

# ارتباط بین ساختار و خواص مکانیکی اتصال ایجاد شده در

## سوپر آلیاژ MA ۷۵۸ به روش TLP<sup>۱</sup>

علی اکبر اکرامی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

در انجام این تحقیق، اتصال سوپر آلیاژ MA۷۵۸ در دو حالت ریزدانه و تبلور مجدد به روش TLP انجام شد. از آلیاژی با ترکیب Ni-Cr-B-Si به عنوان عامل اتصال استفاده شد. عملیات اتصال در  $1100^{\circ}\text{C}$  و در مدت زمان‌های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه انجام شد، و برای همگن کردن ساختار محل اتصال آلیاژ متصل شده به مدت یک ساعت در  $1360^{\circ}\text{C}$  گرم و سپس با سرعت  $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$  سرد شد. با اندازه‌گیری استحکام برشی<sup>۲</sup> و استحکام خستگی<sup>۳</sup> نمونه‌های به هم متصل شده مشخص شد که زمان اتصال بالاتر از ۳۰ دقیقه تأثیری بر این خواص ندارد. از سوی دیگر، در یک زمان معین اتصال، استحکام برشی نمونه‌های متصل شده در حالت تبلور مجدد بیشتر از نمونه‌های متصل شده در حالت ریزدانه است. نتایج آزمون خستگی نیز نشان داد که در یک چرخه‌ی معین خستگی نمونه‌های متصل شده در حالت تبلور مجدد استحکام خستگی بالاتری دارند. برای بررسی تأثیر اعمال فشار به هنگام اتصال، نمونه‌هایی در حالت ریزدانه با فشار ۰/۱ MPa، و با همان شرایط نمونه‌های ریزدانه به هم متصل شدند. آزمایشات نشان داد که اعمال فشار تأثیری بر اندازه‌ی دانه در محل اتصال ندارد. آزمایشات مکانیکی نیز نشان داد که اعمال فشار تأثیر چندانی بر استحکام برشی ندارد.

### مقدمه

می‌شود. با نگره‌داری مجموعه در این دما، نفوذ سریع عناصر آلیاژی بین فلز پایه و عامل اتصال باعث تغییر در ترکیب شیمیایی فصل مشترک و در نتیجه انجام تک‌دمای منطقه‌ی اتصال می‌شود. اتصال ایجاد شده در این مرحله از نظر ترکیب شیمیایی و ریزساختار با فلز پایه متفاوت است. از این رو پس از پایان انجام تک‌دما عملیات همگن‌سازی در دمای اتصال و یا کمی بالاتر انجام می‌شود تا محل اتصال از نظر ترکیب شیمیایی و ریزساختار مشابه فلز پایه شود. در این تحقیق برای اتصال سوپر آلیاژ ODSMA۷۵۸ از روش TLP استفاده شد و اثر اندازه‌ی دانه‌ی آلیاژ اولیه و فشار اعمالی بر استحکام برشی و استحکام خستگی اتصال ایجاد شده بررسی شد.

### روش تحقیق

در این تحقیق از سوپر آلیاژ MA۷۵۸ در دو حالت ریزدانه (دریافت شده به صورت کار شده<sup>۴</sup> و ریزدانه) و تبلور مجدد استفاده شد. برای ایجاد دانه‌های تبلور مجدد، آلیاژ ریزدانه به مدت یک ساعت در  $1360^{\circ}\text{C}$  گرم و سپس در کوره سرد شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ در جدول ۱ آمده است.

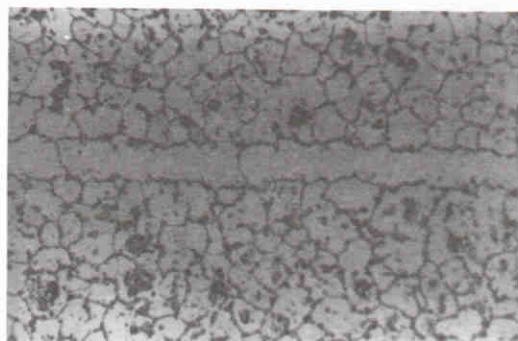
برای اتصال نمونه‌هایی با ابعاد  $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$  تهیه و سطوح آنها صیقل کاری شد. ابعاد نمونه‌ها برای انجام آزمون خستگی  $10 \times 10 \times 50 \text{ mm}$  انتخاب شد. نمونه‌ها پس از تمیزکاری به روش

سوپر آلیاژهای مقاوم شده با توزیع ذرات ریز اکسیدی، استحکام و مقاومت به خزش بالایی در دماهای بالا دارند. اتصال این آلیاژها با جوشکاری ذوبی باعث تغییر ریزساختار آلیاژ اولیه و نیز حساسیت آنها به ترک‌سرخ می‌شود و در نتیجه باعث کاهش خواص در دمای بالا می‌شود.<sup>[۱، ۲، ۳]</sup> جوشکاری نفوذی در حالت جامد نیز به علت نیاز به اعمال تنش بالا ممکن است باعث تغییر شکل ماکروسکوپی شود.<sup>[۴]</sup> سایر روش‌های اتصال در حالت جامد نظیر جوشکاری اصطکاکی نیز برای اتصال سوپر آلیاژها به کار رفته است. اما تغییر شکل سطوح در تماس، باعث ایجاد یک منطقه‌ی تبلور مجدد در محل اتصال می‌شود که از نظر ریزساختار و خواص، متفاوت با آلیاژ اولیه است.<sup>[۵]</sup> بعضی از محققین برای اتصال این آلیاژها از روش TLP استفاده کرده‌اند.<sup>[۶-۱۰]</sup> در این روش ساختار اولیه‌ی آلیاژ در محل اتصال محفوظ می‌ماند و استحکام محل اتصال مشابه استحکام آلیاژ اولیه است.

در اتصال به روش TLP از لایه‌ی نازک به عنوان عامل اتصال استفاده می‌شود. نقطه‌ی ذوب عامل اتصال پایین‌تر از نقطه‌ی ذوب فلز پایه است. پس از قرار دادن عامل اتصال بین دو سطحی که باید به هم متصل شوند، مجموعه تا دمای اتصال گرم و در این دما عامل اتصال ذوب و فاصله‌ی بین دو سطح با لایه‌ی نازک از مذاب پر

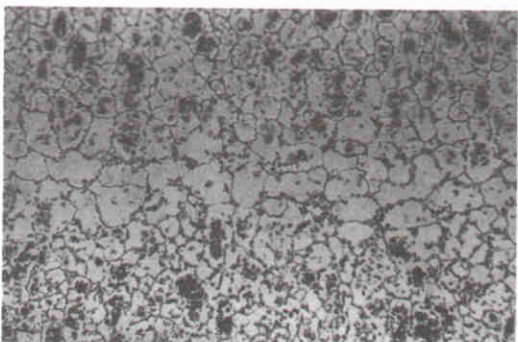
### نتایج و بحث

ریز ساختار اتصال‌های ایجاد شده در حالت ریزدانه در شکل ۱ آمده است. این تصویر مربوط به زمان اتصال ۶۰ دقیقه است که پس از اتصال، عملیات همگن سازی در  $1360^{\circ}\text{C}$  به مدت یک ساعت انجام شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود عملیات همگن سازی باعث تبلور مجدد دانه‌های آلیاژ اولیه شده است ولی فصل مشترک اتصال از بین نرفته است یا به عبارتی بین دانه‌های آلیاژ اولیه و محل اتصال ساختاری پیوسته به وجود نیامده است. ریزساختار اتصال ایجاد شده در حالت تبلور مجدد مربوط به زمان اتصال ۶۰ دقیقه در شکل ۲ آمده است. پس از اتصال، عملیات همگن سازی در  $1360^{\circ}\text{C}$  به مدت یک ساعت انجام شده است. از این شکل دیده می‌شود که دانه‌های هم‌محور از فصل مشترک محل اتصال -زمینه عبور کرده و ریزساختاری پیوسته بین محل اتصال و آلیاژ اولیه ایجاد شده است. تغییرات ریزساختار محل اتصال در زمان‌های مختلف اتصال در مقاله‌های قبلی بحث شده است. [۱۲ و ۱۱] ریزساختار اتصالی که در حالت ریزدانه، اما با اعمال فشار  $0/1\text{ MPa}$  ایجاد شده است با ریزساختار اتصال ایجاد شده در حالت ریزدانه و بدون اعمال



محل اتصال

شکل ۱. ریزساختار اتصال ایجاد شده در حالت ریزدانه، ۶۰ دقیقه، همگن سازی شده در  $1360^{\circ}\text{C}$ ،  $0/1\text{ MPa}$ .



محل اتصال

شکل ۲. ریزساختار اتصال ایجاد شده در حالت تبلور مجدد، ۶۰ دقیقه، همگن سازی شده در  $1360^{\circ}\text{C}$ ،  $0/1\text{ MPa}$ .

جدول ۱. ترکیب شیمیایی (درصد وزنی).

عامل اتصال	MA58	
۱۴-۱۲	۳۰	Cr
۰/۰۳	۰/۰۵	C
—	۰/۳	Al
—	۰/۵	Ti
—	۰/۶	$\text{Y}_2\text{O}_3$
۵-۳	۱	Fe
۵-۴	—	Si
۳/۲-۲/۵	—	B
بقیه	بقیه	Ni

ماوراء صوتی تا موقع اتصال در محلول استون نگهداری شدند. برای اتصال از ورق نازک به ضخامت حدود  $25\mu\text{m}$  به عنوان عامل اتصال استفاده شد. ترکیب شیمیایی عامل اتصال نیز در جدول ۱ آمده است. نمونه‌ها در کوره‌ی القایی فرکانس بالا، در دمای  $1100 \pm 5^{\circ}\text{C}$  و در خلاء  $6 \times 10^{-4}\text{ torr}$ ، و در زمان‌های متفاوت ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه به هم متصل شدند. اتصال آلیاژ ریزدانه تحت شرایط مذکور و در دو حالت -بدون فشار و با اعمال فشار  $0/1\text{ MPa}$  - انجام شد. پس از پایان عملیات اتصال، نمونه‌ها در خلاء تا دمای اتاق سرد شدند. برای همگن سازی ساختار محل اتصال، نمونه‌های متصل شده به مدت یک ساعت در  $1360^{\circ}\text{C}$  گرم و با سرعت  $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$  تا دمای اتاق سرد شدند. ساختار محل اتصال، با میکروسکوپ نوری و الکترونی مورد مطالعه قرار گرفت و متوسط اندازه‌ی دانه‌ی محل اتصال به روش خطی اندازه گیری شد.

آزمون خستگی به روش چرخشی - خمشی و با سرعت  $2850\text{ rpm}$  روی نمونه‌هایی که زمان اتصال آنها ۳۰ دقیقه بود انجام شد. استحکام برشی نمونه‌ها نیز با دستگاه اینسترون و با سرعت  $0/2\text{ cm}/\text{Min}$  اندازه گیری شد. برای انجام آزمون برشی نگه‌دارنده‌ی بی (جیگ) ساخته شد که در هر نیمه‌ی آن سوراخی به ابعاد  $10 \times 10 \times 5\text{ mm}$  با اسپارک ایجاد شد و پس از قراردادن نمونه‌ی متصل شده در یکی از سوراخ‌های یک نیمه، نیمه‌ی دیگر روی آن قرار گرفت و به هنگام آزمون برشی استوانه‌ی توخالی این دو نیمه را روی هم نگه می‌داشت. برای مقایسه‌ی خواص مکانیکی محل اتصال با خواص سوپر آلیاژ، آزمون تعیین استحکام برشی و آزمون خستگی بر روی نمونه‌های سوپر آلیاژ (بدون اتصال) نیز انجام شد. آزمون‌های مکانیکی سوپر آلیاژ در حالت تبلور مجدد انجام شد.

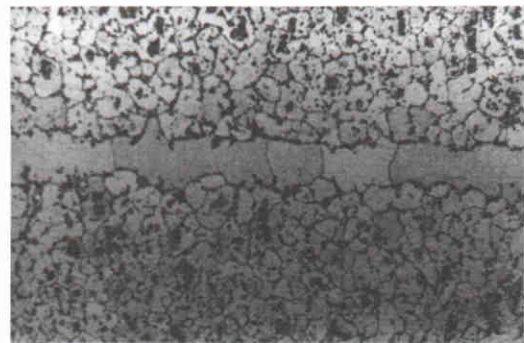


تغییری در اندازه‌ی دانه مشاهده نشد. بنابراین می‌توان انرژی محرکه و در نتیجه آهنگ رشد دانه‌ها را برای زمان‌های مختلف اتصال یکسان در نظر گرفت. به نظر می‌رسد که در حالت تبلور مجدد اندازه‌ی دانه در محل اتصال با اندازه‌ی دانه‌ی آلیاژ اولیه کنترل می‌شود زیرا دانه‌ها از فصل مشترک محل اتصال - زمینه عبور کرده است و بین دانه‌های محل اتصال و آلیاژ اولیه پیوستگی وجود دارد (شکل ۲). بنابراین می‌توان گفت که به‌هنگام عملیات گرمایی یکنواخت‌سازی دانه‌های آلیاژ اولیه بر رشد دانه‌های محل اتصال تأثیر دارند.<sup>[۱۲، ۱۱]</sup> شکل ۴ همچنین نشان می‌دهد که اندازه‌ی دانه در اتصالی که در حالت ریزدانه ساخته شده و سپس تحت عملیات گرمایی یکنواخت‌سازی قرار گرفته است بزرگ‌تر از اندازه‌ی دانه در اتصالی است که در حالت تبلور مجدد ساخته شده و سپس تحت عملیات گرمایی یکنواخت‌سازی قرار گرفته است. این اختلاف در اندازه‌ی دانه را می‌توان به انرژی ذخیره‌شده کرنشی در حالت ریزدانه مرتبط کرد. زیرا مشخص شده است که رشد دانه به‌شدت تحت تأثیر انرژی ذخیره‌شده‌ی دانه‌های مجاور است.<sup>[۱۳]</sup> احتمالاً افزایش اندازه‌ی دانه در محل اتصال ناشی از انرژی ذخیره‌شده‌ی بالا در دانه‌های ریز مجاور محل اتصال و نبودن  $\gamma_{20\%}$  در محل اتصال است.<sup>[۱۱]</sup> همچنین از شکل ۴ دیده می‌شود که در مورد اتصالات ایجاد شده در حالت ریزدانه، اندازه‌ی دانه‌ی محل اتصال با افزایش زمان اتصال افزایش می‌یابد. این افزایش در اندازه‌ی دانه را می‌توان به تغییرات حرکت مرز دانه در اثر نفوذ عناصر آلیاژی، مثل سیلیسیم، آهن، و بر، از محل اتصال به آلیاژ اولیه مرتبط دانست.<sup>[۱۱]</sup> تغییرات اندازه‌ی دانه در اتصالی که در حالت ریزدانه و با اعمال فشار  $1 \text{ MPa}$  ایجاد شده است مشابه تغییرات اندازه‌ی دانه در اتصال ایجاد شده در حالت ریزدانه است. به نظر می‌رسد که اعمال فشار تأثیری بر اندازه‌ی دانه‌ی محل اتصال ندارد زیرا اعمال فشار باعث کاهش ضخامت محل اتصال می‌شود حال آنکه اندازه‌ی دانه در راستای عمود بر ضخامت اتصال اندازه‌گیری شده است.

تغییرات استحکام برشی اتصالات ایجاد شده در شرایط مختلف در شکل ۵ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات استحکام برشی اتصال ایجاد شده در حالت ریزدانه بر اثر افزایش زمان اتصال ناچیز است. این امر می‌تواند مربوط به عدم تغییر توزیع عناصر آلیاژی، مثل نیکل، کرم، سیلیسیم، آهن، آلومینیم، در محل اتصال بر اثر افزایش زمان اتصال باشد.<sup>[۱۱]</sup> تغییرات استحکام برشی اتصالات ایجاد شده در حالت تبلور مجدد و در حالت ریزدانه با اعمال فشار نیز مشابه تغییرات استحکام برشی اتصال ایجاد شده در

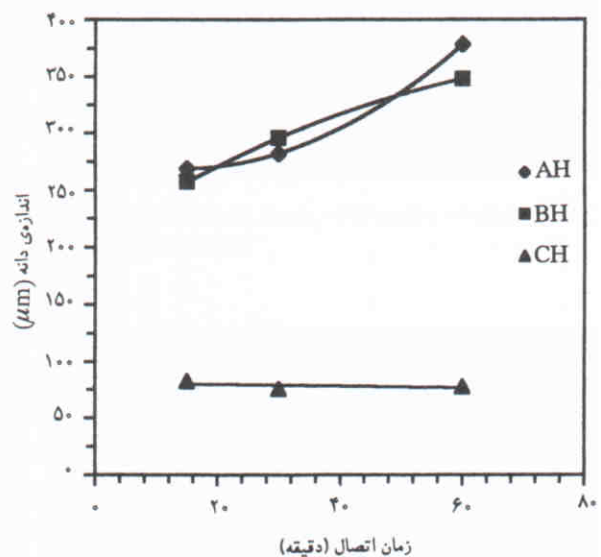
فشار مشابهت دارد (شکل ۳)، اما به علت اعمال فشار ضخامت محل اتصال کمی کاهش یافته است. از شکل‌های ۱ و ۲ و ۳ دیده می‌شود که اندازه‌ی دانه در محل اتصالات ایجاد شده در شرایط مختلف از اندازه‌ی دانه‌ی آلیاژ اولیه (زمینه) بزرگ‌تر است.

تغییرات اندازه‌ی دانه‌ی محل اتصال پس از همگن‌سازی اتصال ایجاد شده در دمای  $1360^\circ\text{C}$  و به مدت یک ساعت در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل دیده می‌شود در مورد اتصالی که در حالت تبلور مجدد انجام شده است، اندازه‌ی دانه‌ی محل اتصال مستقل از زمان اتصال است. چون نیروی محرکه برای رشد دانه‌ها کاهش در انرژی مرز دانه‌هاست و با افزایش زمان اتصال



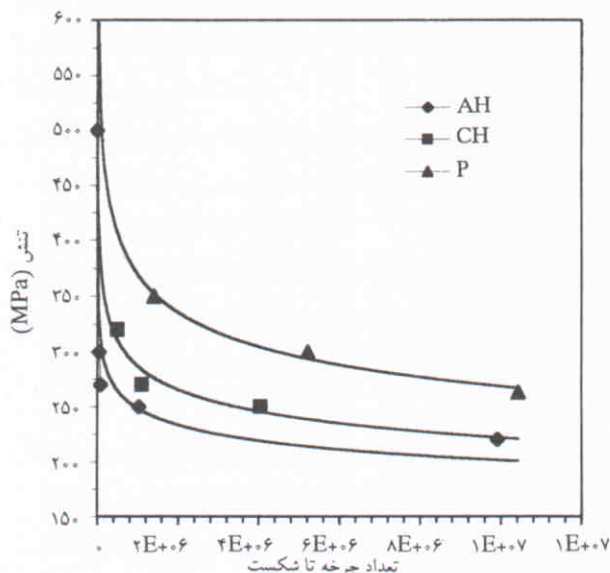
محل اتصال

شکل ۳. ریزساختار اتصال ایجاد شده در حالت ریزدانه و با اعمال فشار  $1 \text{ MPa}$ ،  $60$  دقیقه، همگن‌سازی شده در  $1360^\circ\text{C}$ ،  $250 \times$ .



شکل ۴. تأثیر زمان اتصال بر اندازه‌ی دانه‌ی محل اتصال.

AH: اتصال در حالت ریزدانه و سپس به مدت یک ساعت در  $1360^\circ\text{C}$  همگن‌سازی شده است.  
 BH: مشابه با AH ولی به‌هنگام اتصال فشار  $1 \text{ MPa}$  اعمال شده است.  
 CH: اتصال در حالت تبلور مجدد و سپس همگن‌سازی شده است.



شکل ۶. منحنی S-N نمونه‌های اتصال یافته به روش TLP.

AH. اتصال در حالت ریزدانه و همگن سازی شده، زمان اتصال ۳۰ دقیقه.  
 CH. اتصال در حالت تبلور مجدد یافته و همگن سازی شده، زمان اتصال ۳۰ دقیقه.  
 P. سوپر آلیاژ اولیه در حالت تبلور مجدد یافته.

منحنی‌های S-N نمونه‌های متصل شده در حالت ریزدانه و تبلور مجدد و نیز منحنی S-N آلیاژ MAY58 در شکل ۶ آمده است.

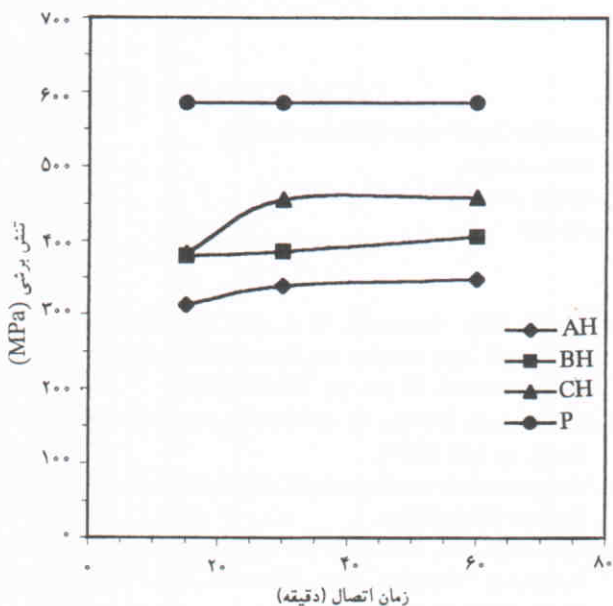
چنان‌که مشاهده می‌شود، در یک چرخه‌ی معین تا شکست، استحکام خستگی اتصالات ایجاد شده در حالت تبلور مجدد بیشتر از استحکام خستگی اتصالات ایجاد شده در حالت ریزدانه است. چنان‌که از مقایسه‌ی شکل‌های ۱ و ۲ پیداست، این افزایش استحکام می‌تواند ناشی از ریزتر بودن دانه‌های محل اتصال در اتصال ایجاد شده در حالت تبلور مجدد (شکل ۴) و نیز پیوسته بودن دانه‌های محل اتصال و آلیاژ اولیه باشد.

همچنین از شکل ۶ دیده می‌شود که در یک چرخه‌ی معین تا شکست استحکام خستگی آلیاژ اولیه بیشتر از استحکام خستگی اتصالات ایجاد شده است. کاهش استحکام در اتصالات ایجاد شده احتمالاً به درشت‌تر بودن دانه‌های محل اتصال نسبت به آلیاژ اولیه و نیز برقرار نبودن اتصال کامل در کناره‌های نمونه‌های متصل شده مربوط است.

### نتیجه‌گیری

سوپر آلیاژ MAY58 ODS در دو حالت ریزدانه (با اعمال فشار و بدون فشار) و دانه‌های تبلور مجدد هم‌محور به هم متصل شدند. ریزساختار محل اتصال پس از انجام عملیات گرمایی

حالت ریزدانه است. استحکام برشی اتصال ایجاد شده در حالت تبلور مجدد و در زمان ۱۵ دقیقه کمتر از استحکام برشی اتصالات ایجاد شده در زمان‌های طولانی‌تر است. این اختلاف در استحکام برشی را می‌توان مربوط به تشکیل فاز یوتکتیک دانست.<sup>[۱۱]</sup> در حالت تبلور مجدد، کامل شدن انجماد هم‌دما به بیش از ۱۵ دقیقه زمان نیاز دارد.<sup>[۱۱ و ۱۲]</sup> زیرا این زمان برای نفوذ عناصری مثل B و Si از محل اتصال به آلیاژ اولیه کافی نیست. از شکل ۵ دیده می‌شود که در زمان‌های اتصال بیش از ۱۵ دقیقه استحکام برشی اتصالات ایجاد شده در حالت تبلور مجدد بیش از استحکام برشی اتصالات ایجاد شده در حالت ریزدانه است. این افزایش در استحکام برشی را می‌توان ناشی از ریزتر بودن دانه‌های محل اتصال در اتصالات ایجاد شده در حالت تبلور مجدد دانست (شکل ۴). برای مقایسه استحکام برشی سوپر آلیاژ MAY58 نیز در شکل ۵ (منحنی P) آمده است. همان‌طور که از شکل ۵ پیداست استحکام برشی اتصال ایجاد شده در حالت تبلور مجدد حدود ۸۰٪ استحکام برشی آلیاژ اولیه است. عدم دستیابی به استحکام برشی آلیاژ اولیه را می‌توان مربوط به درشت‌تر بودن دانه‌ی محل اتصال در اتصالات ایجاد شده نسبت به دانه‌های آلیاژ اولیه (شکل ۲) و نیز برقرار نبودن اتصال کامل در کناره‌های نمونه مرتبط دانست.



شکل ۵. تغییرات استحکام برشی محل اتصال با زمان اتصال.

AH. اتصال در حالت ریزدانه و همگن سازی شده.  
 BH. اتصال در حالت ریزدانه با اعمال فشار ۱ MPa و سپس همگن‌سازی.  
 CH. اتصال در حالت تبلور مجدد و همگن سازی شده.  
 P. سوپر آلیاژ اولیه در حالت تبلور مجدد یافته.



استحکام برشی اتصالات ایجاد شده در حالت ریزدانه است. استحکام برشی آلیاژ اولیه بیش از استحکام برشی اتصالات ایجاد شده است. اختلاف در استحکام برشی نیز ناشی از درشت تر بودن دانه‌های محل اتصال نسبت به آلیاژ اولیه و نیز عدم اتصال کامل در کناره‌های نمونه است.

۵. استحکام خستگی اتصال ایجاد شده در حالت تبلور مجدد بیشتر از استحکام خستگی اتصالات ایجاد شده در حالت ریزدانه است. افزایش استحکام ناشی از ریز تر بودن دانه‌های محل اتصال در حالت تبلور مجدد و پیوستگی دانه‌های محل اتصال با آلیاژ اولیه است.

۶. استحکام خستگی آلیاژ اولیه بیشتر از استحکام خستگی اتصالات ایجاد شده در حالت تبلور مجدد و ریزدانه است. کاهش استحکام خستگی اتصالات ایجاد شده ناشی از درشت تر بودن دانه‌های محل اتصال نسبت به فلز اصلی و نیز عدم اتصال کامل در کناره‌های نمونه و نبودن ذرات  $Y_2O_3$  در محل اتصال است.

یکنواخت‌سازی، مورد مطالعه قرار گرفت. استحکام برشی و استحکام خستگی اتصالات ایجاد شده اندازه‌گیری شد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که:

۱. وقتی آلیاژ اولیه در حالت تبلور مجدد به هم متصل شود. دانه‌های آلیاژ اولیه از فصل مشترک محل اتصال - زمینه عبور کرده و ساختاری پیوسته ایجاد می‌شود.

۲. اندازه‌ی دانه‌ی اتصال ایجاد شده در حالت تبلور مجدد مستقل از زمان اتصال است، حال آنکه در حالت ریزدانه (اتصال بدون اعمال فشار یا با اعمال فشار) این اندازه با افزایش زمان اتصال افزایش می‌یابد.

۳. اندازه‌ی دانه‌ی محل اتصال در اتصالات ایجاد شده در حالت ریزدانه بزرگ‌تر از اندازه‌ی دانه‌ی محل اتصال در اتصالات ایجاد شده در حالت تبلور مجدد است. این اختلاف در اندازه‌ی دانه ناشی از انرژی ذخیره شده‌ی بالاتر در حالت ریزدانه است.

۴. استحکام برشی اتصالات ایجاد شده در حالت تبلور مجدد بیشتر از

#### پانوشته‌ها

1. transient liquid phase diffusion bonding
2. shear strength
3. fatigue strength
4. wrought

#### منابع

1. Duvall, D.S., Owczarski, W.A. and Pauldnis, D.F., "TLP Bonding, a New Method for Joining Heat resistant alloys", *Welding Journal*, **54** (3), pp 203-214 (1974).
2. Thambury, R., Wallace, W. and Goldak, J.A., *Int. Metal. review*, **28** (1), pp 1-22 (1983).
3. Thompson, R.G. and Genculu, S., *Welding Journal*, **62** (12), pp 331-S to 345-S (1983).
4. Shoemaker, L.E., *Proc of int. on "Trend in Welding Research"*, Gatlinbury, Tennessee, May 1986, Ed. S.A., David ASM International, pp 371-377 (1986).
5. Holko, K.H. and Moore, T.J., "Enhanced diffusion welding of TD-NiCr sheet", *Welding Journal*, **51** (2), pp 81-S to 89-S (1972).
6. Kleicker, J., *Proc. Conf. on Brazing*, "High temperature brazing and diffusion welding", Essen, Germany, pp 53-56 (Sept 1980).

7. Kokawa, H., Lee, C.H. and North, T.H., "Effect of grain boundaries on isothermal solidification during transient liquid phase brazing", *Met. Trans. A*, **22A**, pp 1627-1631 (1991).
8. Saida, K., Zhou, Y. and North, T.H., "The influence of base Metal grain size on isothermal solidification during transient liquid phase brazing of nickel", *Journal. of Mater. Sci.*, **28**, pp 6421-6432 (1993).
9. Khan, T.I. and Wallach, E.R., "Transient liquid phase diffusion bonding and associate recrystallization phenomena when joining ODS ferritic Superalloys", *Mater. Sci., and Technology*, **12**, pp 603-606 (1996).
10. Khan, T.I. and Wallach, E.R., "Use of sputter coating to control parent metal dissolution during transient liquid phase bonding", *Journal. of Mater. Sci.*, **31**, pp 2937-2943 (1996).
11. Ekrami, A., and Khan, T.I., "Transient liquid phase diffusion bonding of oxide dispersion strengthened nickel alloy MA758", *Mater. Sci. and Technology*, **15**, pp 946-950 (1999).
۱۲. اکرامی، علی اکبر. «اتصال سوپر آلیاژ MA758، سومین کنگره انجمن مهندسين متالورژی ايران» صفحه ۳۴۷ تا ۳۵۶. (مهرماه ۱۳۷۸).
13. Humphreys, F.J. and Matherly, M., "Recrystallization and related annealing phenomena", *LSt Edn*, **201**, Oxford, UK, Pergamon Press, (1996).