

## جوشکاری تعمیری پره‌های توربین‌های گازی

آرش خاکزاد شاهاندشتی<sup>۱</sup> و \* محسن پیرمحمدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس مطالعات فناوری، معاونت پژوهش و فناوری، گروه مپنا

<sup>۲</sup> مدیر تحقیقات، معاونت پژوهش و فناوری، گروه مپنا

\* مسئول مکاتبات: khakzad\_a@mapnagroup.com

### چکیده

### واژگان کلیدی

جوشکاری تعمیری  
سوپرآلیاژ پایه نیکل  
ترک ذوب‌شدگی  
جوش‌پذیری

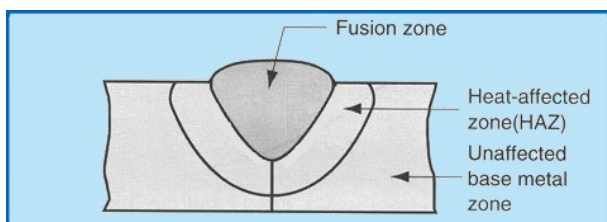
### تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۹/۰۳  
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۳/۰۹

با توجه به لزوم تاب‌آوری در شرایط چالش برانگیز اقتصادی، دستیابی به روش تعمیری توسط کاربران صنایع توربین‌های گازی به منظور نیل به اهدافی از قبیل افزایش عمر قطعات و کاهش هزینه‌ها از اولویت‌های کاربران این صنایع است. به علت پرهزینه بودن فرآیند تولید پره‌های توربین از سوپرآلیاژهای پایه نیکل به روش ریخته‌گری، هر ساله کشورها به منظور خرید و یا تولید قطعات گران‌قیمت مبالغ زیادی را صرف می‌کنند تا فرآیند تعمیر و نگهداری انجام شود. یکی از روش‌های تعمیری که هم عملی و مناسب باشد و هم بتواند مشخصات ریزساختاری مناسب و پایداری فازی مناسب را تأمین کند، جوشکاری می‌باشد. جوشکاری پره‌های ساخته شده از سوپرآلیاژ با انجماد جهت‌دار مشکلات زیادی را به نسبت سایر آلیاژها و قطعات مطرح می‌کند. زیرا آلیاژهای فوق‌الذکر دارای ماهیت پراآلیاژ و حضور بیشتر فازهای رسوب سخت‌شونده پیچیده می‌باشند. اغلب حرارت و نیروهای مکانیکی اعمال شده توسط منبع حرارتی، وزن اجزا و قیود در طی فرآیند جوشکاری با ماهیت ذاتی این آلیاژها (وجود مکانیزم‌های سختی) به طور مخربی اثرگذار است که در این مقاله به بحث و بررسی این موانع و همچنین روش‌های متداول و پرکاربرد در جوشکاری تعمیری سوپرآلیاژهای پایه نیکل خواهیم پرداخت.

### ۱ مقدمه

می‌شوند. این قبیل جوش‌ها از نظر متالورژیکی به سه قسمت حوضچه جوش، منطقه متأثر از حرارت<sup>۱</sup> در اطراف حوضچه جوش و فلز پایه تقسیم می‌شوند (شکل ۱) [۳].



شکل ۱: شماتیک سه منطقه حوضچه جوش، فلز پایه و بخش متأثر از حرارت [۳]

## ۲ عیوب ایجاد شده در جوشکاری تعمیری سوپرآلیاژهای پایه نیکل

در طی فرآیند جوشکاری تعمیری سوپرآلیاژهای پایه نیکل رسوب سخت‌شونده نیاز فزاینده‌ای به انجام یک فرآیند با یکپارچگی بالا، عاری از عیوب (میزان عیوب کنترل شده) و خواص دمایی بالاتر وجود دارد. جوشکاری این آلیاژها مشکلات زیادی را به نسبت سایر سوپرآلیاژها مطرح می‌کند زیرا آلیاژهای فوق‌الذکر دارای ماهیت پراآلیاژ و حضور بیشتر فازهای رسوب سخت‌شونده پیچیده می‌باشند که برای دستیابی به استحکام دمای بالا در طول شرایط کاری مورد نیاز است. اغلب حرارت و نیروهای مکانیکی اعمال شده توسط منبع حرارتی، وزن اجزا و قیود در طی فرآیند جوشکاری با ماهیت ذاتی این

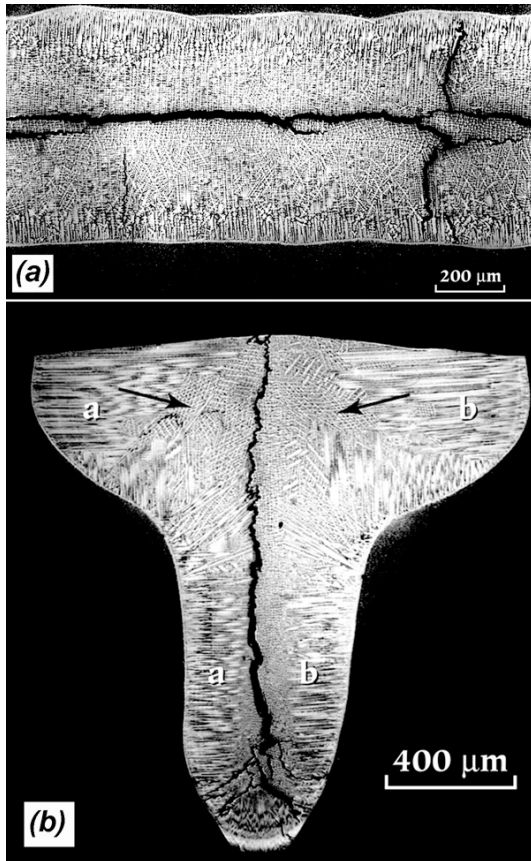
به علت پرهزینه بودن فرآیند تولید پره‌های توربین از سوپرآلیاژهای پایه نیکل به روش ریخته‌گری، هر ساله کشورها به منظور خرید و یا تولید این قطعات گران‌قیمت مبالغ زیادی را صرف می‌کنند تا فرآیند تعمیر و نگهداری انجام شود [۱]. شرایط چالش برانگیز فعلی سبب شده است که دستیابی به روش تعمیری به منظور نیل به اهدافی از قبیل افزایش عمر قطعات و کاهش هزینه‌ها از اولویت‌های کاربران صنایع توربین‌های گازی می‌باشد. بنابراین پژوهش‌های زیادی سالانه به منظور تعمیر قطعات سوپرآلیاژی در روش‌های متفاوت تعمیری از پوشش‌دهی تا لحیم‌کاری و جوشکاری انجام می‌شود. یکی از این روش‌ها که هم عملی و مناسب باشد و هم بتواند مشخصات ریزساختاری مناسب و پایداری فازی مناسب را تأمین کند، جوشکاری تعمیری می‌باشد [۲]. اما ابتدا باید جوش‌پذیری سوپرآلیاژهای پایه نیکل مورد بررسی قرار گیرد.

جوش‌پذیری به توانایی یک ماده به اتصال تحت شرایط خاص جوشکاری به منظور دست‌یابی به ساختار متناسب با طراحی و تأمین خواص مورد نیاز در شرایط کاری قطعه اطلاق می‌شود. لذا باید قابلیت سازگاری با شرایط کاری به همراه کمترین اعوجاج و میزان محدود (کنترل شده) عیوب را فراهم کند. فرآیند جوشکاری به طور معمول به دو روش جوشکاری ذوبی و جوشکاری در حالت جامد تقسیم می‌شود.

در روش جوشکاری ذوبی قطعات متصل شده توسط اعمال حرارت در نقطه اتصال، ذوب می‌شوند و سپس به صورت یک ماده به هم متصل

<sup>1</sup>HAZ

مقاطع نازک یافت می‌شود که اغلب با ترک‌های انجمادی همراه است تشکیل مرز دانه پیوسته در طول مرکز گرده جوش در انرژی حرارتی ورودی و سرعت جوشکاری بالا می‌باشد (شکل ۳). تشکیل این عیب توسط افزایش افزودنی‌های آلیاژی و میزان ناخالصی افزایش می‌یابد. در این حالت یک ساختار دانه ستونی درشت در عرض گرده جوش و مقادیر زیادی از فازهای یوتکتیک و ترد در طول خط مرکزی تشکیل می‌شود. این جدایش<sup>۲</sup> منجر به ذوب این مناطق از گرده جوش در عملیات حرارتی بعدی و یا شرایط کاری دما بالا می‌شود که موجبات تشکیل ترک را فراهم می‌آورد [۶].



شکل ۳: تشکیل ترک میانی در جوش پرتو الکترونی ایجاد شده بر سوپرآلیاژ تک کریستال PWA-1480 [۷]

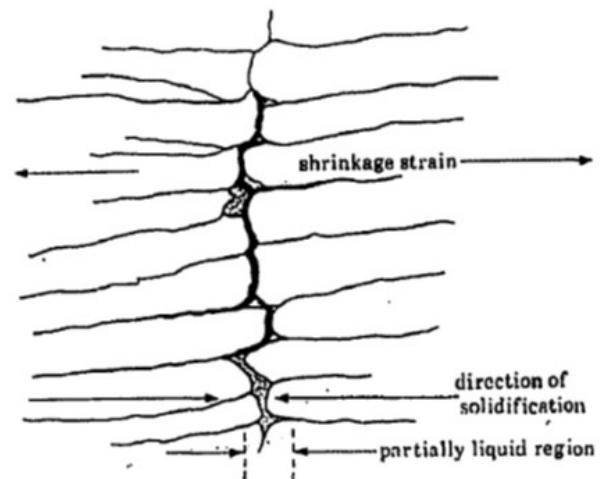
## ۲.۲ کاهش ماهیت انجماد جهت‌دار

یکی دیگر از نگرانی‌های جوشکاری تعمیراتی کاهش ماهیت انجماد جهت‌دار در فلز جوش می‌باشد. در حین پروسه انجماد در جوشکاری تعمیراتی دندریت‌ها شکسته شده و در منطقه خمیری دو فاز شروع به رشد می‌کنند. این دندریت‌های شکسته به عنوان جوانه برای رشد دانه‌ها و تشکیل ساختار دانه‌بندی هم‌محور عمل می‌کند. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، این دانه‌ها دارای مرزدانه با زوایای زیاد می‌باشد که سبب ایجاد ترک‌های انجمادی و کاهش مقاومت به خزش می‌شود و به ساختار Stray grain شناخته شده است. حوضچه جوش در سرعت‌های پایین جوشکاری تمایل بیشتری به حفظ ماهیت انجماد جهت‌دار خود دارد، در حالی که در سرعت‌های بالای جوشکاری مناطق وسیعی از ساختار با این نوع دانه بندی تشکیل می‌شود [۸].

آلیاژها (وجود مکانیزم‌های سختی) به طور مخربی اثرگذار است. تغییرات موضعی در ریزساختار نزدیک به گرده جوش، مانند درشت شدن دانه‌ها، انحلال و رشد دانه در منطقه HAZ می‌تواند به میزان شایان توجهی خواص را در طی این سیکل‌های حرارتی مورد تغییر قرار دهد. علیرغم تلاش‌هایی که به منظور کاستن این شرایط مخرب بر خواص آلیاژهای رسوب سخت شونده انجام می‌شود، این آلیاژها در معرض چهار نوع اصلی عیوب و ترک در طی فرآیند جوشکاری تعمیراتی می‌باشند.

## ۱.۲ ترک‌های انجمادی

ترک‌های انجمادی<sup>۱</sup> که معمول‌ترین نوع عیوب جوشکاری تعمیراتی می‌باشد، زمانی در گرده جوش تشکیل می‌شود که منطقه دوفازی مایع - جامد با تنش‌های کششی و میزان زیاد کسر جامد ( $f_s > 0.9$ ) مواجه می‌شود. این امر سبب می‌شود که جریان مذاب برای پرکردن فضاهای بین دندریتی محدود شود. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، این بخش‌ها توسط تنش‌های کششی حرارتی که در پشت گرده جوش به همراه پیشروی جبهه انجماد ایجاد می‌شوند، از هم جدا شده (اگر تنش کششی از تنش تسلیم ماده در آن نقاط بیشتر باشد) و ترک‌های انجمادی را تشکیل می‌دهند.



شکل ۲: مکانیزم تشکیل ترک‌های انجمادی [۴]

تشکیل ترک انجمادی به عواملی از قبیل تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی القایی در انتهای گرده جوش و برد انجمادی آلیاژ وابسته است. تشکیل ترک‌های انجمادی توسط افزایش دامنه انجماد آلیاژ (آلیاژهای رقیق و یوتکتیک کمتر در معرض خطر قرار دارند) و افزایش سرعت جوشکاری، افزایش می‌یابد.

بنابر مبانی تئوری انتقال حرارت در حوضچه جوش، افزایش سرعت جوشکاری سبب افزایش سرعت انجماد حوضچه جوش می‌شود. همچنین سرعت انجماد برای حوضچه‌های کوچک‌تر جوش بیشتر از حوضچه‌های بزرگتر جوش در سرعت‌های مشابه می‌باشد. سرعت انجماد بالاتر منجر به تنش‌های حرارتی بیشتر می‌شود که احتمال تشکیل ترک‌های انجمادی را افزایش می‌دهد [۵].

عیب دیگری که در حین فرآیند جوشکاری قطعات سوپر آلیاژی در

<sup>1</sup>Solidification Cracking    <sup>2</sup>Segregation

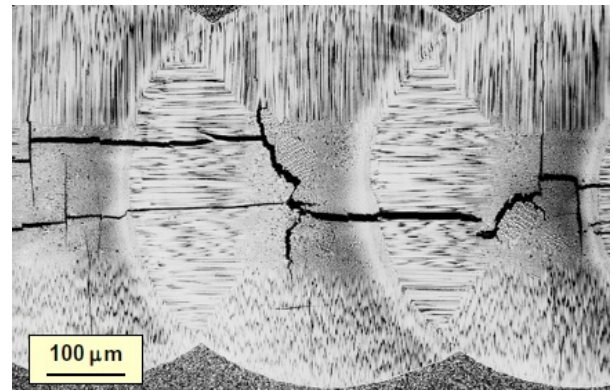
دمای بالای سرویس‌دهی به علت حضور تنش‌های پسماند ناشی از شرایط کاری ایجاد می‌شود. علت تشکیل این ترک‌ها انتقال کرنش‌ها و تنش‌های انجمادی به مرز دانه‌ها در نتیجه رسوب گذاری و سخت‌شوندگی آلیاژ در حین اعمال حرارت می‌باشد. معمولاً پس از انجام عمل جوشکاری به منظور آزاد سازی تنش‌های پسماند در قطعه از عملیات حرارتی پس‌گرمی استفاده می‌شود. اغلب از آنجایی که دمای تنش‌زدایی بیشتر از دمای پیر کرنشی آلیاژ می‌باشد، این عملیات حرارتی منجر به رسوب گذاری در حین حرارت دهی می‌شود. لذا تنش پسماند اضافه در اثر این رسوب گذاری مجدد به مرزدانه‌ها در منطقه HAZ و گرده جوش اعمال می‌شود. اغلب به منظور کاهش ترک‌های پیر کرنشی از فلز پرکننده چقرمه‌تر و آلیاژ رقیق‌تر مانند IN625 و یا C263 استفاده می‌شود و همچنین سیکل گرمایش و سردایش در طول عملیات حرارتی پس‌گرمی به دقت کنترل می‌شود. ایجاد عیوب در گرده جوش و یا محیط HAZ اطراف آن از فلز پایه به عواملی از قبیل طراحی جوش، ریزساختار، شکل و ترکیب شیمیایی فلز پایه و همچنین نوع فلز پرکننده به کار رفته در فرآیند جوشکاری وابسته می‌باشد. همچنین ایجاد اعوجاج و تنش پسماند باید توسط به کارگیری انرژی حرارتی ورودی و سرعت جوشکاری مناسب و همچنین عملیات حرارتی پس‌گرمی و پیش‌گرمی کنترل شود [۱۲].

### ۳ نمودار تشخیص جوش پذیری

حساسیت به تشکیل ترک با افزودن عناصر تیتانیوم و آلومینیوم (به علت افزایش رسوب گذاری فاز  $\gamma'$ ) و همچنین افزایش عناصری مانند بور، کربن و گوگرد افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۶ نمایش داده شده است، جوش‌پذیری سوپرآلیاژهای پایه نیکل و حساسیت به تشکیل ترک‌های ناشی از پیر کرنشی با رسم نمودن میزان آلومینیوم بر حسب تیتانیوم تشخیص داده می‌شود. زمانی که میزان کل  $Al + Ti$  برای یک آلیاژ خاص از مقدار بحرانی (اغلب ۰.۴٪) فراتر رود، جوش‌پذیری آن کاهش می‌یابد. آلیاژهایی که در سمت جوش‌پذیری پایین نمودار قرار دارند می‌بایست تحت عملیات حرارتی (کنترل اندازه دانه و ریزساختار) با نرخ سردایش و گرمایش کنترل شده قرار گیرند [۱۳].

### ۴ روش‌های جوشکاری تعمیری سوپرآلیاژهای پایه نیکل

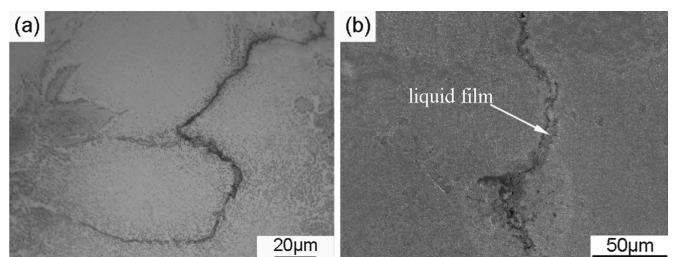
در میان روش‌های جوشکاری تعمیری، جوشکاری با قوس الکتروود تنگ‌گسنتی به علت هزینه پایین استفاده از این روش به طور گسترده به منظور تعمیر ترک‌های سطحی در سوپرآلیاژ پایه نیکل رسوب سخت شونده استفاده شده است. با توجه به میزان عناصر تیتانیوم و آلومینیوم برای سوپرآلیاژهای پایه نیکل رسوب سخت شونده، این سوپرآلیاژها در بین آلیاژهای یا خاصیت جوش-پذیری پایین قرار می‌گیرد و به علت جدایش شدید عناصر آلیاژی و میزان زیاد فازهای رسوب سخت شونده به انواع ترک‌ها و عیوب اشاره شده در فرآیند جوشکاری تعمیری حساس می‌باشد. اما ماهیت استحکام بالای این آلیاژها به علت حضور فازهای رسوب سخت شونده موجب می‌شود که



شکل ۴: رشد هم‌جهت و تشکیل ساختار با دانه‌بندی هم‌محور با دانه‌هایی با زاویه مرزدانه زیاد در حوضچه جوش در جوشکاری سوپرآلیاژ پایه نیکل تک کریستال WA 1480 با استفاده از روش لیزر پالسی [۹]

### ۳.۲ ترک‌های ناشی از ذوب شدگی

ترک‌های ناشی از ذوب‌شدگی یا پارگی<sup>۱</sup> منطقه HAZ همانطور که در شکل ۵ نمایش داده شده است در منطقه HAZ در نزدیکی گرده جوش در نتیجه انحلال موضعی فازهای موجود در مرزدانه مانند کاربیدهای اولیه MC (مانند NbC و TiC) و  $M_2C$  فازهای Laves و  $\gamma'$  و ترکیبات بین فلزی رخ می‌دهد. در طی حرارت دهی سریع فازهای موجود در مرزدانه اغلب قادر به انحلال کامل در فاز زمینه نمی‌باشند و لذا فاز یونکتیک با دمای ذوب پایین تشکیل می‌شود و بخشی از اطراف مرز دانه ذوب می‌شود. فیلم مایع تشکیل شده در مرزدانه در منطقه HAZ اغلب دور از منطقه ذوب در مکان‌هایی که درشت شدن دانه‌ها رخ داده است به وقوع می‌پیوندد، که این منطقه دوباره منجمد شده و جدا شده از زمینه، توانایی مقاومت در مقابل تنش‌های کششی ایجاد شده در انتهای گرده جوش را دارا نیست. تمایل به تشکیل این نوع ترک وابسته به ترکیب شیمیایی آلیاژ (درصد عناصر کربن، بور و ...)، اندازه دانه، میزان انرژی حرارتی ورودی و سرعت جوشکاری می‌باشد. هر چه اندازه دانه بزرگتر باشد و گرادیان دمایی بیشتر باشد حساسیت به تشکیل این نوع ترک افزایش می‌یابد [۱۰، ۱۱] واضح است که جدایش عناصری مانند بور، گوگرد و فسفر که موجب افزایش اندازه دانه می‌شوند، حساسیت به تشکیل این نوع ترک در منطقه HAZ را افزایش می‌دهند [۱۲].

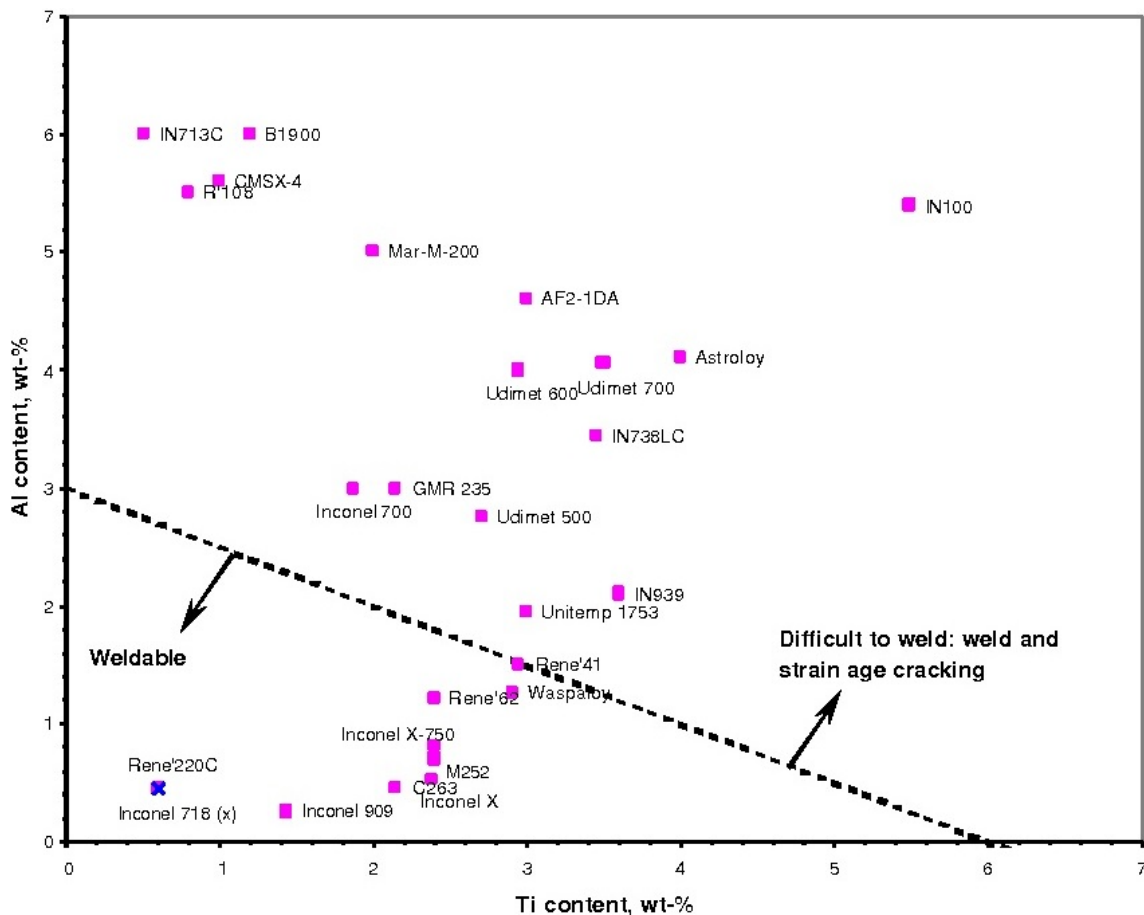


شکل ۵: ترک‌های ناشی از Liquation در نمونه جوشکاری شده با پرتو لیزر در سوپرآلیاژ DZ4125 [۷]

### ۴.۲ ترک‌های عملیات حرارتی پس از جوشکاری

ترک‌های ناشی از عملیات حرارتی پس از جوشکاری<sup>۲</sup> اغلب در آلیاژهای رسوب سخت شونده  $\gamma' - Ni_3(Al, Ti)$  در طول عملیات حرارتی و یا

<sup>1</sup>liquation Cracking <sup>2</sup>Post weld heat treatment cracking Or Strain age cracking



شکل ۶: نمودار تشخیص جوش پذیری برای گروهی از سوپراآلیاژهای پایه نیکل [۱۳]

به همراه میزان نفوذ و اندازه و شکل حوضچه جوش را داراست [۸]. این روش‌های جوشکاری به دلیل ایجاد جوش‌هایی با استحکام بالا، اعوجاج کم، تنش پسماند پایین و خواص خستگی مناسب دارای کاربرد گسترده در اتصال و تعمیر آلیاژهای پیشرفته دما بالا می‌باشد. در روش جوشکاری لیزر و پرتو الکترونی از یک پرتو متمرکز و با شدت بالا به منظور تولید گرما در حوضچه جوش استفاده می‌شود. این پرتو متمرکز سبب سرعت جوشکاری بالا و ایجاد حوضچه جوش عمیق و باریک خواهد شد. از مشخصه‌های این روش جوشکاری چگالی انرژی پرتو بالا، HAZ کوچک و نرخ حرارت دهی و انجماد بالا می‌باشد. سرعت انجماد بالا سبب کاهش جدایش عناصر آلیاژی، توزیع ترکیب هموزن‌تر و لذا کاهش میزان ترک‌های ناشی از ذوب شدگی خواهد شد. عمق نفوذ حوضچه جوش با توان ایجاد شده در حین فرآیند جوشکاری رابطه مستقیم دارد [۱۴].

## ۵ نتیجه‌گیری

آلیاژهای پایه نیکل اغلب در دماهای بالا و در محیط‌های خورنده استفاده می‌شوند که منجر به تخریب تدریجی به شکل فرسایش و ترک خوردن می‌گردند. هزینه بالای جایگزینی پرها سبب می‌شود که استفاده از یک عملیات تعمیری از لحاظ اقتصادی معقول و منطقی به نظر بیاید. فرآیند جوشکاری تعمیری سوپراآلیاژ پایه نیکل رسوب سخت شونده با چالش‌های

مستعد تشکیل ترک در فلز جوش و منطقه HAZ در فرآیند جوشکاری تعمیری و عملیات حرارتی پس‌گرمی باشد. در روش جوشکاری تعمیری TIG، انرژی حرارتی ورودی<sup>۱</sup> بیشتری به آلیاژ اعمال شود و در نتیجه شاهد افزایش تنش‌های حرارتی عملی به فلز زمینه خواهیم بود. [۱۳].

در میان پارامترهای جوشکاری انرژی حرارتی ورودی و سرعت فرآیند جوشکاری از طریق تغییر گرادینان حرارتی عملی، بر تشکیل ترک‌ها در فلز جوش و منطقه HAZ تأثیر مستقیم دارد. در نتیجه بهره‌گیری از یک عملیات جوشکاری با پارامترهای (توان پرتو لیزر، سرعت جوشکاری و نوع فلز پرکننده) مناسب و همچنین سیکل گرمایش و سرمایش کنترل شده در عملیات حرارتی پیش‌گرمی و پس‌گرمی به منظور کنترل میزان عیوب و ترک‌ها امری ضروری می‌باشد. امروزه تحقیقات روش جوشکاری مبتنی بر پرتو لیزر و الکترون را به عنوان یک فرآیند جوشکاری با انرژی حرارتی ورودی پایین و چگالی انرژی بالا معرفی می‌کنند که بسیاری از مشکلات اشاره شده در حین جوشکاری تعمیری را محدود می‌کند که توانایی ایجاد جوش‌هایی با اتصال قوی به زمینه و عاری از ترک و حفرات را داراست.

بهره‌گیری از یک عملیات جوشکاری با پارامترهای (انرژی ورودی، سرعت جوشکاری و نوع فلز پرکننده) مناسب و همچنین سیکل گرمایش و سرمایش کنترل شده در عملیات حرارتی پیش‌گرمی و پس‌گرمی به منظور کنترل میزان عیوب و ترک‌ها امری ضروری می‌باشد. روش جوشکاری با پرتو لیزر (LBW) و باریکه الکترونی (EBW) توانایی کنترل این پارامترها

<sup>1</sup>Heat input

- [12] Çam, Gürel and Koçak, Mustafa. Progress in joining of advanced materials. *International Materials Reviews*, 43(1):1-44, 1998.
- [13] Hu, YL, Lin, X, Song, K, Jiang, XY, Yang, HO, and Huang, WD. Effect of heat input on cracking in laser solid formed dz4125 superalloy. *Optics & Laser Technology*, 86:1-7, 2016.
- [14] Henderson, MB, Arrell, D, Larsson, R, Heobel, M, and Marchant, G. Nickel based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications. *Science and technology of welding and joining*, 9(1):13-21, 2004.

بسیاری از قبیل ترک در حین جوشکاری و عملیات حرارتی پس گرمی، تغییرات ریزساختاری و استحکام در فلز جوش و منطقه HAZ مواجه می‌باشد. لذا به کارگیری یک فرآیند جوشکاری بهینه که متناسب با شرایط ماده باشد و انتخاب پارامترهای مناسب جوشکاری و فلز پرکننده و همچنین سیکل گرمایش و سرمایش کنترل شده در عملیات حرارتی پیش گرمی و پس گرمی به منظور کنترل میزان عیوب و ترک‌ها به منظور اجرای فرآیند جوشکاری تعمیراتی و دستیابی به ریز ساختار مناسب و خواص مکانیکی نزدیک به فلز زمینه ضروری است. امروزه تحقیقات روش جوشکاری مبتنی بر پرتو لیزر و الکترون را به عنوان یک فرآیند جوشکاری با انرژی حرارتی ورودی پایین و چگالی انرژی بالا معرفی می‌کنند که بسیاری از مشکلات اشاره شده در حین جوشکاری تعمیراتی را محدود می‌کند که توانایی ایجاد جوش‌هایی با اتصال قوی به زمینه و عاری از ترک و حفرات را داراست.

## مراجع

- [1] Maziasz, P.J. Asm gas turbine materials technology conference. *Advanced Materials & Processes*, 153(6):6-6, 1998.
- [2] Persson, C and Persson, P-O. Evaluation of service-induced damage and restoration of cast turbine blades. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2(4):565-569, 1993.
- [3] Lancaster, John Frederick. *Metallurgy of welding*. Elsevier, 1999.
- [4] Easterling, Kenneth. *Introduction to the physical metallurgy of welding*. Elsevier, 2013.
- [5] Hunziker, O, Dye, D, Roberts, SM, and Reed, RC. A coupled approach for the prediction of solidification cracking during the welding of superalloys. in *Fifth International Seminar on the Numerical Analysis of Weldability*, pp. 299-319, 1999.
- [6] Hunziker, O, Dye, D, and Reed, RC. On the formation of a centreline grain boundary during fusion welding. *Acta Materialia*, 48(17):4191-4201, 2000.
- [7] Babu, SS, David, SA, Park, JW, and Vitek, JM. Joining of nickel base superalloy single crystals. *Science and technology of welding and joining*, 9(1):1-12, 2004.
- [8] Bouse, GK and Mihalisin, JR. Metallurgy of investment cast superalloy components. *Superalloys, supercomposites and superceramics*, pp. 99-148, 1989.
- [9] Vitek, JM, Babu, SS, Park, JW, and David, SA. Analysis of stray grain formation in single-crystal nickel-based superalloy welds. *Proc. Superalloys*, pp. 459-465, 2004.
- [10] Huang, Xiao, Chaturvedi, MC, and Richards, NL. Effect of homogenization heat treatment on the microstructure and heat-affected zone microfissuring in welded cast alloy 718. *Metallurgical and materials Transactions A*, 27(3):785-790, 1996.
- [11] Guo, H, Chaturvedi, MC, Richards, NL, and McMahon, GS. Interdependence of character of grain boundaries, intergranular segregation of boron and grain boundary liquation in simulated weld heat-affected zone in inconel 718. *Scripta materialia*, 40(3), 1999.