



سمینار درس انجماد پیشرفته

فرایند اتصال دهی فاز مایع گذرا

Transient Liquid Phase (TLP)

زمستان ۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فهرست

- ۱ - مقدمه:..... ۵
- ۲ - فرایند اتصال دهی فاز مایع گذرا (TLP):..... ۵
- ۳ - مکانیزم ایجاد اتصال توسط فرایند TLP:..... ۶
- ۳-۱- مرحله صفر پیونددهی TLP (حرارت دادن تا دمای پیوند دهی):..... ۶
- ۳-۲- مرحله اول پیونددهی TLP (ایجاد ذوب در موضع اتصال):..... ۷
- ۳-۳- مرحله دوم پیونددهی TLP (انحلال فلز پایه در فاز مذاب):..... ۱۰
- ۳-۴- مرحله سوم پیونددهی TLP (انجماد همدمای فاز مذاب):..... ۱۰
- ۳-۵- مرحله چهارم پیونددهی TLP (همگن سازی در حالت جامد):..... ۱۱
- ۴ - مقایسه فرایندهای پیونددهی نفوذی ، TLP و لحیم کاری:..... ۱۲
- ۵ - عوامل مؤثر در فرایند اتصال دهی TLP:..... ۱۳
- ۵-۱- دما و زمان پیونددهی :..... ۱۳
- ۵-۲- کیفیت سطحی سطوح تماس :..... ۱۳
- ۵ - ۳- لایه واسط:..... ۱۴
- ۵-۴- تمسفر محافظ:..... ۱۶
- ۵-۵- سرعت گرم و سرد شدن اتصال:..... ۱۶
- ۶ - خواص مکانیکی اتصال TLP:..... ۱۶
- ۷ - کاربرد فرایند اتصال دهی TLP:..... ۱۷
- ۷ - ۱- اتصال دهی TLP آلیاژها و کامپوزیت های پایه آلومینیوم:..... ۱۷
- ۷ - ۲- اتصال دهی ترکیبات بین فلزی و سرامیک ها:..... ۱۸
- ۷-۳- اتصال دهی آلیاژهای حافظه دار:..... ۱۸
- ۷ - ۴ - اتصال دهی و تعمیر سوپرآلیاژها:..... ۱۸
- ۷ - ۵- ذوب لایه واسط :..... ۲۰
- ۸- تغییرات ریزساختاری موضع اتصال حین انجماد غیرهمدما:..... ۲۲

- ۸-۱- انجماد همدمای فاز مذاب و تغییرات ریزساختاری مربوطه:..... ۲۲
- ۸-۲- بررسی سینیتیک انجماد همدمای و مدل های مربوطه:..... ۲۲
- ۸-۳- مکانیزم تشکیل DAZ:..... ۲۶
- ۹- نتیجه گیری:..... ۲۷

۱ - مقدمه:

فرایندهای اتصال با فاز مایع گذرا و اتصال با فاز مایع گذرای جزئی ترکیبی از فرایندهای اتصال نفوذی و لحیم کاری سخت می باشند، یعنی در این فرایندها فصل مشترک بین دو قطعه به وسیله یک مذاب ایجاد می شود، اما در نهایت اتصالی شبیه اتصال نفوذی ایجاد می گردد.

در این فرایند یک لایه واسطه با نقطه ذوب پایین تر از اجزای متصل شونده در بین قطعات قرار می گیرد که پس از حرارت دادن و ذوب شدن، به صورت همدمان منجمد می شود و یک اتصال دائمی ایجاد می کند. نفوذ متقابل اتم ها در ناحیه فصل مشترک نیز باعث همگن شدن منطقه اتصال می شود. در فرایند اتصال با فاز مایع گذرای جزئی تنها سطوح خارجی لایه واسطه ذوب می شود.

۲ - فرایند اتصال دهی فاز مایع گذرا (TLP):

Duvall و همکارانش در سال ۱۹۷۲ برای غلبه بر معایب و مشکلات روش های پیونددهی سوپرآلیاژها و دیگر آلیاژهای دیرگداز، با تلفیق در فرایند پیونددهی نفوذی و لحیم کاری سخت، یک روش جدیدی برای اتصال دهی این گروه از مواد توسعه دادند. در این فرایند پیونددهی، یک لایه واسطه بین دو سطح موردنظر برای پیونددهی قرار داده شده و مجموعه حاصل تا دمای موردنظر برای پیونددهی حرارت داده می شود. در دمای پیونددهی یک فاز مذاب (همانند لحیم کاری) در موضع اتصال تشکیل می شود و در ادامه با نگهداری این مجموعه پیوند دهی در دمای پیونددهی، نفوذ درهم عناصر آلیاژی بین فاز مذاب و فاز جامد اطراف آن موجب تغییر ترکیب شیمیایی فاز مذاب و در نهایت باعث از بین رفتن فاز مذاب از موضع اتصال در دمای پیونددهی می شود. با توجه به ماهیت گذرای فاز مذاب در این روش پیونددهی (تشکیل و از بین رفتن فاز مذاب) به این روش فرایند اتصال دهی فاز مایع گذرا (TLP) می گویند (۹). استفاده از کلیات فرایند اتصال دهی فاز مایع گذرا (TLP) برای اتصال فلزات به زمان های قدیم برمی گردد، هنگامیکه Cellini برای اتصال دانه های تزئینی طلا به زیورآلات از فرایند پیونددهی TLP استفاده نمود.

Cellini با استفاده از اکسید مس دانه های تزئینی را به زیورآلات موردنظر متصل می نمود و سپس مجموعه را در معرض شعله احیا کننده قرار می داد. شعله احیا کننده منجر به احیا اکسید مس، تشکیل ترکیب یوتکتیک مس با طلا و ذوب شدن موضع اتصال می شد. در نهایت با نفوذ مس به زیرلایه، فاز مذاب مذکور منجمد و منجر به اتصال دانه های تزئینی به زیورآلات می شود (۸).

۳ - مکانیزم ایجاد اتصال توسط فرایند TLP:

یک مثال ساده از فرایند اتصال دهی TLP شامل اتصال زیرلایه A با استفاده از یک لایه واسط از جنس A به همراه عنصر B می باشد (B عنصر کاهش دهنده نقطه ذوب (MPD) می باشد که به ترکیب شیمیایی لایه واسط اضافه شده است. ترکیب شیمیایی لایه واسط بگونه ای انتخاب می شود که در دمای پیونددهی (T_B) یک فاز مذاب در موضع اتصال (مثلاً دو عنصر A و B تشکیل یک فاز یوتکتیک بدهند). در این مجموعه پیونددهی، فرایند اتصال دهی TLP به چهار مرحله زیر قابل تقسیم است (A).

۱- تشکیل ذوب

۲- انحلال زیرلایه

۳- انجماد همدم

۴- همگن سازی در حالت جامد

لازم به ذکر است برای تأثیر سرعت حرارت دادن تا دمای پیوند دهی یک مرحله ابتدایی یعنی مرحله صفر نیز به مراحل چهارگانه فوق اضافه می شود (۵). در اتصال دهی TLP آلیاژهای چند جزئی (آلیاژهای مورد استفاده در صنعت) برخی مراحل اتصال دهی ممکن است همزمان رخ دهد.

۳-۱- مرحله صفر پیونددهی TLP (حرارت دادن تا دمای پیوند دهی):

سطوح تماس بین لایه واسط و آلیاژ پایه موجب تشکیل فصل مشترک بین این دو جزء می شود. لازم به ذکر است سطوح تماس در میان ناهمواریهای درشت ساختاری لایه واسط و یا آلیاژهای پایه ایجاد می شود. با افزایش دما، به علت کاهش استحکام تسلیم، فصل مشترک مذکور توسعه می یابد. نیروی محرکه تشکیل فصل مشترک، کاهش انرژی کل سیستم به علت جایگزین شدن یک جفت سطوح آزاد توسط فصل مشترک جامد/جامد می باشد. افزایش ضریب نفوذ عناصر آلیاژی با افزایش دما منجر به افزایش نفوذ درهم بین لایه واسط و زیر لایه می شود (۲). با در نظر گرفتن آنالیز Darken و Gary مقدار کلی MPD از دست داده شده (W_{LOSS}) از لایه واسط که به آلیاژ نفوذ کرده است را در دمای ثابت T می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$W_{LOSS} = 8.25 C_{\alpha s} (D_{St})^{0.5}$$

که در معادله فوق $C_{\alpha s}$ حد حلالیت MPD در فاز جامد ، D_s ضریب نفوذ MPD در فاز جامد و t مدت زمان نگهداری در دمای T است . به منظور تعمیم رابطه فوق برای محاسبه مقدار MPD از دست داده شده حین گرمایش تا دمای پیونددهی می توان از ضریب نفوذ مؤثر (D_{eff}) حین گرمایش استفاده نمود .

$$D_{eff} = \frac{\int_0^t D(t) dt}{t_0}$$

که در معادله فوق t_0 کل مدت زمان حرارت دادن می باشد . با توجه به شارش ناچیز اتمی در دمای کمتر از ٪ ۸۰ دمای پیونددهی ارتباط بین دما و زمان پیونددهی را می توان به صورت زیر بیان نمود .

$$T = t \cdot \tau + 0.8 T'$$

که در رابطه فوق T' دمای پیوند دهی و τ نرخ حرارت دادن می باشد . با تغییر متغیر T به t و استفاده از رابطه آرنیوسی زیر:

$$D_{eff} = \frac{5}{T} \int_{0.8T}^T D_0 \exp(-Q/RT) dt$$

که در رابطه فوق Q سد انرژی ، D_0 ضریب اکسپنشنیال و R ثابت گازها می باشد . همانطور که از رابطه فوق استنباط می شود D_{eff} مستقل از نرخ گرمایش است .

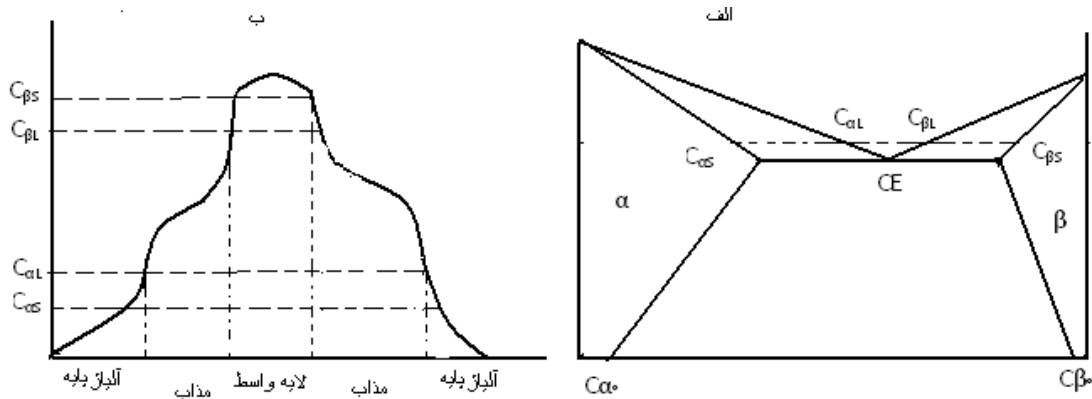
۳-۲- مرحله اول پیونددهی TLP (ایجاد ذوب در موضع اتصال):

دو مکانیزم برای برای تشکیل فاز مذاب در موضع اتصال مطرح می باشد .

الف : افزایش دمای پیونددهی از دمای ذوب لایه واسط

ب: اندرکنش بین لایه واسط با آلیاژ پایه مجاور آن و تشکیل یک فاز مذاب در موضع اتصال (۷) .

Macdonald و Eager بر حسب مکانیزم تشکیل مذاب در موضع اتصال ، فرایندهای TLP را به دو کلاس I و II تقسیم کردند . در فرایندهای نوع I ، لایه واسط یک فلز خالص می باشد (MPD) و مکانیزم تشکیل ذوب اندرکنش لایه واسط و فاز جامد است و در فرایندهای نوع II ترکیب شیمیایی لایه واسط در حدود خط مذاب Liquidous است و مکانیزم تشکیل ذوب در موضع اتصال ، ذوب شدن لایه واسط است . همانطور که در شکل نشان داده شده است برای انحلال لایه واسط به چهار فصل مشترک جامد/ مایع احتیاج است .



شکل (الف) دیاگرام فرضی یوتکتیک دو تایی

شکل (ب) انحلال یک لایه واسط خالص

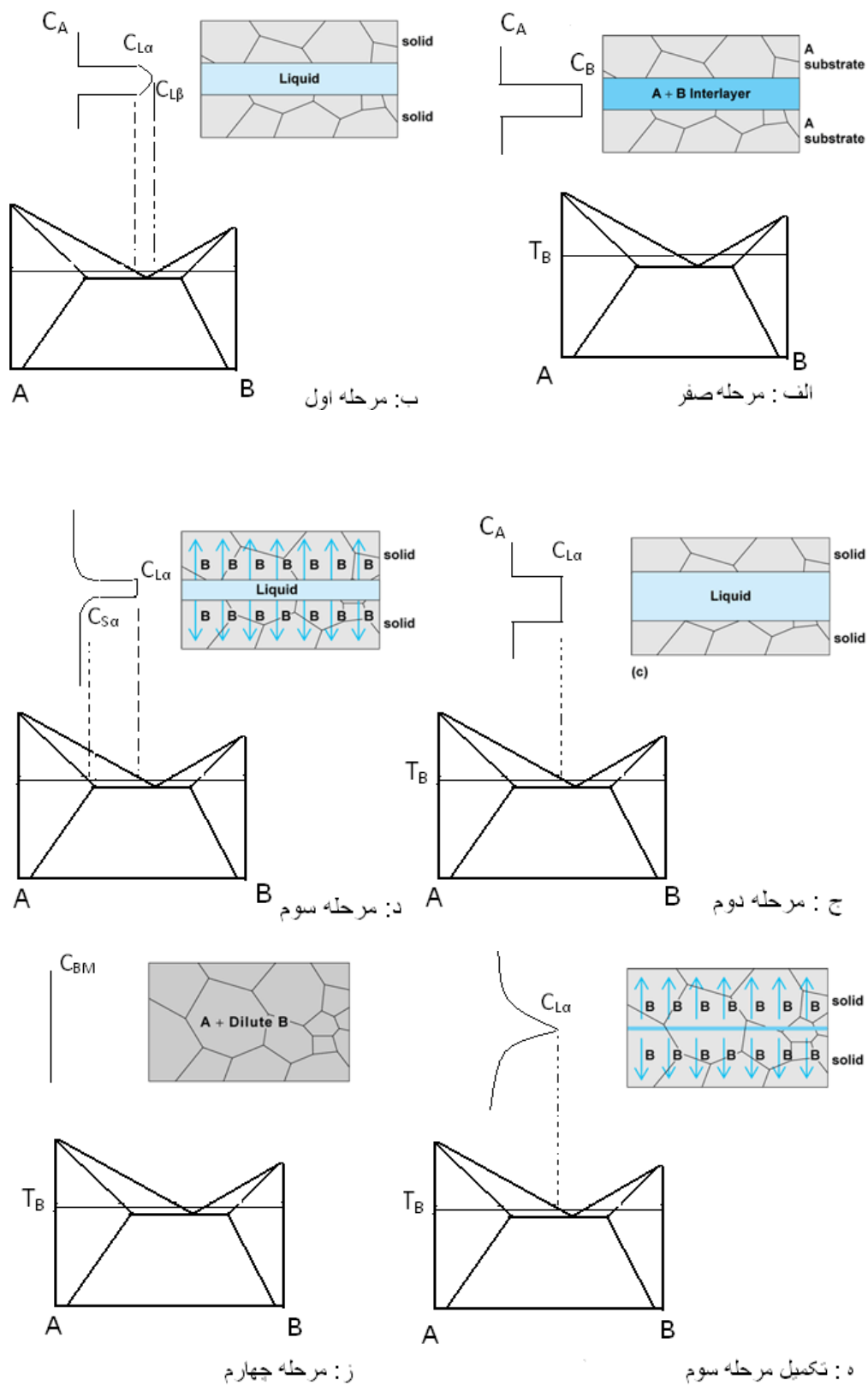
تعیین ترکیب شیمیایی فاز مذاب در این مرحله غیرممکن است. در حالت کلی می توان گفت ترکیب شیمیایی فاز مذاب بین خطوط لیکویدوس ($C_{\alpha L} - C_{\beta L}$) قرار می گیرد. با توجه به گرادیان ترکیب شیمیایی در فاز مذاب (شکل ب) می توان استنباط نمود که در مراحل اولیه ذوب لایه واسط، تغییرات ترکیب شیمیایی توسط حرکت اتمی در فصل مشترک کنترل می شود نه نفوذ اتمی (۱).

Tuah – PoKu و همکارانش با فرض کنترل کنندگی نفوذ در مذاب، معادله زیر را برای تخمین مدت زمان انحلال لایه واسط ارائه نمودند:

$$t = \frac{W_0}{16 K^2 D_L}$$

که در رابطه فوق W_0 پهنای لایه واسط، K ثابت مشتق شده از دیاگرام فازی و D_L ضریب نفوذ در فاز مذاب است. بررسی ها و تحقیقات انجام شده دلالت بر توسعه همزمان انحلال لایه واسط و انحلال آلیاژ پایه مجاور آن در فاز مذاب دارد. مذاب تشکیل شده باعث ترشوندگی سطوح تماس فلز پایه و لایه واسط می شود. بعلاوه افزایش سطح تماس زیرلایه/لایه واسط در اثر پخش شدن مذاب در این سطح، نرخ نفوذ درهم و تشکیل مذاب افزایش می یابد. بعد از مرحله اول اتصال دهی، مذاب تشکیل شده در موضع اتصال، غیرهمگن و فوق اشباع می باشد. به عبارت دیگر ترکیب شیمیایی متوسط B در فاز مذاب بیشتر از مقدار تعادلی آن در تماس با فاز جامد فلز پایه می باشد (۴).

شکل شماتیک تغییرات ترکیب شیمیایی و موضع اتصال حین مراحل پیونددهی را به صورت اشکال زیر می توان ترسیم کرد.



۳-۳- مرحله دوم پیونددهی TLP (انحلال فلز پایه در فاز مذاب):

گرایان غلظتی MPD در فاز مذاب (بلافاصله بعد از اتمام مرحله اول فرایند TLP) موجب شارش MPD از فاز مذاب به جامد مجاور آن و در نتیجه انحلال بخش هایی از آلیاژ پایه در فاز مذاب می شود. توسعه فاز مذاب یا انحلال آلیاژ پایه در فاز مذاب، تا ایجاد تعادل موضعی در فصل مشترک بین فاز مذاب و آلیاژ پایه مجاور آن ادامه دارد. بعد از تکمیل این مرحله، یک فاز مذاب با غلظت $C_{L\alpha}$ در تعادل با فاز جامد مجاور آن تشکیل می گردد و پهنای فاز مذاب به مقدار حداکثر خود می رسد.

بر اساس قانون بقای جرم و فرض ناچیز بودن مقدار MPD که حین حرارت دادن تا دمای پیوند دهی به آلیاژ پایه نفوذ کرده است، می توان رابطه زیر را برای محاسبه پهنای حداکثر فاز مذاب (W_{max}) توسعه داد.

$$\left. \begin{aligned} m_{MPD}^0 &= m_{IMPD} \\ m_{MPD} &= \rho \cdot A \cdot W \cdot C_{MPD} \end{aligned} \right\} \gg W \cdot C_1 \rho_{IN} = (W_{max} - W^0) C_{L\alpha} \rho_{BM} + W^0 C_{L\alpha} \rho_{IN}$$

در رابطه فوق m_{IMPD} و m_{MPD}^0 به ترتیب عبارتند از مقدار MPD موجود در لایه واسط و فاز مذاب، ρ_{IN} و ρ_{BM} نیز به ترتیب چگالی لایه واسط و آلیاژ پایه، A مساحت فصل مشترک L/S و W^0 پهنای اولیه لایه واسط می باشد. همچنین C_1 غلظت اولیه MPD در لایه واسط و $C_{L\alpha}$ غلظت MPD فاز مذاب در تعادل با فاز جامد می باشد.

با مرتب نمودن معادله بالا، معادله زیر بدست می آید:

$$W_{max} = W^0 \left[1 + \frac{C_1 - C_{L\alpha}}{C_{L\alpha}} * \frac{\rho_{IN}}{\rho_{BM}} \right]$$

و با فرض در حدود هم بودن چگالی لایه واسط و آلیاژ پایه می توان معادله را به صورت زیر نوشت:

$$W_{max} = W^0 * C_1 / C_{L\alpha}$$

تحقیقات Tuah - PoKu و همکارانش بر سیستم Ag/cu/Ag آشکار نمود مقادیر تجربی و محاسبه شده برای W_{max} توسط این معادله از همخوانی خوبی برخوردار است.

۳-۴- مرحله سوم پیونددهی TLP (انجماد همدمای فاز مذاب):

مهمترین مرحله از مراحل اتصال دهی TLP، انجماد همدمای فاز مذاب می باشد، بطوریکه تفاوت بین فرایند اتصال دهی TLP و لحیم کاری توسط این مرحله مشخص می شود. انجماد همدمای فاز مذاب با

تشکیل فاز جامد بر فصل مشترک L/S شروع و به طرف ناحیه مرکزی اتصال پیشروی می کند . نفوذ MPD در فاز جامد مجاور اتصال ، عامل کنترل کننده انجماد همدمای می باشد(۶).

بعبارت دیگر گرادیان MPD در آلیاژ پایه موجب نفوذ عنصر MPD از فاز جامد مجاور اتصال به فاز جامد دورتر از مذاب (اتصال) می-شود که این نفوذ اتمی باعث کمترشدن غلظت MPD در آلیاژ پایه مجاور با فاز مذاب از میزان تعادلی آن ($C_{\alpha L}$) می شود ، در این شرایط برای حفظ تعادل موضعی در فصل مشترک L/S ، عنصر MPD از فاز مذاب به فاز جامد مجاور آن نفوذ می کند . کاهش غلظت MPD در فاز مذاب موجب می شود میزان مذاب کمتری بتواند در تعادل با فاز جامد واقع شود ، یعنی فصل مشترک L/S به طرف موضع مرکزی اتصال حرکت می کند و باعث پیشرفت انجماد همدمای می شود . نرخ نفوذ آهسته عنصر MPD در فاز جامد نسبت به نفوذپذیری آن در فاز مذاب موجب می شود مدت زمان لازم برای تکمیل انجماد همدمای طولانی تر از مراحل قبل شود . حین انجماد همدمای رشد اپیتکسیال زیرلایه بداخل فاز مذاب موجب توسعه ساختار مشابه با ساختار آلیاژ پایه در موضع اتصال می شود . زاویه تماس یا ترشوندگی (θ) برای یک جوانه نیم کره ای بر روی زیرلایه به صورت زیر بیان می شود:

$$\theta = \text{ArcCOS} \frac{\gamma_{LS} - \gamma_{NS}}{\gamma_{NL}}$$

که γ_{LS} کشش سطحی بین زیرلایه و مذاب لایه واسط ، γ_{NS} کشش سطحی بین جوانه و زیرلایه و γ_{NL} کشش سطحی بین مذاب و لایه واسط می باشد . در اغلب سیستم های TLP ، ریزساختار و ترکیب شیمیایی فاز منجمد شده به صورت همدمای ، در حدود ترکیب شیمیایی فاز مذاب است . بنابراین γ_{NS} به سمت صفر میل می کند و همچنین در این سیستم ها γ_{LS} در حدود γ_{NL} می باشد . در این شرایط θ و در نتیجه فاکتور شکل (θ) S به صفر نزدیک می شود ، بنابراین حتی در شرایط مادون انجماد صفر (حین انجماد همدمای) هیچ سد انرژی برای جوانه زنی غیرهمگن وجود ندارد و انجماد همدمای به صورت اپیتکسیال صورت می پذیرد.

۳-۵- مرحله چهارم پیونددهی TLP (همگن سازی در حالت جامد):

شرایط همگن سازی برحسب شرایط کاری نمونه اتصال داده شده تعیین می شود . عملیات همگن سازی موضع اتصال در دمای پیونددهی و دماهای پایین تر یا بالاتر از آن صورت می پذیرد . همچنین عملیات همگن سازی را می توان با نگهداشتن نمونه ها در دمای پیونددهی (بعد از تکمیل انجماد همدمای) انجام داد و یا بعد از سرد شدن نمونه ها ، عملیات همگن سازی در دمای موردنظر انجام شود . علیرغم تکمیل انجماد همدمای ، برای جلوگیری از ترکیبات بین فلزی ناخواسته در موضع مرکزی می بایست در مرحله همگن

سازی غلظت MPD در موضع مرکزی اتصال تا مقادیر کمتر از حد حلالیت MPD در فلز پایه در دمای اتاق ($C\alpha_0$) کاهش یابد .

۴ - مقایسه فرایندهای پیونددهی نفوذی ، TLP و لحیم کاری:

در جدول زیر مقایسه فرایند پیونددهی TLP با فرایندهای لحیم کاری و پیونددهی نفوذی ارائه شده است . همانگونه که در این جدول نشان داده شده است ، فرایند اتصال دهی TLP دربردارنده مزایای هر دو روش اتصال دهی نفوذی و لحیم کاری می باشد . برخلاف پیونددهی نفوذی که برای ایجاد سطح تماس به سطوح پیونددهی با کیفیت بالای سطحی و فشار اعمالی زیاد نیاز است ، در فرایند اتصال دهی TLP ، فاز مذاب ایجاد شده در موضع اتصال موجب ترشوندگی سطوح تماس و فعال شدن نفوذ بین موضع اتصال و فلز پایه می-شود ، بعلاوه بدلیل تشکیل فاز مذاب در موضع اتصال TLP ، حضور اکسیدهای سطحی نیز تا حدودی مجاز می باشد . برخلاف انجماد فاز مذاب حین سرد شدن از دمای لحیم کاری ، انجماد همدمای فاز مذاب در فرایند اتصال دهی TLP مانع از تشکیل ترکیبات بین فلزی ناخواسته در موضع مرکزی اتصال می شود .

لحیم کاری	TLP	پیونددهی نفوذی	
متوسط	بالا	بالا	دمای پیونددهی
کمتر از آلیاژ پایه	مشابه آلیاژ پایه	مشابه آلیاژ پایه	استحکام پیوند
کم	زیاد	زیاد	مدت زمان پیونددهی
متوسط	متوسط	زیاد	کیفیت سطوح تماس
پایین	پایین	بالا	فشار اعمالی
متنوع	متنوع	ساده	هندسه قطعه
بله	خیر	خیر	استفاده از فلاکس
مشابه فلز برکن	مشابه آلیاژ پایه	مشابه آلیاژ پایه	نقطه ذوب مجدد اتصال
مشابه فلز برکن	مشابه آلیاژ پایه	مشابه آلیاژ پایه	مقاومت به خوردگی
زیاد	اندک	اندک	امکان تشکیل فازهای ناخواسته در اتصال

جدول مقایسه فرایند TLP با لحیم کاری و پیونددهی نفوذی

۵ - عوامل مؤثر در فرایند اتصال دهی TLP:

۵-۱- دما و زمان پیونددهی :

محدوده دمای پیونددهی TLP توسط لیکویدوس لایه واسط و دمای ذوب موضعی و یا سالیدوس آلیاژ پایه تعیین می شود. مدت زمان نگهداری نمونه ها در دمای پیونددهی بر حسب مدت زمان لازم برای تکمیل انجماد همدمما مشخص می شود. انتخاب مدت زمان و دمای پیونددهی، بستگی به خواص موردنظر از اتصال و تأثیر سیکل پیونددهی بر خواص فلز پایه دارد. در مواردی مانند سوپرآلیاژها که انتظار می رود خواص موضع اتصال مشابه خواص فلز پایه باشد دمای اتصال بالا (بالتر از 1150°C) و در زمان های طولانی (۲-۸ ساعت) صورت می گیرد، مشروط بر اینکه سیکل عملیات حرارتی تأثیر مخربی بر فلز پایه نداشته باشد. بعنوان مثال NUS و همکارانش گزارش نمودند با افزایش زمان و دمای پیونددهی، بعلت پدیده رشد دانه ها در آلیاژ پایه استحکام برشی Mg پیوند داده شده با استفاده از لایه واسط Al کاهش می یابد. نظر به بالابودن دمای پیونددهی، برای جلوگیری از اکسیداسیون آلیاژ پایه و بخصوص فاز مذاب تشکیل شده در موضع اتصال می بایست فرایند پیونددهی در کوره خلأ یا اتمسفر محافظ انجام پذیرد.

۵-۲- کیفیت سطحی سطوح تماس :

میزان ترشوندگی سطوح تماس آلیاژ پایه به آلودگی ها ولایه های اکسیدی تشکیل شده بر سطح فلز پایه و لایه واسط بستگی دارد. در صورت تشکیل و پایدار باقی بودن ولایه های اکسیدی بر سطوح تماس پیونددهی، فاکتورهای زیر می تواند کارایی پیونددهی TLP را تحت تأثیر قرار دهد.

I) ایجاد مانع در برابر پخش شدن فاز مذاب در موضع اتصال

II) جلوگیری از نفوذ در هم بین فاز مذاب و فاز جامد مجاور در نتیجه به دام افتادن لایه های اکسیدی در فصل مشترک S/L

III) تغییرات انرژی سطحی یا واکنش های سطحی

Zhuang و Lugscheder گزارش نمودند حین اتصال دهی TLP فولاد زنگ نزن آستنیتی دوفازی در خلأ و در دمای بالا (بیشتر از 950°C) تبخیر لایه های اکسید سطحی موجب اکسیدزدایی سطوح آلیاژ پایه می شود. در اغلب موارد پیونددهی، اکسیدزدایی کامل لایه های اکسیدی رخ نمی دهد. مطالعات برخی از محققین آشکار نمود که در این حالت مکانیزم پخش شدن مذاب لایه واسط بر سطوح تماس حاوی اکسیدهای سطحی، نقب زدن و بلند نمودن لایه های اکسیدی از سطح زیرلایه توسط فاز مذاب می باشد.

فرایند نقب زدن در مواردی ممکن می باشد که انرژی فصل مشترک زیرلایه اکسید سطحی بیشتر از مجموع انرژی های بین زیرلایه / مذاب و مذاب / اکسید سطحی باشد . فرایند نقب زدن شامل دو مرحله مجزای شروع و توسعه نقب زدن می باشد . در مرحله شروع نقب زدن ، مذاب وارد فصل مشترک آلیاژ پایه / اکسید سطحی می شود . مکانیزم های مختلفی برای این مرحله ارائه شده است . بعنوان مثال Brooker و همکارانش پیشنهاد دادند که شروع نقب زدن توسط نفوذ مذاب از عیوب موجود در لایه اکسید به سطح زیرلایه می باشد . Cohen و همکارانش شکسته شدن پیوستگی لایه اکسیدی در اثر اندرکنش های بین لایه اکسیدی و زیرلایه را عامل شروع نقب زدن بیان نمودند . Gale و Wallach گزارش نمودند در مجموعه Ni/ Ni -B-Si/ Ni تغییرات حجمی ایجاد شده ، حین ذوب شدن لایه واسط موجب شکسته شدن اکسید سطحی تشکیل شده بر لایه واسط پایه نیکلی تشکیل می شود . دو مکانیزم برای مرحله دوم نقب زدن (توسعه و پخش مذاب بر سطح تماس آلیاژ پایه) ارائه شده است .

(I) حل شدن فصل مشترک اکسید/ زیرلایه در مذاب لایه واسط

(II) شکسته شدن مکانیکی جاذبه مولکولی اکسیدهای سطحی

Wall و milner گزارش نمودند با افزایش حلالیت متقابل زیرلایه و لایه واسط ، مرحله دوم نقب زدن افزایش می یابد .

۵ - ۳ - لایه واسط:

لازمه ایجاد یک اتصال TLP بدون عیب و قابل قبول ، انتخاب صحیح لایه واسط و یا آلیاژ پرکن می باشد . انتخاب نادرست لایه واسط باعث ناکارآمدی فاکتورهای مؤثر پیونددهی از قبیل دمای پیونددهی ، سیکل گرمایش ، مدت زمان پیونددهی و غیره در ایجاد یک اتصال کارآمد می باشد . روش های مختلفی برای ایجاد لایه واسط در منابع ارائه شده است . که از مهم ترین آن ها می توان به موارد زیر اشاره کرد :

ایجاد مستقیم لایه واسط به وسیله ی تکنیک های مختلفی از قبیل نورد ، انجماد سریع ، متالورژی پودر ، آبکاری و غیره برای لایه واسط قابل استفاده می باشد (اصلاح سطوح موردنظر برای پیونددهی و تشکیل لایه واسط).

از مهم ترین ویژگی های ترکیب شیمیایی لایه واسط می توان به مواردی از قبیل : دارا بودن حداقل یک عنصر کاهش دهنده نقطه ذوب (MDP)، ضریب نفوذ بالای MPD در دمای پیونددهی ، عدم تأثیر مخرب عناصر موجود در لایه واسط بر خواص فیزیکی و شیمیایی فلز پایه ، امکان ایجاد ریزساختار مشابه با فلز پایه

در موضع لایه واسط ، پایین تر بودن نقطه ذوب لایه واسط از درجه حرارت ذوب و دمای افت خواص فلز پایه و عدم تشکیل فازهای مخرب در فلز پایه اشاره نمود .

برای جلوگیری از تشکیل فازهای ناخواسته ، تخلخل و یا طولانی شدن مدت زمان پیونددهی ، برخی عناصر تعمداً از ترکیب شیمیایی لایه واسط می شوند . بعنوان مثال عناصری از قبیل Al، Ti، Mn و Cd علی‌رغم کاهش نقطه ذوب ، نبایست به ترکیب شیمیایی لایه واسط مورد استفاده برای اتصال دهی سوپراآلیاژها اضافه شوند. بررسی های Duvall و همکارانش در مورد اتصال TLP سوپراآلیاژ dUitem-700 نشان داد که استفاده از Ni-15Cr-10Ti-5Si بعنوان لایه واسط به جای Ni-15Cr-15Co-15Mo-2.5B نشان داد که منجر به تشکیل ترکیبات بین فلزی ناخواسته و تخلخل در موضع اتصال می شود . Khan و همکارانش گزارش نمودند استفاده از لایه واسط مس به جای Si-B-Fe برای اتصال فولادزنگ نزن دوفازی منجر به افزایش مقاومت به خوردگی موضع اتصال منتهی می شود . به طور کلی در اغلب موارد استفاده از فرایند اتصال دهی TLP ، حداکثر ضخامت لایه واسط در حدود $50\ \mu\text{m}$ می باشد . استفاده از لایه های ضخیم تر موجب طولانی تر شدن مدت زمان لازم برای تکمیل انجماد همدمای می شود . Idown و همکارانش گزارش نمودند که با افزایش ضخامت لایه واسط از $50\ \mu\text{m}$ تا $100\ \mu\text{m}$ مدت زمان تکمیل انجماد همدمای در TLP مجموعه In738LC/ Ni-15B/ In738LC حین اتصال دهی TLP از 2 hr تا 8 hr افزایش می یابد .

در مواردیکه در اتصال TLP درز اتصال بیش از $50\ \mu\text{m}$ مورد نیاز باشد از لایه واسط کامپوزیتی از یک جزء با نقطه ذوب پایین و یک جزء با نقطه ذوب بالا تشکیل شده است ، استفاده می کنیم . جزء اول در دمای پیونددهی ذوب شده و موجب پرشدن درز اتصال می شود و جزء دوم به صورت جامد باقی می ماند . حضور جزء با نقطه ذوب بالا از دو جنبه باعث کاهش مدت زمان لازم برای تکمیل انجماد همدمای می شود.

الف : کاهش مقدار نفوذ لازم برای تکمیل انجماد همدمای (بدلیل کاهش مقدار MDP در موضع اتصال)

ب : کاهش مسیر جزء نفوذکننده (بدلیل افزایش مساحت فصل مشترک S/L)

تحقیقات Zok و BoSCo در مورد پیونددهی فلز پایه مسی با استفاده از لایه واسط از جنس قلع نشان داد با افزایش ضخامت لایه واسط از $10\ \mu\text{m}$ تا $20\ \mu\text{m}$ از تشکیل تخلخل در موضع اتصال می توان جلوگیری کرد .

۵-۴- اتمسفر محافظ:

این فرایند اتصال همواره تحت شرایط اتمسفر محافظ انجام می گیرد تا از اکسیداسیون لایه واسطه و یا سطوح متصل شونده و همچنین از آلوده شدن آن ها جلوگیری شود. این اتمسفر محافظ می تواند یک گاز خنثی و یا اتمسفر خلا باشد که انتخاب نوع مناسب اتمسفر به جنس قطعات و لایه واسطه و همچنین حساسیت کار بستگی دارد.

۵-۵- سرعت گرم و سرد شدن اتصال:

سرعت گرم شدن قبل از اتصال دهی و همچنین سرعت سرد شدن پس از اتصال نیز بر خواص اتصال تاثیر می گذارد، چون شرایط نفوذ متقابل تحت تاثیر قرار می گیرد. در اتصال نیکل با لایه واسطه های P11-Ni و P10-Cr14-Ni مشاهده شده است که هنگامی که ضخامت لایه واسطه زیاد است ($200\mu\text{m}$) سرعت گرم شدن آهسته تر موجب افزایش میزان حل شدن لایه واسطه می شود. در ضخامت های کم نیز ($5\mu\text{m}$) این آهسته گرم شدن موجب رخ دادن پدیده انجماد در حین گرم شدن از دمای T_E تا T_B می شود.

۶ - خواص مکانیکی اتصال TLP:

خواص مکانیکی یک نمونه اتصال TLP داده شده ، تابعی از ریزساختار توسعه یافته در موضع اتصال می- باشد . تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد و یا پایدار باقی ماندن تخلخل در موضع اتصال تأثیرات ناخواسته مخربی بر استحکام و چقرمگی ایجاد شده دارد. تشکیل ترکیبات بین فلزی با سختی بالا و مورفولوژی پیوسته در موضع اتصال TLP موجب ایجاد یک مسیر کم مقاومت در برابر تشکیل و اشاعه ترک در امتداد موضع اتصال و در نتیجه افت استحکام پیوند می شود .

ojo و همکارانش گزارش نمودند استفاده از آلیاژ پرکن Amdry -DF3 بجای NioCr-150 موجب تغییر فرم ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در موضع مرکزی اتصال TLP از فرم پیوسته به اجزاء مجزا و کاهش تأثیر مخرب این فازهای بین فلزی بر خواص مکانیکی پیوند ، حاصل می شود . بررسی های Li و همکارانش دلالت بر افزایش استحکام برشی موضع پیوند TLP کامپوزیت AL / AL_2O_3 با کاهش ضخامت لایه واسطه داشت . این محققین گزارش نمودند با افزایش ضخامت لایه واسطه بدلیل افزایش کسر حجمی فاز مذاب و تشدید جدایش ذرات تقویت کننده در موضع پیوند ، استحکام برشی پیوند حاصله کاهش می یابد . بررسی های Ekrami و همکارانش دلالت بر اهمیت اتمسفر پیونددهی بر استحکام برشی اتصال TLP دارد . بررسی های این محققین نشان داد برخلاف پیونددهی تحت اتمسفر گاز محافظ آرگون ، پیونددهی در کوره خلا مانع از تشکیل تخلخل در موضع اتصال شده و در نتیجه استحکام برشی پیوند افزایش می یابد .

عملیات حرارتی همگن سازی بعد از پیونددهی با حذف و یا کاهش ترکیبات بین فلزی ناخواسته از ناحیه اتصال TLP، تأثیر بسزایی در بر توسعه یک اتصال ایده ال و مشابه با آلیاژ فلز پایه دارد. Miri گزارش نمود عملیات همگن سازی در دمای 1150°C و به مدت ۴ ساعت موجب افزایش استحکام برشی اتصال ناهمجنس In738LC-SS304 به میزان قابل توجه می شود. بررسی های edoyTo و Endo نشان داد با کاهش ترکیبات بین فلزی غنی از بور در ناحیه اتصال TLP، استحکام خزشی پیوند حاصله افزایش می یابد.

۷ - کاربردهای فرایند اتصال دهی TLP:

ویژگی های فرایند پیونددهی TLP باعث توسعه استفاده از این فرایند بعنوان یک روش جایگزین برای جوشکاری ذوبی و پروسه های پیونددهی حالت جامد و لحیم کاری شده است. بررسی ها و تحقیقات زیادی در مورد بکارگیری فرایند پیونددهی TLP برای اتصال دهی و تعمیر گروه وسیعی از مواد با قابلیت جوشپذیری اندک ارائه شده است.

در این قسمت برخی از مطالعات بصورت مختصر مورد بررسی قرار می گیرد.

۷-۱- اتصال دهی TLP آلیاژها و کامپوزیت های پایه آلومینیوم:

تشکیل اکسیدهای سطحی پایدار بر سطوح تماس آلیاژهای Al موجب افت کارایی فرایند اتصال دهی نفوذی برای پیونددهی این گروه از مواد شده است. تشکیل فاز مذاب در فرایند اتصال دهی TLP باعث شکسته شدن اکسیدهای سطحی و امکان پذیر شدن اتصال دهی این گروه از مواد می گردد. Shirzadi و Wallach به منظور کاهش تأثیر نامطلوب اکسیدهای به تله افتاده در موضع اتصال بر استحکام پیوند، عملیات اتصال دهی مایع نافذ گذرا تحت گرادیان حرارتی (TG-TLP) را توسعه داده اند. تغییر فصل مشترک اتصال از مسطح به سینوسی در نمونه پیوند داده شده توسط فرایند TG-TLP موجب افزایش سطح تماس دو آلیاژ پایه در موضع اتصال و افزایش استحکام پیوند به میزان قابل توجهی می شود. یکی از مشکلات اساسی حین اتصال دهی کامپوزیت های آلومینیم حاوی ذرات ثانویه SiC، مسئله جدایش ذرات SiC در موضع اتصال می باشد. ewksA و همکارانش گزارش نمودند با استفاده از لایه واسط نیکلی به جای لایه واسط مسی در اتصال کامپوزیت Al/PSiC می توان از جدایش ذرات SiC جلوگیری نمود. آن ها ضریب نفوذ بالای Ni در Al و در نتیجه مدت زمان کوتاه انجماد هدا را عامل عدم جدایش گزارش نمودند.

۷-۲- اتصال دهی ترکیبات بین فلزی و سرامیک ها:

قابلیت ترشوندگی اندک ترکیبات بین فلزی بدلیل تشکیل اکسیدهای سطحی پایدار بر سطوح تماس آن ها و بهمراه پیچیدگی های شبکه ای این گروه از مواد ، آن ها را بعنوان مواد اتصال ناپذیر مطرح نموده است . همچنین تنش های حرارتی ایجادشده حین جوشکاری ذوبی و اصطحاکای ترکیبات بین فلزی موجب ترکیدگی و شکست آن ها می شود . اما با استفاده از فرایند اتصال دهی TLP بعلت تشکیل ذوب در موضع اتصال و همدمای بودن قسمتهای مختلف قطعه حین اتصال دهی ، موفقیت‌های چشمگیری در اتصال دهی ترکیبات بین فلزی و حتی اتصال آن ها به آلیاژهای فلزی بدست آمده است .

۷-۳- اتصال دهی آلیاژهای حافظه دار:

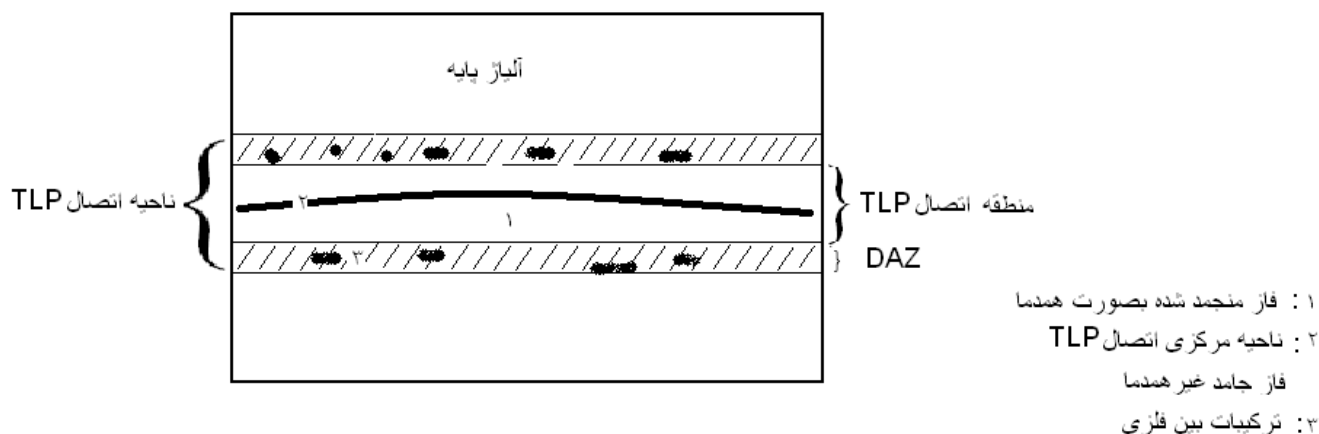
اتصال دهی آلیاژهای حافظه دار به دلیل حساسیت زیاد خواص حافظه داری به ریزساختار ، مسأله چالش بر انگیزی می باشد . مسائلی از قبیل تشکیل ساختارهای دندریتی ، ترکیبات بین فلزی ، اکسید و به طور کلی کاهش خواص این گروه از مواد موجب عدم استفاده از جوشکاری در مورد این گروه از مواد شده است . کنترل دقیق سیکل حرارتی و توسعه ریزساختار مشابه با آلیاژ پایه در موضع اتصال TLP موجب توجه به این تکنیک پیونددهی در مورد آلیاژهای حافظه دار شده است . بررسی های انجام شده حاکی از قابلیت حافظه داری مطلوب موضع اتصال TLP می باشد.

۷-۴- اتصال دهی و تعمیر سوپرآلیاژها:

از مهم ترین ویژگی های فیزیکی فلز پایه برای حصول خواص قابل قبول در موضع اتصال TLP می توان به نقطه ذوب بالا ، قابلیت نفوذدهی سریع عنصر PMD از لایه واسط و حفظ استحکام در دمای بالا اشاره نمود . با توجه به خصوصیات فیزیکی مذکور و در نظرگرفتن ویژگی های فیزیکی سوپرآلیاژ ها می توان بیان نمود سوپرآلیاژها بهترین کاندیدا برای پیونددهی توسط روش TLP می باشند . پایداری ذاتی این گروه از مواد تا نزدیکی نقطه ذوب علاوه بر حفظ خواص حین فرایند TLP به نفوذ سریع تر PMD و در نتیجه کوتاه شدن مدت زمان پیونددهی نیز منجر می شود .

مهم ترین کاربرد فرایند اتصال دهی TLP در صنایع مربوط به ریخته گری سوپرآلیاژها می باشد . بدین صورت که با تقسیم قطعات بزرگ یا پیچیده به چند تکه ریخته گری و سپس اتصال دهی این اجزا توسط روش TLP بازدهی ریخته گری به میزان قابل توجهی افزایش می-یابد . بعنوان مثال شرکت Pratt and whitney با استفاده از روش پیوند دهی TLP ، اقدام به ساخت خوشه های پره توربین از پره های توربین ریخته گری شده به صورت مجزا نمود . لازم به ذکر است جنس پره های توربین مذکور In713 بود و

راندمان پروسه پیونددهی بالای گزارش شد . یا می توان به شرکت Siemns westinghous اشاره نمود که برای اتصال اجزاء ایرو دینامیکی از فرایند اتصال دهی TLP استفاده نمود . علاوه بر کاربرد فرایند اتصال دهی TLP در فرایندهای تولیدی ، تکنیک پیونددهی TLP یک تکنولوژی برای تعمیر و بازسازی قطعات سوپرآلیاژی آسیب دیده نیز می باشد . شرایط سخت کاری پره های توربین موجب ترکیدگی و ایجاد عیوبی از این قبیل در قطعات مذکور می شود .



تغییرات ریزساختاری در ناحیه اتصال TLP

الف : سوپرآلیاژ پایه : چندان دستخوش تغییرات ریزساختاری و یا نفوذ عناصر آلیاژی موجود در لایه واسط واقع نمی شود .

ب: موضع اتصال TLP: موضع حاصل از ذوب لایه واسط و انحلال آلیاژ پایه در آن

ج : ناحیه متأثر از نفوذ (DAZ) : آلیاژ پایه مجاور موضع اتصال که بشدت تحت تأثیر نفوذ عناصر آلیاژی موجود در لایه واسط واقع می شود .

د: ناحیه اتصال TLP : مجموع دو ناحیه DAZ و موضع اتصال TLP

ه: ناحیه مرکزی اتصال : ناحیه واقع در مرکز اتصال که در آخرین مرحله از انجماد همدمما شکل می گیرد .

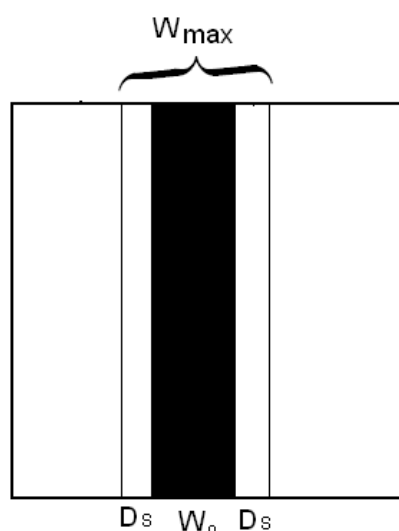
و: فاز جامد همدمما : فاز جامد تشکیل شده در موضع اتصال TLP توسط استتاله انجماد همدمما

ز: فاز جامد غیرهمدمما : فاز جامد تشکیل شده در موضع اتصال TLP توسط استتاله انجماد غیرهمدمما

۷-۵- ذوب لایه واسط :

افزایش دمای پیونددهی از درجه حرارت لیکویدوس لایه اسط منجر به ذوب لایه واسط ، تشکیل فاز مذاب در وضع اتصال و ترشدن کامل سطوح تماس آلیاژ پایه می شود . بلافاصله بعد از ذوب لایه واسط ، مذاب تشکیل شده در موضع اتصال غنی از عنصر کاهش دهنده نقطه ذوب می باشد . برای رقیق شدن غلظت عنصر آلیاژی مذکور در فاز مذاب ، بخش هایی از آلیاژ پایه در فاز مذاب حل شده و باعث عریض شدن پهنای فاز مذاب می شود . انحلال بخش هایی از آلیاژ و توسعه فاز مذاب ، تا ایجاد تعادل موضعی در فصل مشترک بین فاز مذاب و فاز جامد (L/ S) ادامه یافته و باعث تشکیل فاز مذابی می شود که از لحاظ ترکیب شیمیایی در موضع اتصال ، همگن است . توسعه فاز مذاب توسط نفوذ عنصر آلیاژ پایه در فاز مذاب کنترل می شود . بنابراین مدت زمان لازم برای تکمیل این مرحله نسبتاً کوتاه (در حدود چند ثانیه) می باشد . نظر به انحلال آلیاژ پایه در دو سطح تماس ، نصف اختلاف بین حداکثر پهنای موضع اتصال WXAM و ضخامت اولیه لایه واسط W_0 بعنوان معیاری برای انحلال آلیاژ پایه در فاز مذاب D_S لحاظ می شود .

$$D_S = \frac{W_{max} - W_0}{2}$$



با افزایش دمای پیونددهی ، میزان انحلال آلیاژ پایه در موضع اتصال افزایش می یابد و از یک دمایی به بعد تفکیک مرز بین موضع اتصال از آلیاژ پایه ممکن نمی باشد .

با افزایش دمای پیونددهی به دلیل کاهش حد حلالیت DPM در فاز مذاب، بخشهای بیشتری از آلیاژ پایه می بایست در فاز مذاب حل شده تا تعادل موضعی در فصل مشترک L/ S توسعه یابد .

ساختار فصل مشترک L/S از نوع سلولی است. غیرصفحه ای بودن فصل مشترک L/S حین اتصال TLP توسط Ikenchi و همکارانش نیز گزارش شده است. ایجاد فصل مشترک سلولی در موضع اتصال TLP را نمی توان همانند فصل مشترک سلولی در انجماد سلولی، تنها به انباشته شدن عناصر آلیاژی و گرادیان دمایی در امتداد فصل مشترک مذاب و جامد نسبت داد (هرچند این عامل در نمونه های سردشده قبل از تکمیل انجماد همدمای مؤثر می باشد) زیرا ماهیت تعادلی انجماد همدمای مانع از پس زده شدن و تجمع عناصر آلیاژی در فاز مذاب جلوی فصل مشترک می شود. مدل Macdonal و Eager برای توسعه فصل مشترک L/S سلولی حین اتصال TLP جالب توجه است. بر اساس این مدل انحلال جزئی برخی دانه های آلیاژی پایه موجب ایجاد مناطقی با انحنا زیاد در موضع اتصال می شود. افزایش انرژی آزاد سیستم در موضع انحنا موجب افزایش نفوذ اتمی برای کاهش انحنا و در نتیجه تبدیل ساختار فصل مشترک به سلولی می شود.

۸- تغییرات ریزساختاری موضع اتصال حین انجماد غیرهمدمما:

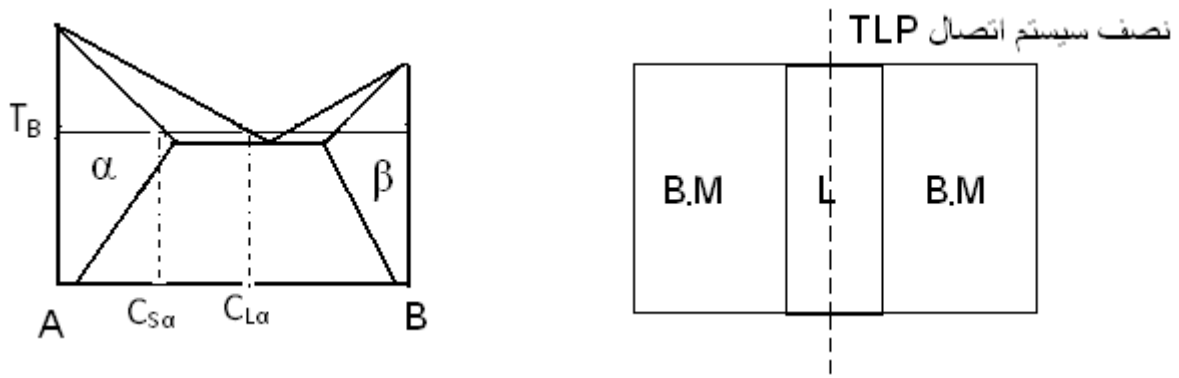
سرد نمودن نمونه ها قبل از تکمیل انجماد همدمما ، موجب انجماد غیرهمدممای مذاب باقی مانده در موضع مرکزی اتصال می شود . جدایش شدید عناصر آلیاژی حین انجماد غیرهمدمما موجب تشکیل ترکیبات بین فلزی ناخواسته در موضع مرکزی اتصال می شود .

۸-۱- انجماد همدمای فاز مذاب و تغییرات ریزساختاری مربوطه:

بعد از تکمیل مرحله انحلال و توسعه فاز مذاب ، نفوذدرهم عناصر آلیاژی بین آلیاژ پایه و فاز مذاب موجب افزایش نقطه ذوب فاز مذاب و شروع انجماد همدمای فاز مذاب می شود . با نفوذ پیوسته عنصر کاهش دهنده نقطه ذوب از فاز مذاب به آلیاژ پایه ، حجم مذابی که می تواند در تعادل با فاز جامد واقع شود ، کاهش می یابد که موجب پیشرفت انجماد همدمای از سطح تماس آلیاژ به سمت ناحیه مرکزی اتصال می شود . انجماد همدمای فاز مذاب با تشکیل محلول جامد غنی از آلیاژ پایه بر سطوح تماس آلیاژ پایه شروع و به اپیتکسیال فاز جامد همدمما می شود. عبارت دیگر سد انرژی مقابل جوانه زنی صفر بوده و تنها توسط مرتب شدن اتم های فاز مذاب بر سطوح تماس آلیاژ پایه پیشرفت می کند . با افزایش مدت زمان پیونددهی ، مورفولوژی فازهای بین فلزی تشکیل شده در موضع مرکزی اتصال از فرم پیوسته به جزایر مجزا و در نهایت فاز جامد زمینه آلیاژ پایه در تمام موضع اتصال تشکیل می گردد . برخلاف انجماد غیرهمدمای فاز مذاب ، شرایط تعادلی حاکم بر پیشرفت انجماد همدمما مانع از پس زده شدن عناصر آلیاژی در فصل مشترک L/S و تشکیل فازهای بین فلزی ناخواسته در موضع اتصال TLP حین انجماد همدمما می شود . سمت موضع مرکزی اتصال پیشروی می نماید . ترشوندگی نسبتاً کامل سطوح تماس آلیاژ پایه توسط فاز مذاب باعث کاهش قابل ملاحظه فاکتور شکل و در نتیجه رشد می شود.

۸-۲- بررسی سینیتیک انجماد همدمما و مدل های مربوطه:

یکی از پارامترهای مهم اتصال TLP بخصوص در کاربردهای صنعتی این فرایند ، مدت زمان نگهداری نمونه ها در دمای پیونددهی به منظور تکمیل انجماد همدمما (t_{is}) و جلوگیری از ترکیبات ناخواسته در موضع اتصال TLP می باشد. t_{is} تابعی از نفوذپذیری جزء حل شده در آلیاژ پایه و ارتباط فازی بین آلیاژ پایه و لایه واسط می باشد . بدلیل تقارن مجموعه پیونددهی ، معمولاً نصف این مجموعه مدل شده و روابط برای کل آن تعمیم داده می شود .



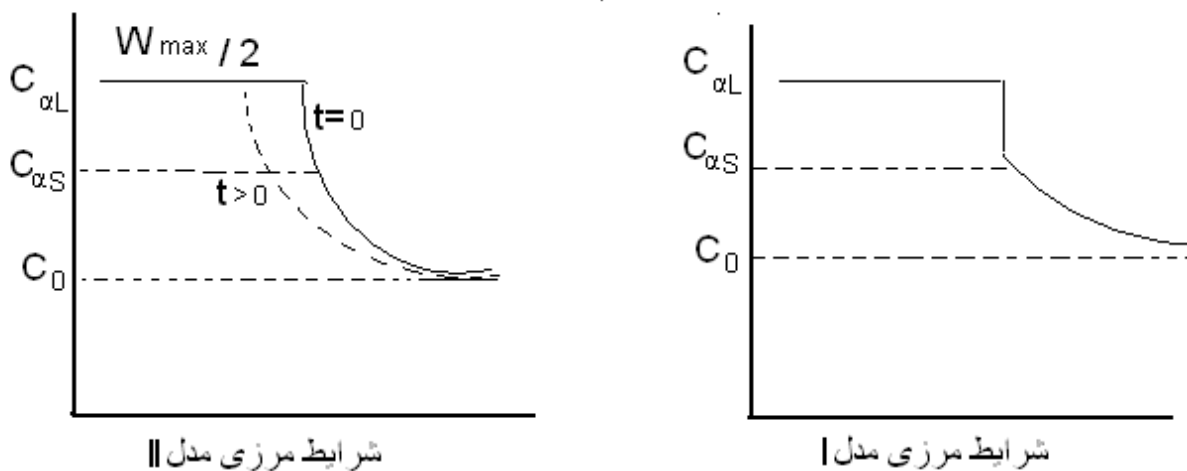
فرضه‌های در نظر گرفته شده برای مدل سازی انجماد همدمما

(I) صرف نظر از جریان همرفتی در مذاب (فرایند TLP یک مسئله نفوذ صرف در نظر گرفته می شود)

(II) تعادل موضعی در فصل مشترک مذاب/ جامد (L/S)

(III) مستقل بودن ضریب نفوذ از ترکیب شیمیایی

(VI) عدم تغییر حجم مولی جزء حل شده حین اتصال $\alpha \alpha \alpha$



۸-۲-۱- راه حل های تحلیلی برای تخمین t_{is} :

مدل I) در این مدل فصل مشترک L/S حین انجماد همدمما بدون حرکت فرض شده است و سیستم پیونددهی یک سیستم نیمه بی نهایت (آلیاژ پایه) با غلظت سطحی MPD ثابت در نظر گرفته شده است. عبارت دیگر در این مدل غلظت MPD در سطح فاز جامد (آلیاژ پایه) حین انجماد همدمما مقدار ثابت $C_{\alpha S}$ لحاظ می شود. حل قانون دوم نفوذ برای توصیف توزیع عنصر حل شده در یک جامد نیمه بی نهایت $C(x, t)$ با غلظت اولیه C_0 و غلظت سطحی $C_{\alpha S}$ به صورت تابع خطای زیر می باشد.

$$\frac{C(X,t)-C_{\alpha S}}{C_0-C_{\alpha S}} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right) \Rightarrow C(X,t) = C_{\alpha S} + (C_0 - C_{\alpha S}) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right)$$

که D ضریب نفوذ عنصر حل شده در آلیاژ پایه ، t مدت زمان پیونددهی ، x فاصله از فصل مشترک L/S در فاز جامد و بقیه ثابت نیز در شکل مشخص شده اند . براساس قانون اول نفوذ ، در رابطه فوق مقدار عنصر حل شده (M) که در مدت زمان t از فصل مشترک L/S به آلیاژ پایه نفوذ می کند عبارت است از :

$$M = \int_0^t D \frac{dc}{dx} I_{x=0} dt = 2(C_{\alpha S} - C_0) \sqrt{\frac{Dt}{\pi}}$$

با فرض عدم نفوذ عنصر MPD به آلیاژ پایه حین مراحل حرارت دادن و انحلال لایه واسط ، مقدار عنصر MPD که حین انجماد همدمما به آلیاژ پایه نفوذ می کند معادل مقدار MPD اولیه موجود در لایه واسط است :

$$\frac{C_1 W_0}{2} = 2(C_{\alpha S} - C_0) \sqrt{\frac{Dt_{LS}}{\pi}} \Rightarrow t_{LS} = \frac{\pi}{16D} \left(\frac{C_1 W_0}{C_{\alpha S} - C_0}\right)^2$$

که در رابطه فوق W_0 و C_1 به ترتیب پهنا و غلظت اولیه PMD مربوط به لایه واسط می باشد .

مدل (II) در این مدل آلیاژ پایه جامد نیمه بی نهایت و فصل مشترک L/S حین انجماد همدمما ، متحرک در نظر گرفته می شوند . در شکل بالا شرایط اولیه و مرزی حاکم بر ۲ فاز مذاب و جامد نشان داده شده است . با فرض اینکه پروفیل غلظتی عنصر حل شده در فاز جامد به صورت کلی تابع خطا باشد داریم :

$$C(x,t) = a_1 + a_2 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

a_1 و a_2 در معادله ی فوق ثابت بوده و توسط شرایط مرزی تعیین می شوند . طبق این معادله وقتی x به سمت بی نهایت میل می کند خواهیم داشت :

$$C(\infty, t) = a_1 + a_2 = C_0$$

و در موضع فصل مشترک: (x و $X(t)$)

$$C(x,t) = a_1 + a_2 \operatorname{erf}\left(\frac{x(t)}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

از آنجائیکه حین انجماد همدمما معادله فوق می بایست برای تمام مقادیر t برقرار باشد ، عبارت داخل پرانتز می بایست مقدار ثابتی باشد . یعنی :

$$\frac{x(t)}{2\sqrt{Dt}} = \Rightarrow x(t) = 2K\sqrt{Dt}$$

که K یک مقدار ثابت می باشد. تعادل جرم در فصل مشترک L/S معادله زیر را نتیجه می دهد:

$$(C_{Al}-C_{\alpha S}) \frac{dx(t)}{dt} = (D \frac{dC(x,t)}{d(x)}) \quad x=x(t)$$

از حل معادلات فوق، مقدار K بصورت زیر قابل محاسبه می باشد:

$$K = \frac{(C_{\alpha S}-C_0) \exp(-k^2)}{C_{\alpha L}-C_{\alpha S} \sqrt{\pi}(1+\operatorname{erf}(k))}$$

با حرکت فصل مشترک L/S به اندازه $W_{max}/2$ انجماد همدم کامل می شود. پس معادله به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$T_{IS} = \frac{W_{max}}{16k^2D}$$

مدل (III) در این مدل مجموعه پیونددهی یک سیستم پیوسته متشکل از یک لایه واسط با ضخامت $2W$ واقع شده بین دو جامد بینهایت در نظر گرفته می شود. حل معادله دوم فیک برای نفوذ ناپایدار عنصر آلیاژی از یک منبع با ضخامت اولیه چند $2W$ (در محدوده مسافت نفوذ \sqrt{Dt}) به جامد بی نهایت بصورت زیر می باشد:

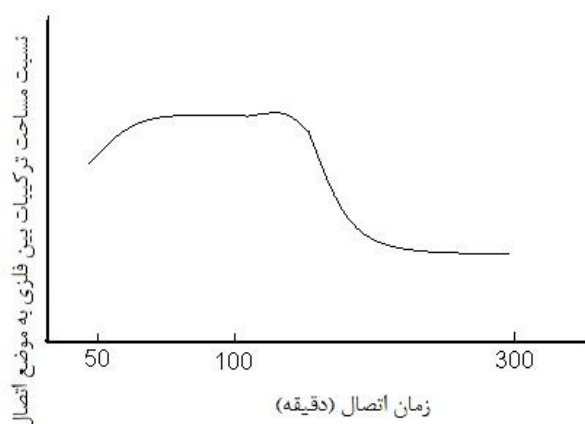
$$C(x,t) = C_0 + 0.5(C_1-C_0) \left\{ \operatorname{erf} \frac{(w-x)}{2\sqrt{Dt}} + \operatorname{erf} \frac{(w+x)}{2\sqrt{Dt}} \right\}$$

که در معادله فوق $C(x,t)$ غلظت جزء حل شده در جزء نیمه بی نهایت به فاصله از مرکز لایه واسط و بعد از زمان t می باشد. از آنجائیکه با کاهش غلظت عنصر MPD در مرکز لایه واسط ($x=0$) به $C_{\alpha S}$ ، انجماد همدم کامل می، رابطه فوق به صورت زیر برای محاسبه t_{IS} بازنویسی می شود:

$$C_{As} = C_0 + (C_1-C_0) \operatorname{erf} \left(\frac{W}{4\sqrt{Dt_{IS}}} \right)$$

بدلیل پیچیدگی های زیاد سیستم های چند جزئی با استفاده از ارتباط فازی دوتایی بین عنصر اصلی آلیاژ پایه و عنصر DPM لایه واسط و در نظرگرفتن روابط فوق t_{IS} در این سیستم ها تخمین زده می-شود. بررسی دقت مدل های ارائه شده در سیستم یکی از مهم ترین فاکتورهای مؤثر بر سینیتیک انجماد همدم، حضور مرزدانه ها در آلیاژ پایه چندبلوره می باشد. مرزدانه ها در دمای پیونددهی بعنوان مسیر نفوذ سریع مطرح نمی باشند. زیرا نقش مؤثر مرزدانه ها در نفوذ اتمی در دماهای کمتر از $0.7 T_m$ تا $0.8 T_m$ می باشد (دمای تعادلی ذوب در مقیاس کلونین است). تأثیر مرزدانه ها در افزایش سینیتیک انجماد همدم، بدلیل نفوذ مرزدانه ای فاز مذاب می باشد. نفوذ مرزدانه ای فاز مذاب موجب افزایش سطح تماس مذاب با جامد می شود که این موجب افزایش نرخ نفوذ به خارج عنصر DPM از فاز مذاب به جامد مجاور آن و

افزایش سینیتیک انجماد همدمای می شود. حضور اجزاء یوتکتیکی و بین فلزی در موضع مرکزی اتصال، دلالت بر عدم تکمیل انجماد همدمای دارد. بعبارت دیگر سرد کردن نمونه ها قبل از تکمیل انجماد همدمای موجب انجماد غیرهمدمای فاز مذاب باقی مانده در موضع مرکزی اتصال و تشکیل اجزا یوتکتیکی در این موضع می شود. در شکل زیر تاثیر مساحت ترکیبات بین فلزی به موضع اتصال و زمان اتصال نشان داده شده است.



۸-۳- مکانیزم تشکیل DAZ:

هرچند در اغلب مدل های ارائه شده برای فرایند اتصال دهی TLP فرض می شود که این فرایند پیونددهی از مراحل مجزا و متوالی تشکیل می شود بدین معنا که نفوذ عنصر DPM از فاز مذاب به فاز جامد بعد از ایجاد تعادل موضعی در فصل مشترک L/S صورت می گیرد. اما تحقیقات گروهی از محققین (۹) نشان داد فرایند اتصال TLP از مراحل مختلف و همزمان تشکیل شده است. بعبارت دیگر نفوذ عنصر DPM از لایه واسط به آلیاژ پایه همزمان با ذوب شدن لایه واسط و ایجاد تعادل موضعی در فصل مشترک L/S صورت می پذیرد. در این شرایط تجمع عنصر یا عناصر DPM به تشکیل ناحیه متأثر از نفوذ DAZ در آلیاژ پایه مجاور با فاز مذاب منجر می شود (قبل از ایجاد تعادل موضعی در فصل مشترک L/S). برای بررسی این ایده از حل همزمان دو معادله (i) نرخ انحلال فاز جامد در فاز مذاب و (ii) توزیع مجدد عنصر حل شونده در موضع اتصال و مناطق اطراف آن استفاده می شود.

نرخ انحلال یک فلز جامد در فاز مذاب بصورت زیر بیان می شود :

$$C = C_s [1 - \exp(-\frac{KAt}{V})]$$

که در معادله فوق C غلظت لحظه ای عنصر حل شونده در فاز مذاب ، C_s غلظت تعادلی عنصر حل شونده در فاز مذاب ، K ثابت نرخ انحلال ، V حجم فاز مذاب ، A مساحت فصل مشترک L/S و t مدت زمن نگه داری در دمای مورد بررسی می باشد . با در نظر گرفتن $V = A \times W$ بین W (پهنای مذاب) ، A و V می توان معادله را به فرم زیر بازنویسی کرد :

$$C = C_s [1 - \exp(-\frac{Kt}{W})]$$

۹- نتیجه گیری:

همانگونه که مورد بررسی قرار گرفت روش TLP به عنوان یک روش کارآمد برای مواد مختلف به ویژه موادی مثل سوپر آلیاژها (مهم ترین کاربرد فرایند اتصال دهی TLP در صنایع مربوط به ریخته گری سوپرآلیاژها می باشد) و سرامیکها که فرآیند اتصال آنها به دیگر روش ها با مشکلات زیادی می تواند انجام شود به سهولت قابل اجراست. فرایند اتصال دهی TLP دربردارنده مزایای هر دو روش اتصال دهی نفوذی و لحیم کاری می باشد . برخلاف پیونددهی نفوذی که برای ایجاد سطح تماس به سطوح پیونددهی با کیفیت بالای سطحی و فشار اعمالی زیاد نیاز است ، در فرایند اتصال دهی TLP ، فاز مذاب ایجاد شده در موضع اتصال موجب ترشوندگی سطوح تماس و فعال شدن نفوذ بین موضع اتصال و فلز پایه می-شود ، بعلاوه بدلیل تشکیل فاز مذاب در موضع اتصال TLP ، حضور اکسیدهای سطحی نیز تا حدودی مجاز می باشد اما از محدودیت های این روش می توان به زمانگیر بودن آن اشاره کرد.(جدول زیر)

Advantages	Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> • base metal properties at joint • no interface remains after bonding • self homogenizing • low joint pressure required • intermetallic formation can be avoided • minimum surface preparation • large and complex shapes bonded simultaneously 	<ul style="list-style-type: none"> • long bonding times (hours) • restricted to high temperatures, $T/T_m=0.6$ • fast diffusers required, preferably interstitial elements • rapid heatup required • close fit-up required • post bonding heat treatment for age hardening alloys is required

References:

1. R. Thambury, W. Wallace, J.A. Goldak, *Int. Met. Rev.* 28 (1983) 1–22.
2. L.E. Shoemaker, in: S.A. David (Ed.), *Trends in Welding Research*, American Society for Metals, Metal Park, OH, 1999, pp. 371–377.
3. J.D. Liu, T. Jin, Effect of transient liquid phase (TLP) bonding on the ductility of a Ni-base single crystal superalloy in a stress rupture test, *materials characterization*, 2006.
4. X.H. Yin, M.S. Li, Y.C. Zhou, Microstructure and mechanical strength of transient liquid phase bonded Ti3SiC2 joints using Al interlayer, *ECERS*, 2007.
5. Kavian O. Cooke, Tahir I. Khan, Gossett D. Oliver, Transient liquid phase diffusion bonding Al-6061 using nano-dispersed Ni coatings, *materials & design*, 2011.
6. Shirzadi, A. A. and Wallach, E. R., *Sci. Technol. Weld. Joining*, 1997, 2(3), 89.
7. Ekrami, A. and Khan, T.I., Transient liquid phase diffusion bonding of oxid dispersion strengthened alloy MA758, *Mater. Sci. tech.*, 15, P.946 (1999).
8. MacDonald, W. D. and Eagar, T. W., Transient liquid phase bonding. *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 1992, 22, 23–46.
9. Duvall, D. S., Owczarski, W. A. and Paulonis, D. F., TLP bonding: a new method for joining heat resistant alloys. *Weld. J.*, 1974, 53(4), 203–214.
10. Derby, B. and Wallach, E. R., Theoretical model for diffusion bonding. *Met. Sci. (UK)*, 1982, 16(1), 49–56.
11. ASM Handbook. Welding, brazing, and soldering. Materials Park, Ohio: ASM international; 1993.