# تاثیر حضور ذرات نانومتری اکسید تیتانیم روی استحکام پیوند ورق‌های آلومینیم در فرایند نورد اتصالی سرد (CRB)

محمدعلی سلطانی[*1]، روح‌الله جماعتی[2]، محمدرضا طرقی‌نژاد[3]

۱- عضو هیأت علمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، گروه مواد، اصفهان، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

[*] a.soltani47@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۶/۰۷، تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۰/۰۲)

## چکیده

در این پژوهش، فرایند نورد اتصالی سرد روی ورق‌های آلومینیم خالص تجاری (AA۱۰۵۰) در حضور و عدم حضور ذرات نانومتری اکسید تیتانیم انجام گرفت. استحکام پیوند بین ورق‌ها با استفاده از آزمون لایه‌کنی اندازه‌گیری شد. هم‌چنین به منظور ارزیابی سطح شکست نمونه‌ها پس از آزمون لایه‌کنی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. تاثیر پارامترهای فرایند روی استحکام پیوند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که با افزایش نانوذرات اکسید تیتانیم، استحکام پیوند بین لایه‌ها بعد از فرایند نورد اتصالی سرد، کاهش یافت. در مقدار ثابتی از ذرات، هنگامی که میزان کاهش در ضخامت افزایش یافت، نوسان نیروی لایه‌کنی میانگین نیز زیاد شد. هم‌چنین، با افزایش مقدار ذرات، میزان کرنش آستانه‌ای نیز افزایش یافت.

## واژه‌های کلیدی:

آلومینیم، نانوذرات اکسید تیتانیم، نورد اتصالی سرد، استحکام پیوند

## ۱- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی به دلیل دارا بودن دانسیته‌ی کم، صلبیت بالا و نرخ سایش کم، مواد امیدبخشی برای صنایع اتومبیل، هوا فضا و دیگر کاربردهای ساختاری می‌باشند. کامپوزیت‌های با زمینه‌ی آلومینیم که توسط ذرات تقویت شده‌اند، به علت داشتن خاصیت همسانگردی مورد توجه صنایع مختلف قرار گرفته‌اند [۱-۲]. در سال‌های اخیر تولید این کامپوزیت‌ها با استفاده از روش نورد اتصالی سرد (CRB) رشد چشم‌گیری داشته است. مهم‌ترین عامل در فرایند نورد اتصالی سرد، استحکام پیوند (چسبندگی یا لایه‌کنی) می‌باشد که تمامی خواص نمونه‌های تولید شده توسط این روش را می‌تواند تحت‌الشعاع قرار دهد. به همین علت پژوهش‌های زیادی بر روی پارامترهای تاثیرگذار بر روی استحکام پیوند در این روش انجام شده است. پژوهش‌های زیادی روی پارامترهای تاثیرگذار بر استحکام پیوند در این روش انجام شده است. این پارامترها

عبارت‌اند از: کاهش در ضخامت [۳-۱۱]، عملیات آنیل پس از فرایند [۴ و ۱۱]، سرعت نورد [۴ و ۱۱] و حضور ذرات بین ورق‌ها [۸ و ۱۲-۱۳].

مورد اخیر به تازگی مورد توجه قرار گرفته است، زیرا می‌توان با بررسی و بهینه‌سازی این پارامتر و انجام نورد اتصالی سرد، کامپوزیت تولید کرد. علیزاده و پایدار [۱۲] بدین منظور از ورق‌های آلومینیم ۱۰۵۰ و ذرات میکرونی هیبرید تیتانیم برای تولید آلومینیم اسفنجی استفاده کردند.

آن‌ها متوجه شدند که حضور این ذرات، استحکام پیوند بین ورق‌های آلومینیم را کاهش می‌دهد. هم‌چنین لو و همکاران [۱۳] از ورق‌های آلومینیم ۶۰۶۰ و ذرات نانومتری اکسید سیلیسیم برای تولید کامپوزیت استفاده کردند. اما آن‌ها دریافتند که نانوذرات اکسید سیلیسیم موجب افزایش استحکام پیوند بین ورق‌ها می‌شود. در نهایت جماعتی و طرقی‌نژاد [۸] به بررسی تاثیر نانوذرات آلومینا روی استحکام پیوند ورق‌های آلومینیم ۱۱۰۰ پرداختند و متوجه شدند که با افزایش این ذرات، استحکام پیوند کاهش می‌یابد.

هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر حضور ذرات نانومتری اکسید تیتانیم روی استحکام پیوند میان ورق‌های آلومینیم ۱۰۵۰ است که تاکنون هیچ مطالعه‌ی منتشر شده‌ای در این زمینه موجود نمی‌باشد. از آن جا که آلومینیم/اکسید تیتانیم یک کامپوزیت شناخته شده با خواص بسیار مناسب می‌باشد، بررسی حضور این ذرات و تاثیر آن روی استحکام پیوند ورق‌های آلومینیم امری ضروری به نظر می‌رسد. هم‌چنین سطح مقطع شکست نمونه‌های تولید شده نیز مورد مطالعه و بررسی قرار خواهند گرفت.

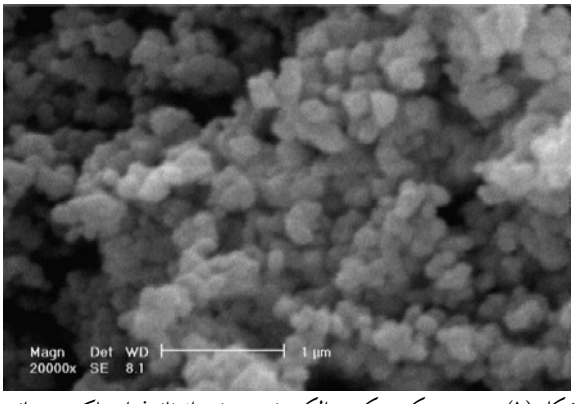
## ۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از آلومینیم خالص تجاری AA۱۰۵۰ استفاده شد. برای بررسی ترکیب شیمیایی آلومینیم مورد استفاده، کوانتومتر پایه‌ی آلومینیم مورد استفاده قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلومینیم مورد استفاده.

| ماده | ترکیب شیمیایی (wt.%) |
|---|---|
| آلومینیم ۱۰۵۰ | ۹۹/۵۵ Al، ۰/۱ Si، ۰/۰۲ Mg، ۰/۰۹ Cu، ۰/۰۱ Mn، ۰/۲۳ Fe، ۰/۰۰۴ Zr، ۰/۰۰۶ Ti |

نوارهایی به ابعاد ۱ mm × ۳۰ mm × ۱۵۰ mm در جهت نورد ورق‌های آلومینیم خالص تجاری خریداری شده، تهیه گردید. به منظور بررسی تاثیر حضور و مقدار ذرات اکسید تیتانیم روی استحکام پیوند، از نانوذرات اکسید تیتانیم با اندازه‌ای کم‌تر از ۱۰۰ nm (شکل ۱) استفاده شد. نمونه‌ها ابتدا در حمام استن، چربی‌زدایی شدند و سپس سطح آن‌ها توسط برس فولادی با قطر سیم ۰/۲۶ mm زبر گردید. زبری سطح اولیه‌ی نمونه‌ها (قبل از برس‌زنی) ۰/۵ µm بود و پس از عملیات برس‌زنی به ۴/۲ µm افزایش یافت. مقادیر زبری توسط میانگین داده‌های به دست آمده از دستگاه زبری‌سنج در جهت‌های طولی و عرضی نمونه گزارش شده است. نکته‌ی بسیار مهمی که باید به آن توجه شود این است که باید از لمس کردن سطوح تمیز شده پرهیز کرد، چون چربی‌ها مانع از تشکیل پیوندی قوی خواهند شد. پس از فرایند آماده‌سازی سطح، برای به حداقل رساندن تشکیل دوباره‌ی اکسیدها در سطوح برس زده شده، عملیات نورد اتصالی می‌بایست به سرعت انجام گیرد. پس از آماده‌سازی سطحی، نمونه ها به دقت حمل شده و پس از قرار گرفتن ذرات اکسید تیتانیم و روی هم قرار گرفتن نمونه ها، به سرعت نورد شدند. لازم به ذکر است که زمان بین آماده سازی سطح و فرایند نورد کم‌تر از ۱۲۰ ثانیه بود. عملیات با استفاده از یک دستگاه نورد با ظرفیت ۲۰ تن، قطر غلتک ۱۲۵ mm و سرعتی برابر با ۲ m/min بدون حضور روان کار انجام شد. کاهش ضخامت های اعمال شده بر روی نمونه‌ها بین ۳۰ تا ۹۰٪ متغیر بود. نمایشی از انجام فرایند نورد اتصالی سرد در شکل (۲) آمده است. به منظور بررسی تاثیر مقدار نانوذرات اکسید تیتانیم بر استحکام پیوند، مقادیری بین ۰/۰۰ تا ۵/۰۰ wt.% از ذرات به نمونه‌ها اضافه شد.

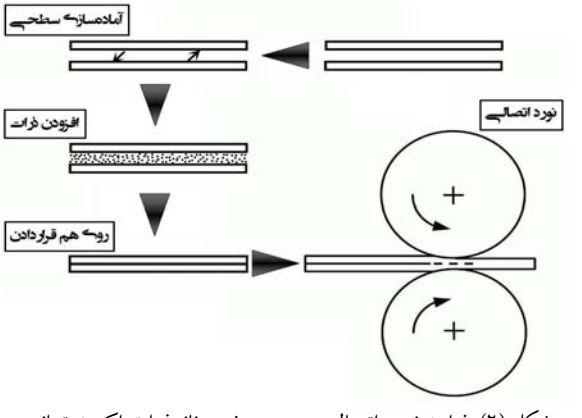



شکل (۱): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوذرات اکسید تیتانیم.

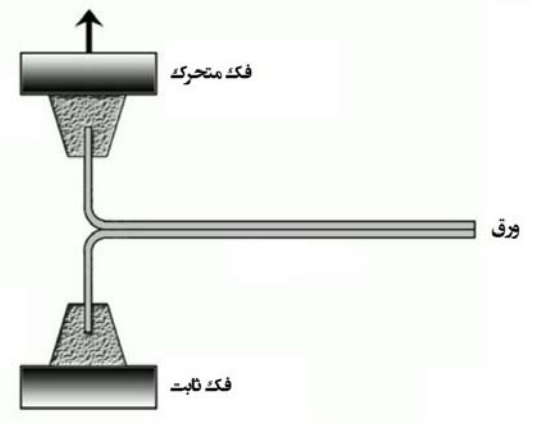
استحکام پیوند نمونه‌ها با استفاده از آزمون لایه‌کنی و بر اساس استاندارد ASTM-D1876-01 مورد ارزیابی قرار گرفت. این آزمون با استفاده از دستگاه کشش Hounsfield H50KS با بار ۵۰ kg و سرعتی معادل با ۲۰ mm/min انجام شد. روش انجام این آزمون در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، با استفاده از نمودار به دست آمده از آزمون لایه‌کنی می‌توان میانگین نیروی لایه‌کنی را به دست آورد. در نهایت مقدار استحکام پیوند توسط رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود:

(۱) پهنای پیوند/نیروی لایه‌کنی میانگین=استحکام لایه‌کنی میانگین

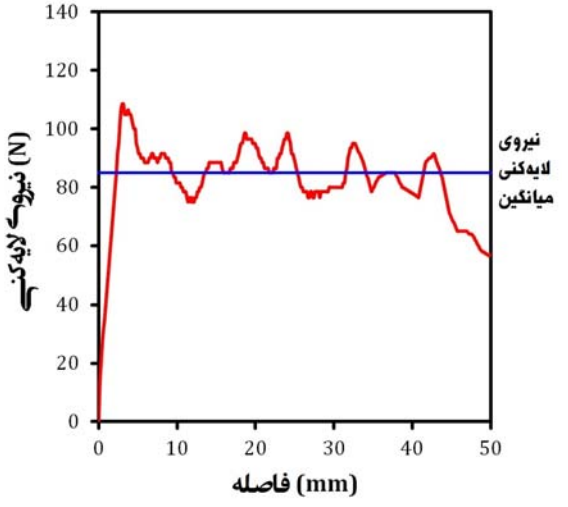
سطوح شکست نمونه‌ها پس از آزمون لایه‌کنی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی Philips XL30 مورد بررسی قرار گرفت.




شکل (۲): فرایند نورد اتصالی سرد در حضور نانوذرات اکسید تیتانیم.




شکل (۳): روش انجام آزمون لایه‌کنی.

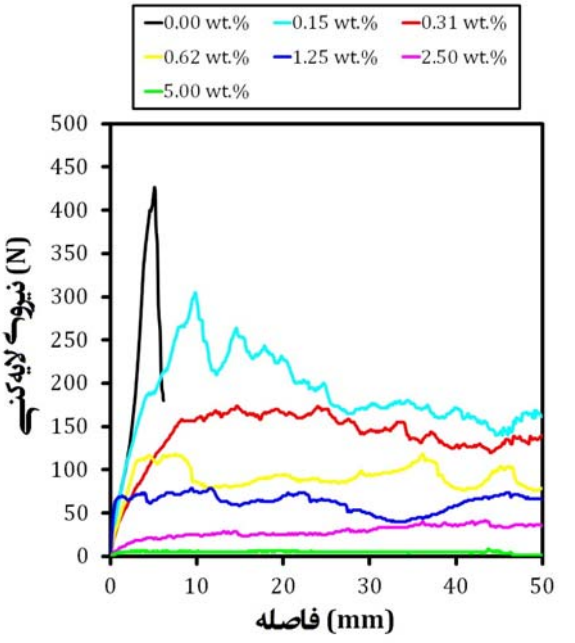



شکل (۴): نمونه‌ای از نمودار به دست آمده از آزمون لایه‌کنی و طریقه‌ی یافتن نیروی لایه‌کنی میانگین.

## ۳- نتایج و بحث

شکل (۵)، تاثیر مقدار ذرات اکسید تیتانیم روی نیروی لایه‌کنی ورق‌های آلومینیم ۱۰۵۰ را در کاهش ضخامت ثابت ۷۵٪ نشان می‌دهد. واضح است که با افزایش مقدار ذرات، نیروی لایه‌کنی کاهش می‌یابد. علاوه بر آن، این شکل نشان می‌دهد که برای مقادیر بالایی از اکسید تیتانیم (۵/۰۰ wt.%)، پیوند برقرار شده قوی نیست، در حالی که برای ورق بدون حضور ذرات، پیوند تشکیل شده به قدری قوی می‌باشد که حین آزمون لایه‌کنی، ورق‌ها از هم جدا نشده و شکست در خود نمونه‌ها رخ می‌دهد. هم‌چنین شکل (۵) نشان می‌دهد که حضور نانوذرات اکسید

تیتانیم حتی در مقادیر بسیار ناچیز می‌تواند موجب کاهش چشم‌گیری در مقدار نیروی لایه‌کنی شود.




شکل (۵): تاثیر مقدار نانوذرات اکسید تیتانیم روی نیروی لایه‌کنی ورق‌های آلومینیم ۱۰۵۰ در کاهش ضخامت ثابت ۷۵٪.

تاثیر افزایش نانوذرات اکسید تیتانیم روی سطوح شکست نمونه‌ها در کاهش ضخامت ۷۵٪ در شکل (۶) نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که نانوذرات اکسید تیتانیم مانع تماس فلز با فلز شده و لذا پیوند ضعیف‌تری تشکیل می‌شود. تفاوت بین استحکام پیوند در حضور و عدم حضور نانوذرات اکسید تیتانیم، قابل توجه می‌باشد. هنگامی که نانوذرات اکسید تیتانیم میان ورق‌ها وجود دارند، سطح تماس بسیار کم‌تری بین فلز بکر اکسترود شده در دو ورق به وجود می‌آید (فلز بکر، فلزی است که در زیر لایه‌ی اکسید سطحی ورق قرار دارد و می‌تواند در صورت شکست لایه‌ی اکسیدی، از میان اکسیدهای شکسته شده، اکسترود شود). این پدیده می‌تواند به وسیله‌ی تئوری سد انرژی [۱۴-۱۶] توضیح داده شود. غلبه بر این سد انرژی، به منظور تشکیل پیوند امری ضروری است. در حقیقت هنگامی که نانوذرات اکسید تیتانیم بین ورق‌های آلومینیم حضور دارند، انرژی لازم برای ترتیب مجدد اتم‌های سطح برای رسیدن به یک آرایش پیوندی مناسب و انرژی فعال‌سازی برای تشکیل پیوند اتم با اتم، به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

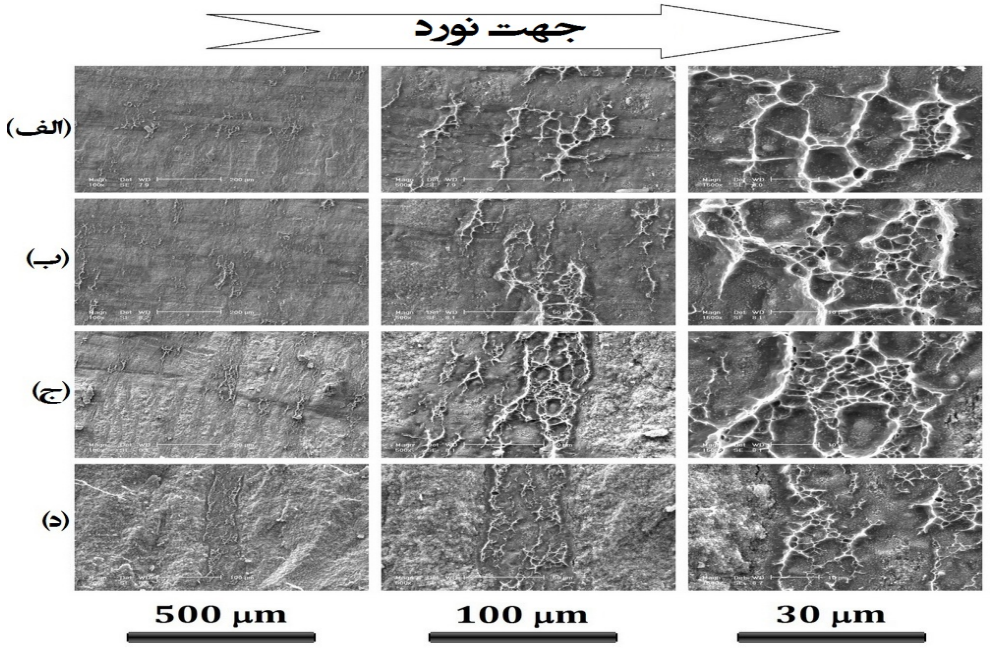
علاوه بر توضیح داده شده می‌توان به دلیل دیگری برای کاهش استحکام پیوند در حضور ذرات نیز اشاره نمود. حضور این نانوذرات منجر به کاهش ضریب اصطکاک در فصل مشترک لایه‌ها می‌شود. زیرا این ذرات می‌توانند به عنوان روان‌ساز عمل نمایند. اما اثر کاهش ضریب اصطکاک روی استحکام پیوند را می‌توان بدین صورت توضیح داد. با کاهش ضریب اصطکاک، استحکام پیوند کم‌تر خواهد شد. این امر می‌تواند به کاهش فشار تماسی میانگین (P) در نتیجه‌ی کاهش ضریب اصطکاک بین ورق‌ها و غلتک‌ها مربوط باشد. فشار تماسی میانگین از رابطه‌ی (۲) به دست می‌آید که F، W و L به ترتیب عبارت‌اند از نیروی نورد، پهنای ورق و طول قوس تماسی ورق با غلتک. برای کاهش ضخامتی ثابت، با کاهش اصطکاک مقدار طول تماس غلتک-ورق افزایش می‌یابد. با توجه به رابطه‌ی (۲)، افزایش مقدار طول تماس غلتک-ورق منجر به کاهش فشار تماسی میانگین می‌شود و در نتیجه استحکام پیوند کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، هنگامی که اصطکاک کاهش می‌یابد، فشار لازم برای دست‌یابی به یک کاهش ضخامت ثابت زیاد می‌شود.

$$P = \frac{F}{WL} \qquad (۲)$$

این نتایج در توافق کامل با یافته‌های دیگر پژوهشگران [۴ و ۱۱-۱۲] در این زمینه است که استحکام پیوند میان ورق‌های آلومینیم را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. بنابراین به طور کلی می‌توان اظهار داشت که دو دلیل اصلی کاهش استحکام پیوند در نتیجه‌ی حضور نانوذرات اکسید تیتانیم میان ورق‌های آلومینیم عبارت است از:

۱- کاهش سطح تماس بین فلزات بکر اکسترود شده

۲- کاهش ضریب اصطکاک میان ورق‌های آلومینیم در نتیجه‌ی عملکرد ذرات به عنوان روان‌ساز




شکل (۶): سطوح شکست ورق‌های آلومینیم در کاهش ضخامت ۷۵٪ شامل: (الف) ۰/۱۵، (ب) ۰/۶۲، (ج) ۲/۵۰، و (د) wt.% ۵/۰۰ اکسید تیتانیم در سه بزرگ‌نمایی مختلف.

جدول (۲): نیروی لایه‌کنی میانگین به همراه مقدار نوسان آن برای مقادیر مختلفی از کاهش ضخامت و نانوذرات اکسید تیتانیم.

| | | مقدار ذرات (wt.%) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۰۰/۰ | ۱۵/۰ | ۳۱/۰ | ۶۲/۰ | ۲۵/۱ | ۵۰/۲ | ۰۰/۵ |
| (%) کاهش در ضخامت | ۳۰ | ج | ج | ج | ج | ج | ج | ج |
| | ۳۵ | ۰(±۵) | ج | ج | ج | ج | ج | ج |
| | ۴۰ | ۱۰(±۵) | ۰(±۵) | ج | ج | ج | ج | ج |
| | ۴۵ | ۲۵(±۵) | ۵(±۵) | ۰(±۵) | ج | ج | ج | ج |
| | ۵۰ | ۶۰(±۱۰) | ۲۳(±۱۰) | ۸(±۵) | ۰(±۵) | ج | ج | ج |
| | ۵۵ | ۱۰۱(±۱۰) | ۴۵(±۱۵) | ۲۸(±۱۰) | ۱۰(±۵) | ج | ج | ج |
| | ۶۰ | ۱۴۰(±۱۰) | ۷۵(±۲۰) | ۵۰(±۱۵) | ۲۳(±۱۰) | ۰(±۵) | ج | ج |
| | ۶۵ | ۲۴۱(±۱۵) | ۱۲۳(±۳۰) | ۸۰(±۱۵) | ۴۰(±۱۵) | ۸(±۵) | ۰(±۵) | ج |
| | ۷۰ | ۳۴۰(±۱۵) | ۱۵۰(±۴۰) | ۱۲۱(±۲۰) | ۶۳(±۱۵) | ۳۳(±۱۰) | ۱۳(±۵) | ج |
| | ۷۵ | ش | ۱۹۵(±۵۰) | ۱۵۱(±۲۵) | ۹۰(±۱۵) | ۵۰(±۱۰) | ۳۰(±۱۰) | ۰(±۵) |
| | ۸۰ | ش | ۲۵۳(±۶۰) | ۱۸۸(±۳۰) | ۱۲۵(±۲۰) | ۸۳(±۱۵) | ۵۱(±۱۰) | ۵(±۵) |
| | ۸۵ | ش | ۳۳۸(±۶۵) | ۲۵۸(±۳۵) | ۱۶۸(±۲۰) | ۱۱۵(±۱۵) | ۷۵(±۱۵) | ۱۸(±۵) |
| | ۹۰ | ش | ش | ۳۲۵(±۴۰) | ۲۲۵(±۲۵) | ۱۵۰(±۲۰) | ۹۸(±۱۵) | ۲۵(±۱۰) |

ج: جدا شده پس از فرایند نورد اتصالی سرد، ش: شکسته شدن نمونه حین آزمون لایه‌کنی

نتایج به دست آمده از آزمون لایه‌کنی در جدول (۲) آورده شده است. هم‌چنین اثر کاهش ضخامت و مقدار نانوذرات روی میزان نوسان نیروی لایه‌کنی میانگین در شکل (۷) نشان داده شده است.

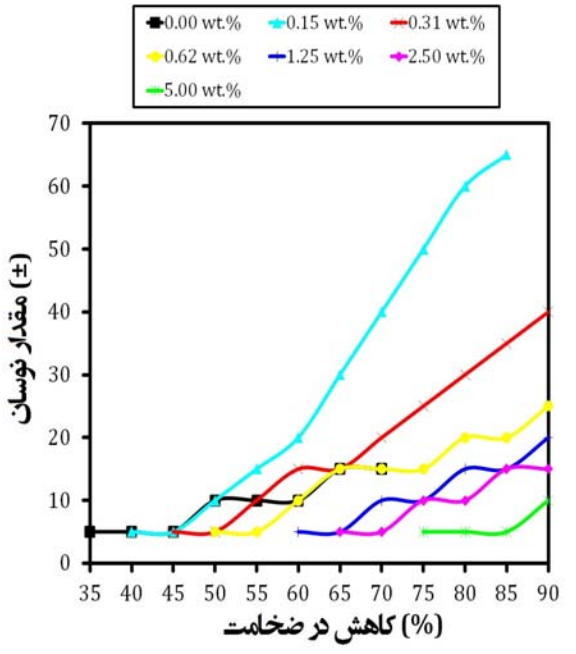
با توجه به جدول (۲)، برای مقادیر کاهش ضخامت کم در مقدار ثابتی از ذرات، پیوند برقرار نمی‌شود به طوری که دو نوار پس از فرایند نورد اتصالی سرد از هم جدا می‌شوند بدون این که هیچ نیرویی به آن‌ها اعمال شود. در حالی که برای مقادیر کاهش ضخامت زیاد، پیوند تشکیل شده بسیار قوی می‌باشد تا جایی که حین آزمون لایه‌کنی، شکست در خود نمونه‌ها رخ می‌دهد.

باید به این نکته توجه کرد که نوسان نیروی لایه‌کنی میانگین در نتیجه‌ی غیریکنواختی مناطق پیوند یافته سرتاسر نوارهای آلومینیمی می‌باشد. به عبارت دیگر، با افزایش یکنواختی مناطق پیوند یافته، مقدار نوسان نیروی لایه‌کنی میانگین کاهش خواهد یافت. مقدار کاهش در ضخامت و نیز میزان نانوذرات اکسید تیتانیم نقش مهمی را در تعیین نوسان نیروی لایه‌کنی میانگین ایفا می‌کنند. با توجه به جدول (۲) و شکل (۷) می‌توان نکات مهمی را استخراج کرد. در مقدار ثابتی از ذرات، هنگامی که میزان کاهش در ضخامت افزایش می‌یابد، نوسان نیروی لایه‌کنی میانگین نیز زیاد می‌شود. در حقیقت، با افزایش مناطق پیوند یافته، یکنواختی این مناطق در سرتاسر نوار کاهش می‌یابد و لذا مقدار نوسان زیاد می‌شود.

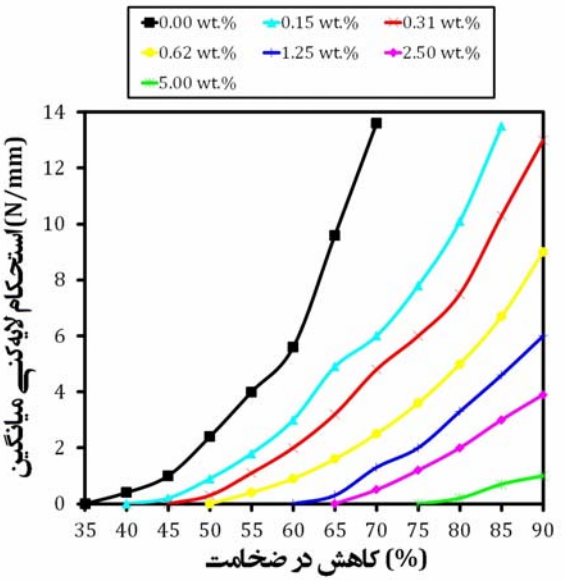
هم‌چنین، نوارهای بدون ذرات، مقدار نوسان کم‌تری را در مقایسه با نوارهای حاوی اکسید تیتانیم دارا می‌باشند زیرا هنگامی که ذرات به سطح ورق افزوده می‌شوند، یکنواختی آن‌ها در برخی از قسمت‌ها ممکن است مطلوب نباشد. از طرف دیگر، در حضور ذرات اکسید تیتانیم، هنگامی که مقدار ذرات افزایش می‌یابند، مقدار نوسان در یک کاهش ضخامت ثابت، کم می‌شود. با افزایش مقدار ذرات، مناطق پیوند نیافته افزایش خواهند یافت.

لذا، یکنواختی مناطق پیوند یافته در سرتاسر نوار افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار نوسان کم می‌شود. شکل (۸)، اثر هم‌زمان مقدار کاهش ضخامت و نانوذرات اکسید تیتانیم روی استحکام پیوند (استحکام لایه‌کنی میانگین) را نشان می‌دهد. واضح است که با افزایش مقدار کاهش ضخامت و نیز با کاهش مقدار ذرات اکسید تیتانیم، استحکام پیوند بهبود می‌یابد. تئوری فیلم [۳-۱۱و۱۴-۱۶] پیشنهاد می‌کند که ذرات اکسید تیتانیم مانع از پیوند میان فلزات بکر اکسترود شده می‌شوند. لذا مناطق پیوند یافته و در نتیجه استحکام پیوند کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۸)، باید به این نکته توجه کرد که مقدار شیب میانگین منحنی‌ها برای مقادیر مختلفی از ذرات اکسید تیتانیم، ثابت نمی‌باشد.

در حقیقت، با افزایش مقدار ذرات، شیب میانگین منحنی‌ها کاهش می‌یابد. در واقع، افزودن ذرات میان نوارهای آلومینیم در مقادیر کاهش ضخامت کم منجر به افزایش سد انرژی به میزان چشم‌گیری می‌شود. بنابراین، شیب منحنی‌ها در مقادیر کاهش ضخامت کم، کاهش می‌یابد.



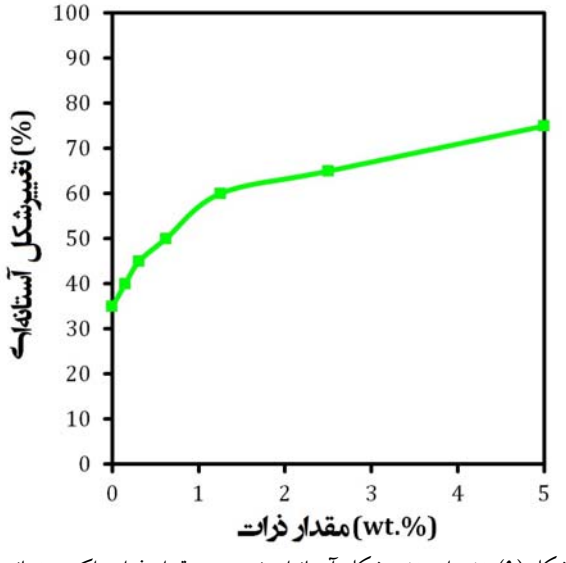

شکل (۷): اثر میزان کاهش ضخامت و مقدار ذرات روی میزان نوسان نیروی لایه‌کنی میانگین.




شکل (۸): اثر هم‌زمان مقدار کاهش ضخامت و ذرات اکسید تیتانیم روی استحکام پیوند (استحکام لایه‌کنی میانگین).

در هر صورت، افزایش مقدار کاهش در ضخامت می‌تواند این کاهش شیب را جبران نماید (برای مقدار ذرات کم: ۰/۰۰، ۰/۱۵، ۰/۳۱، ۰/۶۲، و ۱/۲۵ wt.%). به عبارت دیگر، در مقادیر کاهش ضخامت زیاد، تغییرشکل پلاستیک می‌تواند بر سد انرژی چیره شود. اما، با افزایش مقدار ذرات (بیش‌تر از ۱/۲۵ wt.%)، مقدار سد انرژی به حدی زیاد می‌شود که نقش تغییرشکل پلاستیک در چیره شدن بر سد انرژی کاهش می‌یابد. به همین دلیل، شیب منحنی‌های مربوط به مقدار ذرات زیاد (۲/۵۰ و ۵/۰۰ wt.%) به تغییرات کاهش در ضخامت حساس نمی‌باشد.

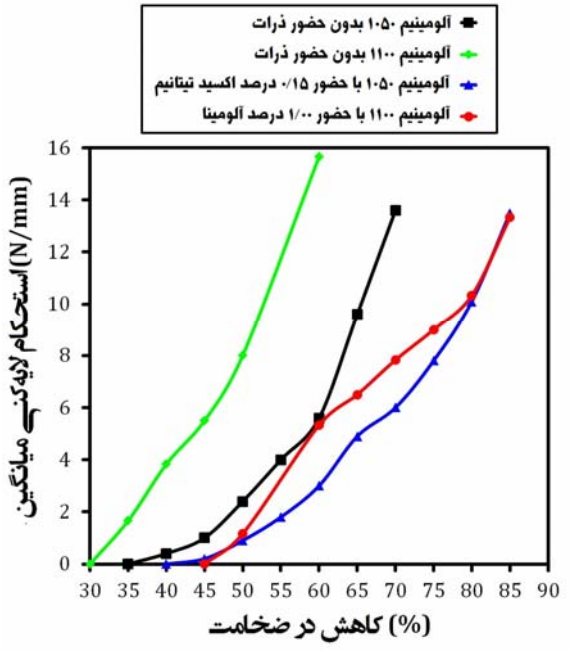
به منظور برقراری پیوند میان دو نوار فلزی، به مقدار تغییرشکل حداقلی نیاز است که تغییرشکل آستانه‌ای نام دارد. بنابراین تعیین این مقدار در فرایند نورد اتصالی سرد بسیار مهم می‌باشد. اثر مقدار ذرات اکسید تیتانیم روی تغییرشکل آستانه‌ای در شکل (۹) نشان داده شده است. واضح است که مقدار تغییرشکل آستانه‌ای به طور قابل توجهی به میزان ذرات اکسید تیتانیم وابسته است. با افزایش مقدار ذرات، میزان کرنش آستانه‌ای نیز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، مقدار تغییرشکل آستانه‌ای برای نمونه‌های بدون ذرات اکسید تیتانیم برابر با ۳۵٪ است، در حالی که این مقدار برای نمونه‌های حاوی ۵/۰۰ wt.% اکسید تیتانیم برابر با ۷۵٪ می‌باشد. دلیل این موضوع را می‌توان با استفاده از تئوری سد انرژی توضیح داد. این تئوری پیشنهاد می‌کند قبل از این که دو سطح از فلز بکر بتوانند به یکدیگر برسند، می‌بایست بر یک سد انرژی غلبه کرد. بالاتر از این مقدار، استحکام پیوند به سرعت افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، هنگامی که مقدار تغییرشکل (کاهش ضخامت) کم‌تر از میزان تغییرشکل آستانه‌ای است، تنها تعداد کمی از ترک‌های سطحی به وجود می‌آید و لذا مقدار فلز بکر در تماس با یکدیگر در فصل‌مشترک ناچیز می‌باشد. بنابراین سطوح فلز بکر نمی‌توانند به طور مناسب در تماس با هم قرار گیرند زیرا آلودگی‌ها در تشکیل پیوند تاخیر ایجاد می‌کنند. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، مقدار ذرات تاثیر بسیار مهمی روی میزان تغییرشکل آستانه‌ای دارد. با کاهش مقدار ذرات اکسید تیتانیم، اتم‌های آلومینیم بیش‌تری انرژی فعال‌سازی لازم برای تشکیل پیوند را کسب می‌کنند. بنابراین، نقش تغییرشکل در چیره شدن بر سد انرژی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، کاهش مقدار ذرات منجر به تشکیل پیوندی موفق حتی در کاهش ضخامت‌های کم می‌شود.




شکل (۹): تغییرات تغییرشکل آستانه‌ای نسبت به مقدار ذرات اکسید تیتانیم.

با مقایسه‌ی نتایج به دست آمده در این پژوهش و مقاله‌ی منتشر شده‌ای در مورد تاثیر نانوذرات آلومینا روی استحکام پیوند [۸]، مشخص شد که به علت انتخاب فلز و ذرات مختلف، تفاوت‌هایی در نتیجه به وجود می‌آید. این اختلافات در شکل ۱۰ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که استحکام پیوند نوارهای آلومینیم ۱۱۰۰ بیش‌تر از نوارهای آلومینیم ۱۰۵۰ می‌باشد. آلیاژ آلومینیم ۱۱۰۰ شامل حداقل wt.% ۹۹/۰۰ آلومینیم می‌باشد و برخی مواقع به عنوان آلومینیم خالص تجاری نیز نام برده می‌شود. در حالی که، آلیاژ آلومینیم ۱۰۵۰ (آلومینیم خالص تجاری) شامل حداقل wt.% ۹۹/۵۰ آلومینیم می‌باشد. شکل‌پذیری و انعطاف‌پذیری هر دو آلیاژ بسیار عالی است. در هر صورت، بر اساس شکل (۱۰)، می‌توان نتیجه گرفت که شکل‌پذیری آلیاژ آلومینیم ۱۱۰۰ بیش‌تر از ۱۰۵۰ می‌باشد. برخلاف آلیاژ آلومینیم ۱۰۵۰، آلومینیم ۱۱۰۰ دارای مقدار کنترل شده‌ای (wt.% ۰/۲۰-۰/۰۵) از عنصر مس می‌باشد. لذا می‌توان چنین استدلال کرد که حضور مقدار کنترل شده‌ای از عنصر مس منجر به افزایش شکل‌پذیری آلیاژ آلومینیم ۱۱۰۰ نسبت به ۱۰۵۰ می‌شود. در حین فرایند نورد اتصالی سرد، باز شدن لایه‌ی اکسید سطحی که پس از آماده‌سازی سطحی تولید شده است منجر به تماس فلز با فلز شده و پیوند تشکیل می‌شود. در این مورد، آلومینیم ۱۱۰۰ به علت پلاستیسیته‌ی بالاترش نسبت به آلومینیم ۱۰۵۰ می‌تواند لایه‌ی اکسیدی را راحت‌تر باز کند و بنابراین پیوند قوی‌تری تشکیل دهد.

از طرف دیگر، براساس شکل (۱۰)، واضح است که هم ذرات آلومینا و هم ذرات اکسید تیتانیم منجر به کاهش استحکام پیوند میان نوارهای آلومینیم می‌شوند. در هر صورت، اثر نانوذرات اکسید تیتانیم نسبت به نانوذرات آلومینا در کاهش استحکام پیوند، بسیار چشم‌گیرتر است. به بیانی دیگر، در حضور ذرات آلومینا، استحکام پیوند نوارهای آلومینیم بسیار بیش‌تر می‌باشد. دلایل این موضوع در ادامه آورده شده است. در حین نورد اتصالی سرد، فلز به طور پلاستیکی تغییرشکل می‌یابد و در جهت نورد منبسط می‌شود. براساس تئوری فیلم، آلومینیم از طریق ترک‌های ایجاد شده در لایه‌های اکسید سطحی و نیز توسط باز کردن لایه‌ی متشکل از ذرات، سیلان می‌یابد. بنابراین، شکل‌پذیری فلز بکر دارای تاثیر مهمی است، زیرا باید از طریق لایه‌ی اکسید سطحی و نیز لایه‌ی متشکل از ذرات عبور کند. از آن جایی که شکل‌پذیری آلومینیم ۱۱۰۰ بیش‌تر از آلومینیم ۱۰۵۰ است، می‌توان نتیجه گرفت که فلز بکر آلومینیم ۱۱۰۰ می‌تواند لایه‌ی اکسیدی و لایه‌ی متشکل از ذرات را راحت‌تر باز کند. لذا، استحکام پیوند نوارهای آلومینیم ۱۱۰۰ حاوی ذرات آلومینا بیش‌تر از نوارهای آلومینیم ۱۰۵۰ حاوی ذرات اکسید تیتانیم می‌باشد.




شکل (۱۰): اثر نوع فلز (آلومینیم ۱۱۰۰ و ۱۰۵۰) و نوع ذرات (آلومینا و اکسید تیتانیم) روی استحکام پیوند.

از سوی دیگر می‌توان پیشنهاد کرد که بالاتر از مقدار کاهش ضخامت خاصی، ذرات توانایی شکستن لایه‌ی اکسیدی که در سطح وجود دارد را پیدا می‌کنند، زیرا ذرات سرامیکی سخت‌تر از نوارهای آلومینیمی هستند. بدین ترتیب ذرات موجب به وجود آوردن سطوح بکری می‌شوند که به علت نبود زمان کافی برای تشکیل دوباره‌ی اکسید، این سطوح می‌توانند اکسترود شده و به

طور موثری موجب قوی‌تر شدن پیوند شوند. در هر صورت، از آن جایی که سختی ذرات آلومینا بیش‌تر از ذرات اکسید تیتانیم است، می‌توان نتیجه گرفت که نانوذرات آلومینا می‌توانند لایه‌ی اکسیدی را راحت‌تر و سریع‌تر بشکنند. لذا، در حضور ذرات آلومینا، استحکام پیوند نوارهای آلومینیمی بسیار بیشتر می‌باشد.

## ٤- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر حضور و مقدار ذرات اکسید تیتانیم روی استحکام پیوند ورق‌های آلومینیم ۱۰۵۰ که از طریق فرایند نورد اتصالی سرد تولید شده‌اند، پرداخته شد. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

۱- با افزایش مقدار ذرات اکسید تیتانیم، نیروی لایه‌کنی کاهش می‌یابد. برای مقادیر بالایی از اکسید تیتانیم (۵/۰۰ wt.%)، پیوند برقرار شده قوی نبود. حضور نانوذرات اکسید تیتانیم حتی در مقادیر بسیار ناچیز می‌تواند موجب کاهش چشم‌گیری در مقدار نیروی لایه‌کنی شود.

۲- سطوح شکست نشان می‌دهد که ذرات اکسید تیتانیم مانع تماس فلز با فلز شده و لذا پیوند ضعیف‌تری تشکیل می‌شود. تفاوت بین استحکام پیوند در حضور و عدم حضور ذرات اکسید تیتانیم، قابل توجه بود. هنگامی که ذرات اکسید تیتانیم میان ورق‌ها وجود داشتند، سطح تماس بسیار کم‌تری بین فلز بکر اکسترود شده در دو ورق به وجود می‌آید.

۳- در مقدار ثابتی از ذرات، هنگامی که میزان کاهش در ضخامت افزایش یابد، نوسان نیروی لایه‌کنی میانگین نیز زیاد می‌گردد. به طور کلی، نوارهای بدون ذرات، مقدار نوسان کم‌تری را در مقایسه با نوارهای حاوی اکسید تیتانیم دارا می‌باشند. در حضور ذرات اکسید تیتانیم، هنگامی که مقدار ذرات افزایش می‌یابد، مقدار نوسان نیروی لایه‌کنی میانگین در یک کاهش ضخامت ثابت، کم می‌گردد.

۴- مقدار شیب میانگین منحنی‌های استحکام پیوند برای مقادیر مختلفی از ذرات اکسید تیتانیم، ثابت نبود. در حقیقت، با افزایش مقدار ذرات، شیب میانگین منحنی‌ها کاهش می‌یابد.

۵- مقدار تغییرشکل آستانه‌ای به طور قابل توجهی به میزان ذرات اکسید تیتانیم وابسته است. با افزایش مقدار ذرات، میزان کرنش آستانه‌ای نیز افزایش می‌یابد. مقدار تغییرشکل آستانه‌ای برای نمونه‌های بدون ذرات اکسید تیتانیم برابر با ۳۵٪ می‌باشد، در حالی که این مقدار برای نمونه‌های حاوی ۵/۰۰ wt.% اکسید تیتانیم برابر با ۷۵٪ می‌باشد.

۶- اثر نانوذرات اکسید تیتانیم نسبت به نانوذرات آلومینا در کاهش استحکام پیوند، بسیار چشم‌گیرتر می‌باشد. به عبارت دیگر، در حضور ذرات آلومینا، استحکام پیوند نوارهای آلومینیم بسیار بیشتر می‌باشد.

## ٥- مراجع


[1] P.K. Rohatgi, "Cast Aluminum–Matrix Composites for Automotive Applications", JOM, pp. 10–15, 1991.

[2] K.K. Chawla, A.H. Esmaeili, A.K. Datye and A.K. Vasudevan, "Effect of Homogeneous/Heterogeneous Precipitation on Aging Behavior of $SiC_p$/Al 2014 Composite", Scripta Materialia, Vol. 25, pp. 1315–1319, 1991.

[3] N. Bay, "Cold Welding Part II, Process Variation and Application, Metal Construction", Vol. 18, pp. 486–490, 1986.

[4] R. Jamaati and M.R. Toroghinejad, "Investigation of the Parameters of the Cold Roll Bonding (CRB) Process", Materials Science and Engineering A, Vol. 527, pp. 2320–2326, 2010.

[5] L.R. Vaidyanath and D.R. Milner, "Significance of Surface Preparation in Cold Pressure Welding of Metals", British Welding Journal, Vol. 7, pp. 1–6, 1960.

[6] R. Jamaati and M.R. Toroghinejad, "Effect of friction, Annealing Conditions and Hardness on the Bond Strength of Al/Al Strips Produced by Cold Roll Bonding Process", Materials and Design, Vol. 31, pp. 4508–4513, 2010.

[7] N. Bay, "Cold welding part III, Influence of Surface Preparation on Bond Strength", Metal Construction, Vol. 18, pp. 625–629, 1986.

[8] R. Jamaati and M.R. Toroghinejad, "Effect of $Al_2O_3$ Nano-Particles on the Bond Strength in CRB process", Materials Science and Engineering A, Vol. 527, pp. 4858–4863, 2010.

[9] L.R. Vaidyanath, M.G. Nicholas and D.R. Milner, "Pressure Welding by Rolling", British Welding Journal, Vol. 6, pp. 13–28, 1959.

[10] R. Jamaati and M.R. Toroghinejad, "The Role of Surface Preparation Parameters on Cold Roll Bonding of

Aluminum Strips", Journal of Materials Engineering Performance, Vol. 20, pp. 191–197, 2011.

[11] R. Jamaati and M.R. Toroghinejad, "Cold Roll Bonding Bond Strengths: Review", Materials Science and Technology, Vol. 27, pp. 1101–1108, 2011.

[12] M. Alizadeh and M.H. Paydar, "Study on the Effect of Presence of $TiH_2$ Particles on the Roll Bonding Behavior of Aluminum Alloy Strips", Materials and Design, Vol. 30, pp. 82–86, 2009.

[13] C. Lu, K. Tieu and D. Wexler, "Significant Enhancement of Bond Strength in the Accumulative Roll Bonding Process Using Nano-Sized $SiO_2$ Particles", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 4830–4834, 2009.

[14] N. Bay, "Cold welding part I, Characteristic, Bonding Mechanisms, Bond Strength", Metal Construction, Vol. 18, pp. 369–372, 1986.

[15] H.A. Mohamed and J. Washburn, "Mechanism of Solid State Pressure Welding", Welding Journal, pp. 302s–310s, 1975.

[16] J.A. Cave and J.D. Williams, "The Mechanisms of Cold Pressure Welding by Rolling. Journal of Instrument Metals", Vol. 101, pp. 203–207, 1975.