS پرداخته شده است.

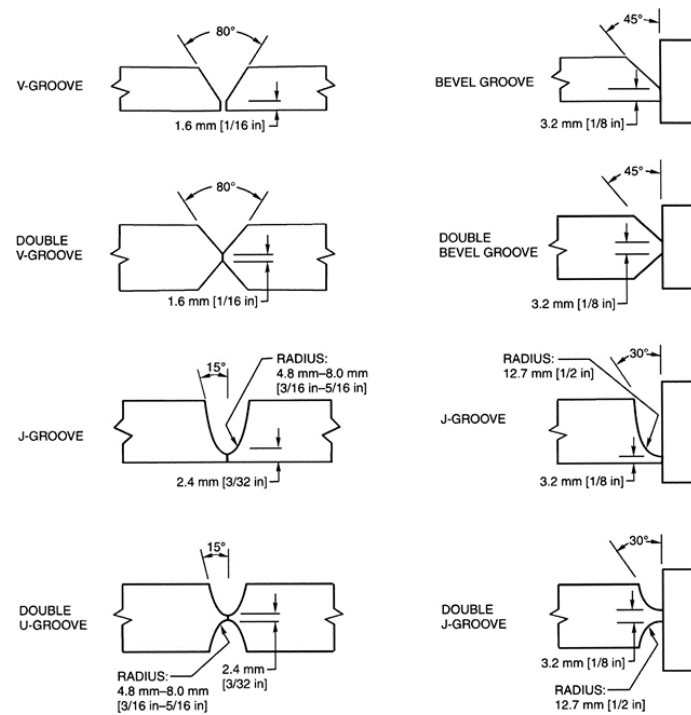
با توجه به شیوه استحکام دهی ناشی از رسوبات در دماهای وابسته به ترکیب دقیق و ریزساختار می‌باشد. لذا می‌بایست؛ فرایند ساخت در حالت آنیل فرم دهی، ماشین کاری و جوشکاری می‌شود و بعد از جوشکاری فرایند عملیات حرارتی آنیل و پیر سازی انجام شود. انجام عملیات پس از جوشکاری می‌تواند، سبب ایجاد ترک در ساختار شود. در جدول ۳ به مشکلات معمول در فرآیند جوشکاری این خانواده از سوپر آلیاژها پرداخته می‌شود.

جدول ۳- مروری بر آلیاژهای باز پایه نیکل و نگرانی‌های اصلی قابلیت جوشکاری مربوط به هر سیستم آلیاژ [3]

<i>Alloy family</i>	<i>Alloy system</i>		<i>Commercial alloy examples</i>	<i>Main weldability concerns</i>
Corrosion-resistant	Solid-solution strengthened	Ni	Nickel 200	WM porosity
		Ni-Cu	400, K-500	WM porosity, solidification cracking
		Ni-Mo	B-2, B-3 [®]	WM and HAZ corrosion
		Ni-Cr-Mo	G-35 [®] , 59	WM and HAZ corrosion
		Ni-Cr-Mo-W	C-276, C-22 [®] , 686	WM and HAZ corrosion
		Ni-Cr-Mo-Cu	C-2000 [®]	WM and HAZ corrosion
		Ni-Mo-Cr	HYBRID-BC1 [®]	WM and HAZ corrosion
High-temperature	Solid-solution strengthened	Ni-Fe-Cr	800H, RA330 [®] , HR-120 [®]	Liquation cracking
		Ni-Cr-Fe	600, 690	Ductility-dip cracking

		Ni-Cr-Fe-Mo	HASTELLOY X	Liquation cracking
		Ni-Cr-Mo-Nb	625, 625SQ [®]	Solidification cracking
		Ni-Cr-Co-Mo	617	Liquation cracking
		Ni-Cr-W-Mo	230 [®]	Solidification and liquation cracking
		Ni-Co-Cr-Si	HR-160 [®]	Solidification cracking
	Precipitation-strengthened	Ni ₂ (Mo,Cr) g0 g00	242 [®] , 244 [®] Waspaloy, René 41, 282 [®] 718, 718 Plus [®]	Solidification cracking Strain-age cracking Solidification and liquation cracking
	Nickel aluminides	Ni ₃ Al	IC-25, IC-218	Solidification and liquation cracking
	Oxide-dispersion strengthened	Y ₂ O ₃	MA754, MA6000	Oxide agglomeration/flotation
	Single-crystal superalloys	N/A	CMSX-4, TMS 162	Stray grain formation, solidification cracking

طراحی صحیح اتصال جوشکاری، برای انجام صحیح جوشکاری آلیاژهای پایه نیکل بسیار مهم است. طراحی ضعیف اتصال، می تواند بهینه ترین انتخاب سایر پارامترهای جوشکاری را نفی کند. طرح های اتصال جوشکاری برای آلیاژهای پایه نیکل در شکل ۲ نشان داده شده است. یک شیار مربعی (نشان داده نشده است) نیازی به آماده سازی اتصال ندارد، اما به طور کلی به ضخامت مواد کمتر از ۳٫۲ میلی متر محدود می باشد. برای این شیار جوش که دسترسی تنها از یک طرف امکان پذیر است، GTAW روش پیشنهادی برای جوشکاری ریشه می باشد. طرح شیار J برای جوشکاری شیار بر روی صفحات مقاطع سنگین (ضخامت بیشتر از ۱۹ میلی متر) قابل قبول است.



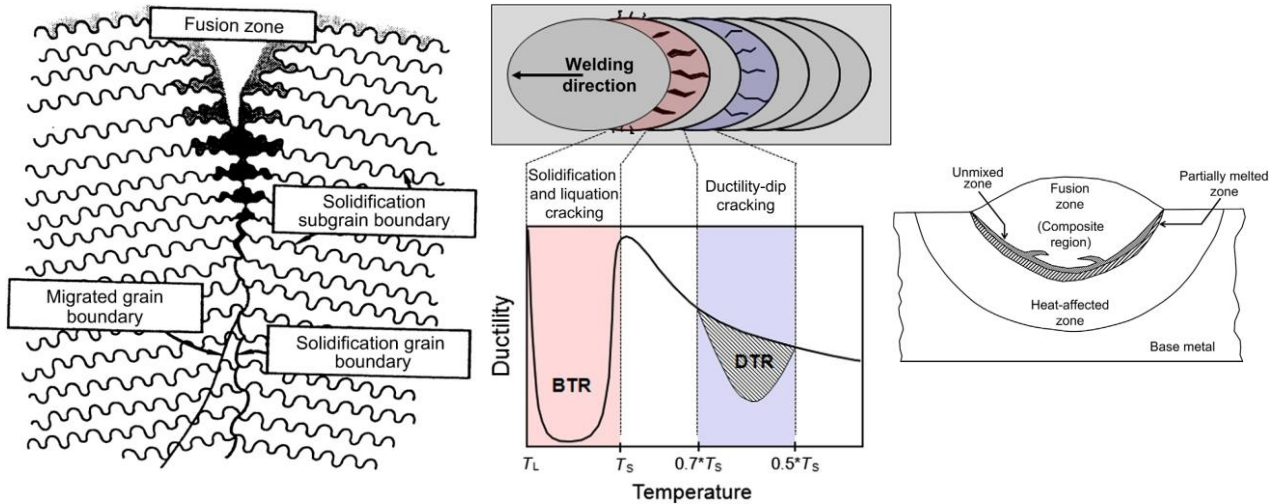
شکل ۲- طرح های اتصال جوشکاری شده برای آلیاژهای پایه Ni. از AWS G2.1M / G2.1: 2012 ، طراحی‌های مرسوم درز جوش [1]

۲-۲- عیوبی متالورژیکی ناشی از جوشکاری

پدیده های متالورژی که در هنگام جوشکاری آلیاژهای پایه نیکل رخ می دهد، می تواند منجر به تشکیل انواع نقص در منطقه جوشکاری و HAZ شود. کندی رسوبات جوش ممکن است منجر به تشکیل یک منطقه غیر مخلوط (UMZ) شود. شکل ۳ نمایشی شماتیک از مناطق مختلف در یک جوش جوشکاری را نشان می دهد. تنظیمات پارامترهای جوشکاری اغلب می تواند تمایل به شکل گیری این نقایص را کاهش یا تشدید کند. با این حال، نقایص مورد بحث در این بخش عمدتاً به عنوان در نتیجه یک پدیده متالورژی تشکیل می شود که اغلب با دامنه دمایی که در آن رخ می دهد، در نتیجه منطقه جوش ترک خوردگی جوشکاری در آلیاژهای پایه نیکل معمولاً به دو دسته تقسیم می شود، یعنی "ترک خوردگی گرم"، که در نتیجه تردی ترکیبات ناشی از ذوب بوده و "ترک گرم" همراه است، که در نتیجه خای ماندن فضای بین دانه ها در فرآیند انجماد می باشد.

پدیده های ترک خوردگی گرم با یک ساختار متالورژی متشکل از دو مرحله جامد و مایع همراه هستند. ترک خوردگی گرم به دو شکل متمایز ترک خوردگی در زیر اشاره دارد که شامل ترک خوردگی محلول جوشکاری و ترک خوردگی مایعات در HAZ و WM است. WM معمولاً به FZ اشاره دارد، مگر در مواردی که در جوش های چند مرحله دوباره گرم شود. از آنجا که برای تشکیل ترکهای گرم باید مایع وجود داشته باشد، این نقص ها با مناطق متاثر از جوشکاری مرتبط هستند، به عنوان مثال، مناطقی از جوشکاری که ریزساختار تحت تاثیر حرارت در دمای جامد یا بالاتر از آن قرار می گیرد. رسوبات در یک درجه حرارت گسسته در ریز ساختار فلزات خالص رخ می دهد. بسیاری از آلیاژهای پایه Ni حاوی ترکیبات eutectic هستند. ترکیب یوتکتیک کمترین دمای جامد را در سیستم دارد. این امر سبب انجماد سریع در یک دمای ذوب شده، که اغلب باعث ایجاد ترک گرم می شود، که این امر سبب کاهش رسوب گذاری می گردد. همانطور که قبلاً اشاره شد، حتی ۱ ppm افزودن ناخالصی ها مانند گوگرد و فسفر،

ترکیبات یوتکتیک را با نقاط ذوب بسیار کمتر از آلیاژ نیکل تشکیل می دهد. این ناخالصی ها معمولاً بیشترین نقش را در ایجاد ترک های گرم دارند.

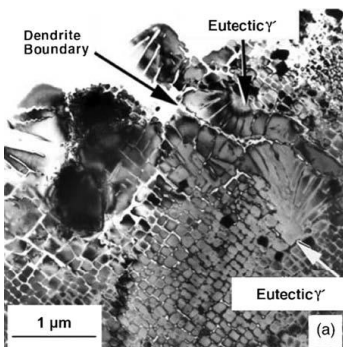


شکل الف نمایش شماتیک مناطق در یک جوش در فرآیند جوشکاری
 شکل ب بررسی شماتیک محدوده های مستعد به ترک در فرآیند جوشکاری
 شکل ج شکل یوتکتیک ناشی از انجماد در فرآیند جوشکاری

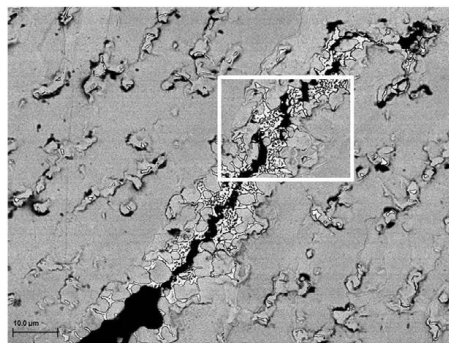
شکل ۳- نمایش شماتیک شکل پذیری جوش به عنوان تابعی از دما و دو منطقه دما که ترک خوردگی جوش در آلیاژهای پایه نیکل [4]

۴-۲- ملاحظات متالورژیکی

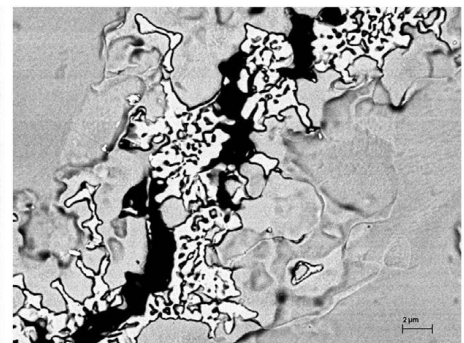
وجود مذاب در منطقه ذوبی در بین دانه های یوتکتیکی تا حد زیادی عامل ترک خوردگی ناشی از انجماد می باشد. کسر حجمی و توزیع مذاب را می توان با روش Scheil-Gulliver محاسبه کرد؛ در این مدل سازی به توزیع مجدد عناصر محلول در آلیاژ وابسته می باشد. شیب دمایی نیز در توزیع عناصر آلیاژی موثر است و می تواند سبب کاهش محدوده مذاب گردد. همچنین اندازه دانه و در نتیجه مرزدانه هم موثر در میزان خیس کنندگی و کشش سطحی موثر می باشد. عناصری مانند گوگرد، فسفر و بور می توانند با کاهش انطباق مرزدانه و مذاب شرایط را برای ایجاد ترک مساعد تر نماید. در شکل ۴ جدایش عناصر آلیاژی و ایجاد ترک در انتهای انجماد نشان داده شده است.



شکل ج- میکروسکوپ SEM



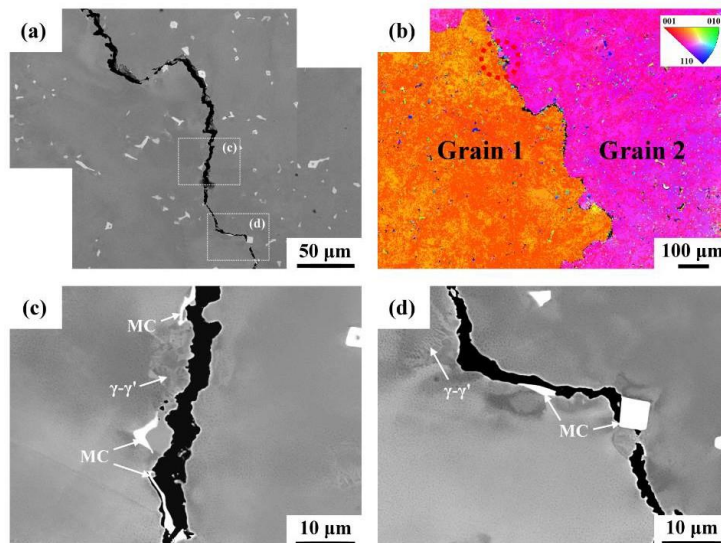
شکل ب- بزرگنمایی ۱۰۰ برابر



شکل الف- بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر

شکل ۴- ترک محلول جوشکاری در نمونه آلیاژ. ترک خوردگی با فاز یوتکتیک کاربید غنی از عناصر آلیاژی که در پایان انجماد تشکیل شده [5]

ترک ناشی از ذوب مواد در منقه HAZ به دلیل وجود فازهای بین فلزی γ ، مخلوطی از بوریدهای Cr-Mo، بین فلزی نیکل Zr، فازهای σ و η Ni3Ti که دمای ذوب پایین تری از فلز پایه دارد سبب ایجاد ترک در مرزدانه می‌گردد. این امر در شکل ۵ نشان داده شده است.



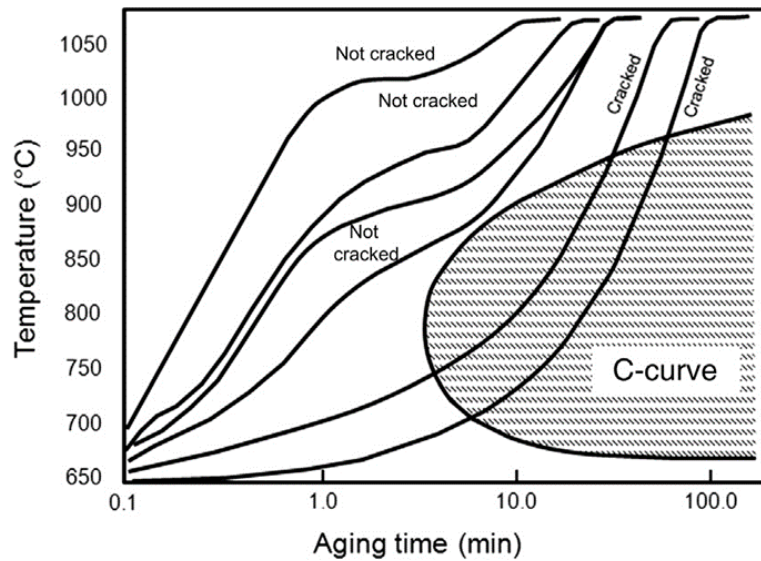
شکل a ریزساختار در زوم ۱۰۰ برابر شکل b بررسی دانه و مرزدانه شکل d و c بررسی فازها در مرزدانه در بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر شکل ۵- ترک ناشی از ذوب ترکیبات بین فلزی γ -MC و γ - γ' در شکاف دندریت بین دانه آبی در منطقه HAZ آلیاژ [5]IN738

۱-۴-۲- عملیات حرارتی پس گرمایی

منطقه متأثر از حرارت HAZ در آلیاژهای روسوب سخت شونده وابسته به شرایط ریز ساختار می‌باشد که می‌تواند در شرایط آنیل یا رسوب سخت شونده باشد. معمولاً جوشکاری در شرایط آبی زمانی انجام می‌شود که نگرانی‌های در مورد ایجاد ترک در منطقه جوش وجود دارد. هنگامی که فلز پایه در شرایط رسوب سخت شده باشد به صورت ذاتی مقاومت بیشتری نسبت به حالت نرم از خود نشان می‌دهند. در هر دو حالت برای بهبود خواص استحکامی می‌بایست پس از جوشکاری قطعات عملیات شده تا خواص مکانیکی خود را باز یابند/ همچنین در اثر حرارت ورودی در حین جوشکاری اندازه دانه رشد کرده که این امر سبب افت خواص در محدوده جوش می‌شود.

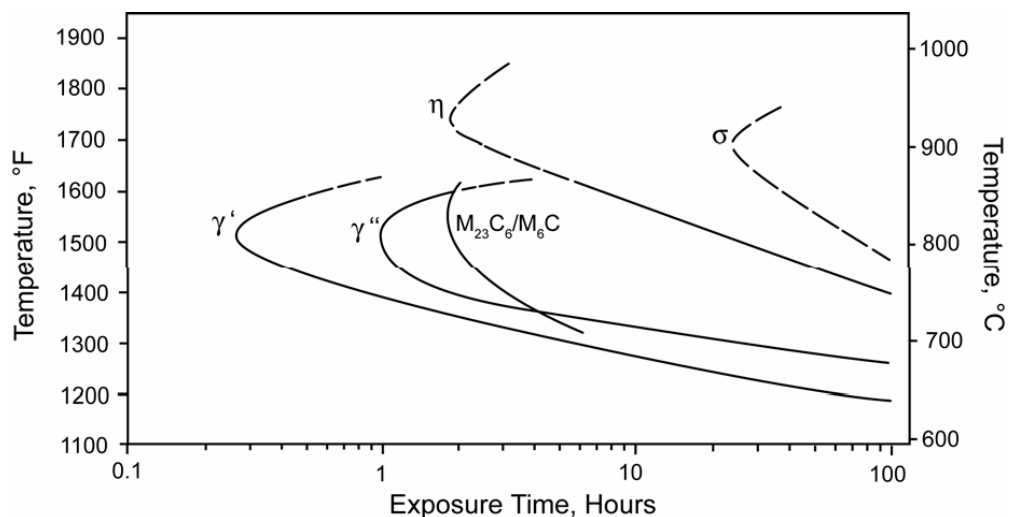
۲-۴-۲- ترک خوردگی ناشی از تنش پیرسازی

در اثر ایجاد تنش در نتیجه ایجاد فازهای رسوبی $Ni_3(Al,Ti)$ و تفاوت خواص آن سبب ایجاد تنش پسماند در ساختار می‌گردد. این شکل از ترک خوردگی به طور عام تری به عنوان "ترک خوردگی PWHT" نیز شناخته شده می‌شود. در اثر فرآیند جوشکاری در منطقه HAZ سبب ایجاد و یا رشد رسوبات در این منقه می‌گردد؛ این امر به دلیل تغییر توزیع و رشد رسوبات سبب ایجاد تنش پسماند و افت خواص می‌شود. از این رو می‌بایست به منظور توزیع یکنواخت رسوبات ابتدا برای آنیل و یکنواخت کردن ریزساختار در دمای بالای ۱۰۵۰ درجه آنیل و سپس با سرعت بالا بر اساس نمودار CCT گرم شود. در صورت کاهش سرعت گرم کردن در فرآیند آنیل این امر سبب ایجاد رسوبات در مرز دانه شده و این امر در فرآیند رسوب سختی رشد می‌نماید این امر سبب شکست و ایجاد ترک در مرز دانه می‌شود. با تغییر منحنی C به سمت چپ، حساسیت به ترک خوردگی افزایش می‌یابد. [7,8]



شکل ۶- نمودار CCT مربوط فرآیند آنیل و تاثیر زمان بر ترک دار شدن [6]

ترک خوردگی در فرایند پیرسازی توسط روشهای متالوگرافی و فراکتوگرافی مشخص می شود. ارزیابی متالوگرافی به طور معمول نشان می دهد که ترک در نزدیکی مرز همجوشی رخ می دهد و در محل مرز بین دانه است. ارزیابی سطح شکستگی، حالت شکستگی بین دانه ای را نشان می دهد؛ که می تواند ظاهری صاف یا برخی از ویژگی های شکل پذیر داشته باشد. ترک خوردگی ناشی از انعطاف پذیری، گاهی اوقات ترک خوردگی در سن فشار را همراه خواهد داشت، خصوصاً در آلیاژهایی که کسر حجمی قابل توجهی از کاربیدها دارند. در نتیجه، وجود مذاب اشیاء از ترکیبات آلیاژی نیز می تواند در امتداد مرزهای دانه شکسته مشاهده نمود.



شکل ۷- نمودار تغییر دما و زمان - آلیاژ ۷۲۵ [6]

۳. جمع بندی

در سوپرآلیاژ پایه نیکل در فرآیند جوشکاری و عملیات حرارتی پس از آن، مواد ذوب فوق اشیاء با تر شوندگی کم و تنش ناشی از رسوبات Ti-Al سبب ایجاد ترک در منطقه جوش و مناطق اطراف آن می گردد؛ که این امر سبب کاهش جوش پذیری آلیاژ می باشد. برای بهبود موارد فوق می بایست با طراحی بهینه و اتومات کردن فرآیند جوشکاری در جهت کاهش حرارت ورودی اقدام نمود. همچنین با افزایش

سرعت آنیل در فرآیند گرم سازی سبب جلوگیری ایجاد رسوبات در مرزدانه و در نتیجه کاهش تنش پسماند پس از فرآیند رسوب سختی گردید. به صورت کلی در این خانواده ایجاد رسوبات در مرزدانه و یا سطوح با چسبندگی کمتر سبب ایجاد ترک می شود که این امر با حضور عناصری مانند گوگرد و فسفر تشدید می شود.

CCT	به شکل مرسوم نمودار تغییرات فاز در اثر تغییرات دما، که در آن تاثیر سرعت تغییر دما در آن نهادینه شده
SEM	نوعی از میکروسکوپی که به کمک پراش الکترونی تصاویر از نمونه متالورژیکی تولید می نماید
HAZ	منطقه ای در فرآیند جوشکاری در فلز پایه که بر اثر حرارت ورودی ناشی از جوشکاری تاثیر می پذیرد
PWHT	عملیات حرارتی پس از جوشکاری

مراجع

- [1] AWS 2.1M, An American National Standard, Guide for the Joining of Wrought Nickel-Based Alloys, 2012
- [2] S. Sravan Sashank, S. Rajakumar, R. Karthikeyan and D. S. Nagaraju , "Weldability, Mechanical Properties and Microstructure of Nickel Based Super Alloys: a review," *E3S Web of Conferences 184, 01040 (2020)*, 2020.
- [3] Saleem Hashmi, "Weldability of Nickel-Base Alloys," *Materials Processing; Bayraktar, Comprehensive Materials Processing (pp.151-179)*
- [4] Cieslak, M. J., Perepezko, J. H., Kang, S., Glicksman, M, *The Metal Science of Joining, Proceedings of a Symposium Sponsored by the TMS Solidification Committee/MDMD and the Physical Metallurgy Committee/SMD.*
- [5] Kai-Cheng Chen ,Tai-Cheng Chen, "Liquation Cracking in the Heat-Affected Zone of IN738 Superalloy Weld," *Metals*, 2018.
- [6] Sanvan Mannan and Frank Veltry, "Time-Temperature-Transformation Diagram of Alloy 725," *The Mineral, Metals, and Material Society*, 2001.
- [7] Henderson, M.B.; Arrell, D.; Larsson, R.; Heobel, M.; Marchant, G. Nickel Based Superalloy Welding Practices for Industrial Gas Turbine Applications. *Sci. Technol. Weld. Join.* 2004, 9, 13–21
- [8] González, M.A.; Martínez, D.I.; Pérez, A.; Guajardo, H.; Garza, A. Microstructural Response to HAZ Cracking of Prewelding Heat-Treated Inconel 939 Superalloy. *Mater. Charact.* 2011, 62, 1116–1123. [CrossRef]
- [9] Lachowicz, M.; Dudzin´ski, W.; Hainmann, K.; Podrez-Radziszewska, M. Microstructure Transformations and Cracking in the Matrix of γ - γ ' Superalloy Inconel 713C Melted with Electron Beam. *Mater. Sci. Eng. A* 2008, 479, 269–276.

- [10] Oliveira, J.P.; Miranda, R.M.; Braz Fernandes, F.M. Welding and Joining of NiTi Shape Memory Alloys: A Review. *Prog. Mater. Sci.* 2017, 88, 412–466.
- [11] Cheng, Y.H.; Chen, J.T.; Shiue, R.K.; Tsay, L.W. The Evolution of Cast Microstructures on the HAZ Liquation Cracking of Mar-M004 Weld. *Metals* 2018, 8, 35
- [12] Long, F.; Yoo, Y.S.; Jo, C.Y.; Seo, S.M.; Jeong, H.W.; Song, Y.S.; Jin, T.; Hu, Z.Q. Phase Transformation of η and σ Phases in an Experimental Ni-based Superalloy. *J. Alloys Compd.* 2009, 478, 181–187.