

ساخت ورق‌های لحیم دولایه AA 3003/ AA 4043 به روش نورد سرد

سید حمید رضا مداح حسینی
استادیار

امیرحسین کوکبی
استاد

محمد حاجی زاده
کارشناسی ارشد

دانشکده‌ی مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

در این تحقیق، برای ساخت ورق‌های لحیم کاری از آلیاژهای آلومینیوم ۳۰۰۳ و ۴۰۴۳ آنیل شده، به ترتیب به عنوان فلز پایه و روکش استفاده شده است. ورق‌های دو لایه ۳۰۰۳/۴۰۴۳ از راه اتصال نوردی، تهیه شدند و پس از عملیات حرارتی، استحکام اتصال آنها به روش آزمون لایه کنی محاسبه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین استحکام اتصال در آزمایش لایه کنی با اعمال ۷۰٪ تغییر شکل نورد، حاصل می‌شود. همچنین مشخص شد که با افزایش زمان آنیل در نمونه‌های دو لایه تا حدود ۴۰ دقیقه، استحکام اتصال افزایش یافته است؛ ولی با افزایش بیشتر زمان آنیل، استحکام کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی

اتصال نوردی، روکش‌دهی، ورق‌های لحیم کاری، آزمایش لایه کنی

Production of Composite Brazing Sheets of 3003/4043 Aluminum Alloys by Cold Roll Bonding

A. H. Kokabi
Professor

H. R. Madaah-Hosseini
Assistant Professor

M. Hajizadeh
Master of Science

Department of Materials Science and Engineering,
Sharif University of Technology

Abstract

In this research work, composite brazing sheets of 3003/4043 aluminum alloys were made by cold roll bonding. Peel test specimens were prepared from the welded composites and annealed in 400 °C for 20-80 min. Bonding strength of the brazing sheets was measured by peel test. Maximum peeling strength was obtained under 70 % reduction in area after annealing for 40 min at 400 °C.

Keywords

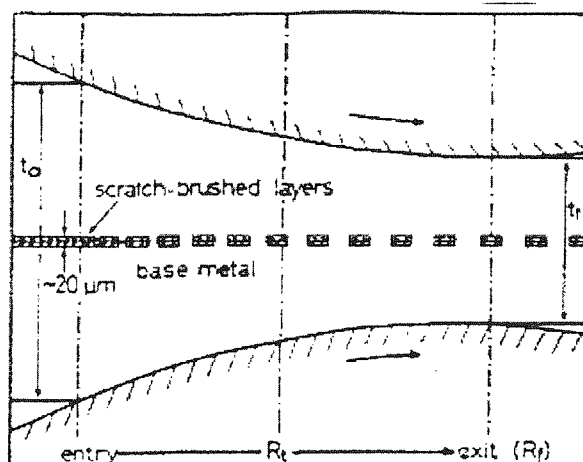
Roll bonding; Cladding; Brazing sheets; Peel test

امروزه فرآیند لحیم کاری سخت، مناسبترین روش تولید مبدل‌های حرارتی آلومینیومی، نظیر رادیاتور، کندانسور و تبخیرکننده است. برای ساخت این تجهیزات به جای استفاده از فیلهایی به شکل سیم، ورق نازک، پودر و سایر اشکال پیش ساخته، معمولاً از ورق‌های روکش شده با لحیم استفاده می‌شود. ورق‌های فلزی مرکب، زیر مجموعه‌ای از کامپوزیت‌ها و شامل دو یا چند ماده در آرایش لایه‌ای هستند. کاربرد این ورق‌ها به دلیل خواص منحصر به فردشان بسیار گسترده است. برای مثال می‌توان به استفاده از ورق‌های چند لایه در ساخت انواع ترموستات و سگه اشاره کرد [۱]. تولید کامپوزیت‌های لایه‌ای از روش‌های مختلفی قابل اجرا است. از نظر تناژ تولید، جوش سرد نوردی یکی از پرکاربردترین روش‌های تولید ورق‌های فلزی مرکب است. سالانه بالغ بر ۲۰۰۰۰ تن ورق روکش شده از این راه در ایالات متحده تولید می‌شود [۱ و ۲]. جوش سرد، یک فرآیند جوشکاری حالت جامد است که در آن فشار و تغییر شکل پلاستیک دو فلز، در دمایی کمتر از دمای تبلور مجدد، موجب اتصال می‌شود [۲ و ۳]. در این نوع جوشکاری، دو ورق فلزی در دمای محیط و در فشاری بالا که با غلطک‌ها اعمال می‌شود، به هم جوش می‌خورند. برای رسیدن به یک اتصال قوی، بین دو فلز باید پیوند اتمی، ایجاد شود [۴ و ۵]. در عمل هنگامی که با اعمال فشار، انبساط سطحی به اندازه‌ای برسد که سطوح مقابل دو فلز، در تماس نزدیک با یکدیگر قرار بگیرد و مواد تازه از بین ترک‌های به وجود آمده در سطح مشترک لایه‌ها اکستروود شوند، اتصال (پیوند متالورژیکی) بین نواحی تازه و عاری از هرگونه آلودگی به وجود می‌آید [۶ و ۷]. از طریق فرآیند جوش سرد نوردی، می‌توان مساحت بزرگی از سطح را به طور همزمان و یکنواخت اتصال داد. به دلیل قابلیت اتوماسیون، سرعت این فرآیند بسیار بالاست. همچنین در این روش، امکان اتصال فلزاتی که از نظر متالورژیکی ناسازگارند وجود دارد و هزینه‌ی مواد مصرفی در این فرآیند بسیار پایین است [۸]. فلزاتی که با این روش به یکدیگر متصل می‌شوند باید به اندازه‌ی کافی انعطاف پذیر و توانایی تغییر شکل زیاد را بدون شکست، دارا باشند.

آنالیز فرآیند نورد دو یا چند لایه، بسیار پیچیده‌تر از نورد یک ورق است؛ چون تنش‌های سیلان متفاوت، موجب تغییر شکل نامتقارن و در نتیجه کاهش ضخامت متفاوت دو لایه می‌شود. همچنین شرایط اصطکاکی در فصل مشترک، بسیار پیچیده‌تر است. نتایج حاصل از مدل‌سازی ریاضی فرآیند نورد سرد دو لایه نشان می‌دهد که در تغییر شکل نامتقارن، هنگامی که درصد تغییر شکل اعمالی کم است، فاصله‌ی نقطه‌ی خنثی تا ورودی غلطک‌ها روی سطح ورق سخت‌تر، کمتر از این فاصله روی ورق نرم‌تر است. با افزایش میزان کاهش ضخامت، این اختلاف به تدریج کاهش می‌یابد و حتی بر عکس می‌شود [۲].

موقعیت نقطه‌ی شروع اتصال تا حدودی به نسبت ضخامت دو لایه قبل از نورد بستگی دارد. کاهش ضخامت لایه‌ی روکش، موجب نزدیک‌تر شدن نقطه‌ی شروع اتصال به ورودی غلطک‌ها می‌شود. در نتیجه، تشکیل پیوند در فصل مشترک آسان‌تر می‌شود و به افزایش استحکام اتصال کمک می‌کند. به طور کلی، استحکام اتصال با افزایش میزان کل کاهش ضخامت، کاهش ضخامت اولیه‌ی یکی از ورق‌ها، افزایش قطر غلطک‌ها، افزایش زبری سطحی غلطک‌ها، کاهش سرعت نورد و کاهش تنش جلوکش و عقب‌کش افزایش می‌یابد [۲]. مکانیزم جوش سرد نوردی با نظریه لایه سطحی قابل توجیه است [۴]. قبل از جوش سرد، سطح فلزات پوشیده از لایه‌های آلودگی یا لایه‌های ترد و شکننده است. در حین نورد، این لایه‌ها در اثر تغییر شکل فلز شکسته و تماس فلز تازه در محل شکست لایه‌ها میسر می‌شود. فلز تمیز از میان ترک‌ها اکستروود شده و با فلز تمیز از ورق دیگر تماس برقرار کرده و جوش سرد (پیوند فلزی) ایجاد می‌شود [۵ و ۹]. در کمتر از یک تغییر شکل آستانه، اتصال مستحکمی بین دو فلز ایجاد نمی‌شود. علت این مسأله آلودگی‌هایی نظیر بخار آب جذب شده و هوای محبوس در فصل مشترک است که ایجاد اتصال را به تأخیر می‌اندازد. در صورتی که میزان تغییر شکل از حد آستانه فراتر رود، امکان تماس فلز تمیز از دو ورق فراهم و جوش ایجاد می‌شود [۱۰]. روش معمول برای عملیات سطحی در جوش سرد نوردی، استفاده از برس‌های ساینده‌ی فولادی پس از چربی زدایی سطح است. برسکاری در سطح فلزات، یک لایه کار سخت شده را به وجود می‌آورد که در مورد آلومینیوم ضخامت این لایه حدود $10 \mu\text{m}$ است. لایه‌ی برس خورده در سطح آلومینیوم پس از داخل شدن به فضای بین دو غلطک تحت تغییر شکل تقریبی ۵٪ به طور جزئی می‌شکند. ترک‌های ایجاد شده در این لایه در جهت عمود بر نیرو است و این از خصوصیات شکست ترد است. ترک‌های عرضی ایجاد شده با افزایش مقدار تغییر شکل، پهن‌تر می‌شود و فواصل بین قطعات لایه کار سخت شده افزایش می‌یابد. در ادامه‌ی این فرآیند، فلز زمینه ظاهر شده و پس از عبور از بین ترک‌های لایه کار سخت شده، موجب تشکیل اتصال می‌شود [۱۱ و ۱۲]. شکل (۱) مکانیزم این فرآیند را به خوبی نشان می‌دهد. در این شکل، t_0

و t_f به ترتیب ضخامت‌های اولتیه و نهایی را نشان می‌دهند و R_t و R_f به ترتیب میزان کاهش سطح مقطع آستانه و نهایی هستند.



شکل (۱): شکست لایه‌ی ترد سطحی پس از برس زدن [۱۲].

روش پژوهش

آلیاژهای آلومینیوم ۳۰۰۳ و ۴۰۴۳ به ترتیب به عنوان فلز پایه و روکش انتخاب شدند. در جدول (۱) ترکیب شیمیایی این آلیاژها که به روش شیمی تر حاصل شده، با ترکیب اسمی آنها مقایسه شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی مواد اولتیه بر حسب درصد وزنی.

آلیاژ	ترکیب شیمیایی	Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Al%
AA 3003	استاندارد	6/0	7/0	2/0-05/0	5/1-1	-	باقیمانده
	واقعی	4/0	6/0	1/0	1/1	-	باقیمانده
AA 4043	استاندارد	6-5/4	8/0	3/0	05/0	05/0	باقیمانده
	واقعی	1/6	4/0	2/0	03/0	05/0	باقیمانده

برای حذف کار سختی، عملیات حرارتی آنیل در دمای $400^{\circ}C$ بر آلیاژ 3003-H18 اجرا شد. برای پیدا کردن زمان مناسب عملیات آنیل، نمونه‌هایی در دمای مذکور درون کوره قرار گرفتند و بعد از گذشت زمان‌های متفاوت از ۱۰ تا ۱۰۰ دقیقه از کوره خارج شدند. با اندازه‌گیری سختی این نمونه‌ها، زمان بهینه‌ی تبلور مجدد آلیاژ در دمای مذکور به دست آمد. سختی نمونه‌های اولتیه و نمونه‌های عملیات حرارتی شده به روش برینل اندازه‌گیری شد. در این آزمون، از ساچمه‌ی فولادی به قطر ۲/۵ mm و نیروی ۱۵/۶۲۵ Kgf استفاده شد.

برای بررسی خواص مکانیکی مواد اولتیه از قبیل تنش تسلیم، استحکام کششی، میزان ازدیاد طول نسبی و توان کار سختی، نمونه‌های کششی از آلیاژهای 3003-H18، 3003-O و 4043-O مطابق با استاندارد ASTM E8M تهیه شد. کشش نمونه‌ها با استفاده از دستگاه INSTRON 6027 و با سرعت ۵ mm/min اجرا شد.

برای عملیات روکش دهی، یک دستگاه نورد دو غلطکه با قطر غلطک ۱۵۰ mm استفاده شد. قبل از اجرای عملیات نورد دو لایه، سطح غلطک‌ها با استون چربی زدایی شد تا شرایط اصطکاکی مناسب برای نورد فراهم شود. برای هدایت مناسب فلز پایه و روکش به ورودی غلطک‌ها و جلوگیری از لغزش و انحراف نمونه‌ها، از یک راهنما در ورودی غلطک‌ها استفاده شد.

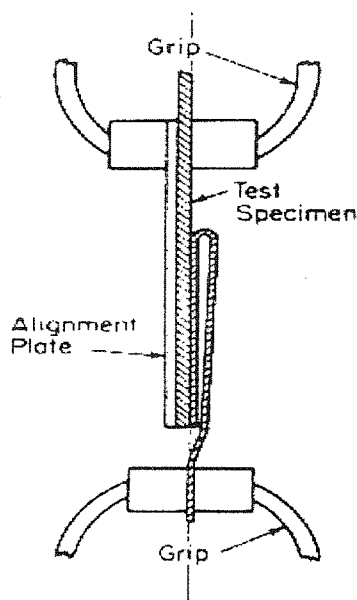
نمونه‌های اولتیه‌ی آلیاژ ۳۰۰۳ به شکل تسمه‌هایی با ضخامت ۲ mm تهیه شد. برای دستیابی به ضخامت‌های مطلوب، در ابتدا ضخامت تسمه‌ها به ۱/۲ و ۱/۵ mm کاهش یافت. نمونه‌های آلیاژ ۴۰۴۳ نیز به شکل تسمه‌هایی با ضخامت‌های ۰/۲۹، ۰/۳۵، ۰/۴۴ و ۰/۵۸ mm نورد شدند. طول و عرض همه‌ی نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۱۵۰ و ۱۷ mm انتخاب شد، و نمونه‌ها پیش از عملیات نورد دو لایه مجدداً آنیل شدند.

آماده سازی سطح، در دو مرحله چربی زدایی و برسکاری صورت گرفت. نمونه‌ها پس از دو مرحله چربی زدایی در استون، برس زده شدند. برای اجرای برسکاری از یک برس فولاد زنگ نزن که بر روی دریل نصب شده بود، استفاده شد. برس مورد استفاده دارای قطر ۱۰۰ mm و سیمهائی با طول ۳۰ mm و قطر ۰/۵ mm بود. سرعت دوران برس و نیروی عمود بر سطح در هنگام برسکاری تا حد امکان یکنواخت در نظر گرفته شد. ضخامت ورق‌های آلیاژی ۳۰۰۳ و ۴۰۴۳ (قبل از نورد) و ضخامت کامپوزیت دو لایه (بعد از نورد) در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): ضخامت نمونه‌ها قبل و بعد از نورد.

پیش از نورد		میزان کاهش سطح مقطع (%)	ضخامت کامپوزیت دو لایه پس از نورد (mm)
ضخامت ورق ۳۰۰۳ (mm)	ضخامت ورق ۴۰۴۳ (mm)		
۱/۰۰	۰/۲۹	۴۰	۰/۷۷
۱/۲۰	۰/۳۵	۵۰	۰/۷۷
۱/۵۰	۰/۴۴	۶۰	۰/۷۷
۰/۲	۰/۵۸	۷۰	۰/۷۷

عملیات نورد دو لایه در مورد همه‌ی نمونه‌ها یک مرحله‌ای اجرا شد. برای جلوگیری از ایجاد اتصال در سطوحی از فصل مشترک کامپوزیت که لازم است برای آزمون لایه‌کنی از هم باز شود، از گرافیت جامد استفاده شد [۱۳]. استحکام اتصال حاصل از نورد دو لایه به روش آزمون لایه‌کنی طبق استاندارد ASTM D 903-49 اندازه‌گیری شد. برای هم‌عرض کردن و همچنین حذف دندان‌های موجود در لبه‌ی نمونه‌های کامپوزیت، از دستگاه فرز استفاده شد که بدین ترتیب عرض همه‌ی نمونه‌ها پیش از آزمون لایه‌کنی به ۱۵ mm رسید. برای اجرای این آزمون، از دستگاه کشش INSTRON 6027 استفاده شد. شکل (۲) نمایی از نمونه و نحوه‌ی اجرای آزمون لایه‌کنی را نشان می‌دهد.



شکل (۲): نمونه آزمایش لایه‌کنی [۱۴].

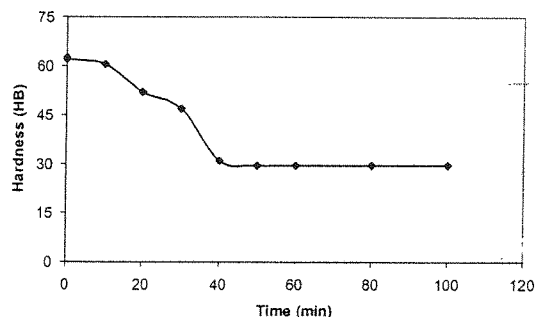
نتایج و بحث

برای به دست آوردن زمان مناسب آنیل برای آلیاژ 3003-H18 در دمای 400°C ، سختی این آلیاژ بر حسب مدت زمان نگهداری در این دما اندازه‌گیری شد (شکل ۳). یادآوری می‌شود که محدوده‌ی دمای مناسب تبلور مجدد برای آلیاژهای آلومینیوم بسته به میزان کار سرد $370-440^{\circ}\text{C}$ است [۱۳]. بنابراین، انتخاب دمای 400°C برای اطمینان از تبلور مجدد، انتخاب مناسبی به نظر می‌رسد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، تبلور مجدد و افت سختی آلیاژ مذکور در دمای

۴۰۰ °C بعد از گذشت ۴۰ دقیقه کامل می‌شود. شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب ریزساختار این آلیاژ را قبل و بعد از عملیات حرارتی نشان می‌دهند. اندازه‌گیری به روش ASTM نشان داد که اندازه‌ی دانه‌ها قبل از عملیات حرارتی ۶ بوده و پس از عملیات حرارتی به ۴ افزایش یافته است. همچنین، نتایج سختی سنجی آلیاژ ۴۰۴۳ نشان داد که سختی این آلیاژ در حالت کار سخت شده ۵۷ HB و در حالت آنیل ۲۶ HB است.



شکل (۴): ساختار میکروسکوپی آلیاژ ۳۰۰۳ در حالت کار سخت شده.



شکل (۳): تغییرات سختی آلیاژ 3003-H18 با زمان عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ °C.

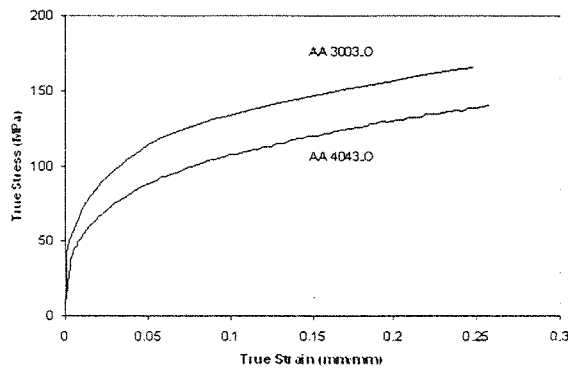


شکل (۵): ساختار میکروسکوپی آلیاژ ۳۰۰۳ در حالت آنیل.

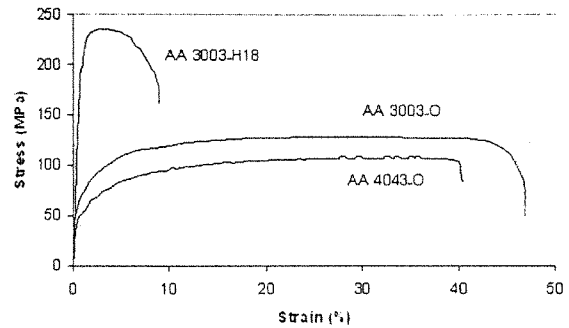
برای تخمین رفتار کارسختی آلیاژها و تعیین مشخصات مکانیکی آنها، آزمایش کشش بر روی نمونه‌های استاندارد از آلیاژ ۳۰۰۳ در دو حالت کارسخت شده و آنیل و از آلیاژ ۴۰۴۳ در حالت آنیل اجرا شد. شکل (۶) منحنی تنش مهندسی - کرنش مهندسی آلیاژهای ۳۰۰۳ و ۴۰۴۳ را نشان می‌دهد. خواص مکانیکی این آلیاژها در جدول (۳) آورده شده است. برای به دست آوردن ثوابت پلاستیک آلیاژهای ۳۰۰۳ و ۴۰۴۳ در حالت آنیل، ابتدا منحنی تنش حقیقی - کرنش حقیقی دو آلیاژ در حالت آنیل رسم شد (شکل ۷). سپس با رسم نمودار $\text{Log } \sigma - \text{Log } \epsilon$ ضریب و توان کار سختی دو آلیاژ به دست آمد (شکل ۸).

جدول (۳): خواص مکانیکی آلیاژهای 3003-H18 ، 3003-O ، و 4043-O.

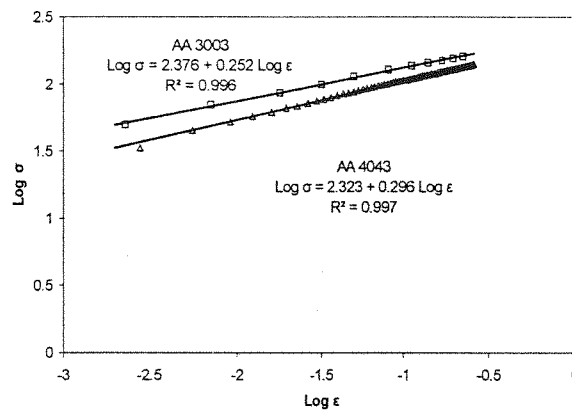
آلیاژ	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهانی (MPa)	ازدیاد طول نسبی (%)
3003-H18	۱۹۶/۷	۲۳۵/۷	۹/۱۲
3003-O	۵۸/۴	۱۲۸/۵	۴۶/۶
4043-O	۵۱/۷	۱۰۸/۷	۴۰/۶۸



شکل (۷): منحنی تنش حقیقی - کرنش حقیقی آلیاژهای 3003-O و 4043-O.



شکل (۶): منحنی تنش مهندسی - کرنش مهندسی آلیاژهای 3003-H18، 3003-O و 4043-O.



شکل (۸): نمودار Log σ - Log ε آلیاژهای 3003-O و 4043-O.

معادله‌ی کار سختی برای دو آلیاژ به صورت زیر است (σ و ε به ترتیب معرف تنش و کرنش حقیقی هستند):

$$\sigma = 237.6 \varepsilon^{0.252} \quad [\text{MPa}] \quad (1) \quad \text{آلیاژ } 3003$$

$$\sigma = 232.3 \varepsilon^{0.296} \quad [\text{MPa}] \quad (2) \quad \text{آلیاژ } 4043$$

معادلات فوق نشان می‌دهند که توان کار سختی و ضریب استحکام دو آلیاژ بسیار نزدیک است. با توجه به این که خواص مکانیکی دو آلیاژ مشابه یکدیگر است، پیش‌بینی شد که درصد کاهش سطح مقطع هر لایه، پس از نورد تقریباً برابر با درصد کاهش سطح مقطع کل باشد که نتایج آزمایشگاهی نیز این نکته را تأیید کرد. بنا بر این برای ایجاد یک لایه از روکش لحیم با ضخامت مورد نظر، باید ضخامت قبل از نورد آنرا از رابطه زیر به دست آورد:

$$t_0 = \frac{t_f}{1-r} \quad (3)$$

که در آن t_0 ضخامت اولیه، t_f ضخامت نهایی و r درصد تغییر شکل نورد است. این محاسبات از آنجا اهمیت دارد که برای رسیدن به یک ضخامت کاملاً معین از روکش و فلز پایه، روش سعی و خطا به هیچ عنوان جوابگو نیست و به یک تقریب قابل اطمینان از ضخامت اولیه ورق‌های روکش و پایه نیاز است. البته در هر صورت، رسیدن به ابعاد دقیق، مستلزم اجرای تعدادی آزمایش اولیه با ضخامت‌های نزدیک به مقادیر محاسباتی است.

شکل (۹) تصویر استریو میکروسکوپ از چند ورق دو لایه با ضخامت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در سمت چپ تصویر، یک کاغذ شطرنجی دیده می‌شود که نشان دهنده‌ی مقیاس اندازه‌گیری (mm) است. مرز روکش و فلز پایه، در تصویر به خوبی قابل تشخیص هستند. برای مثال، ضخامت روکش در نمونه‌ی انتهای سمت راست حدود $30 \mu\text{m}$ است. شکل (۱۰) تصویر میکروسکوپ نوری از ورق‌های دو لایه را پس از آنیل نشان می‌دهد. در این شکل، لایه‌های بالایی و پایینی به ترتیب آلیاژهای ۴۰۴۳ و ۳۰۰۳ هستند. همان گونه که در این تصویر دیده می‌شود، اتصال کاملاً یکنواختی در فصل مشترک ورق‌ها ایجاد شده است.

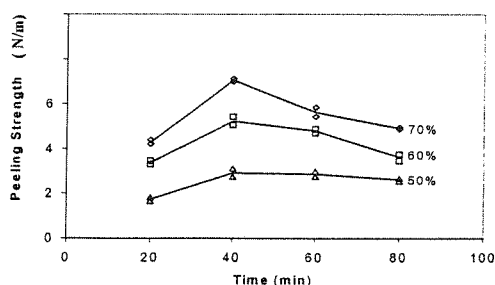


شکل (۱۰): تصویر متالوگرافی از فصل مشترک ورق دو لایه ۴۰۴۳/۳۰۰۳.



شکل (۹): تصویر میکروسکوپ استریو از ورق‌های دو لایه با ضخامت‌های مختلف.

شکل (۱۱)، نمودار تغییرات استحکام لایه‌کنی را برحسب زمان عملیات حرارتی 400°C نشان می‌دهد. آزمون لایه‌کنی، بهترین روش اندازه‌گیری استحکام باند حاصل از نورد دو لایه است. علت انتخاب روش لایه‌کنی 180° درجه به جای روش لایه‌کنی T، تکرار پذیری بیشتر نتایج در روش 180° درجه است [۱۵]. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش میزان کاهش سطح مقطع در فرآیند نورد دو لایه، استحکام باند افزایش می‌یابد. علت آن است که با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، بر میزان انبساط سطحی و وسعت منطقه بین ترک‌های اولیه افزوده می‌شود و در نتیجه، وسعت منطقه‌ی اتصال افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه دیگر آن که با افزایش زمان عملیات حرارتی، ابتدا استحکام اتصال نوردی افزایش و سپس به تدریج کاهش می‌یابد. علت این پدیده، با توجه به منابع موجود، قابل توجیه است [۱۳] و [۱۵]. عملیات حرارتی شرایط تبلور مجدد را فراهم می‌کند. آرایش مجدد اتمها در فصل مشترک دو لایه، موجب بازیابی قسمت قابل توجهی از خواص پلاستیک ماده می‌شود. اگر فرآیند باز شدن فصل مشترک، نوعی شکست حاصل از پیشروی ترک اولیه در فصل مشترک قلمداد شود، در دمای تبلور مجدد با افزایش چقرمگی شکست یک انتقال از شکست ترد (نمونه‌های کار سرد شده) به شکست نرم (نمونه‌های تبلور مجدد شده) رخ می‌دهد. چنین انتقالی با افزایش نیروی لازم برای باز شدن فصل مشترک و در نتیجه افزایش استحکام لایه‌کنی همراه است [۱۳]. به بیان دیگر، در نمونه‌های آنیل نشده و نمونه‌هایی که به طور کامل آنیل نشده‌اند، فصل مشترک باز شده‌ی نمونه در آزمایش لایه‌کنی، با اعمال یک نیروی کوچک مانند ترک سرتاسری گسترش می‌یابد و به شکست می‌انجامد. در حالتی که نمونه به طور کامل آنیل شده باشد، باز شدن فصل مشترک به دلیل وجود منطقه‌ی تغییر شکل پلاستیک بزرگتر در نوک ترک گونه آن، با مقاومت بیشتری روبرو است.



شکل (۱۱): تغییرات استحکام لایه‌کنی بر حسب میزان کاهش سطح مقطع و زمان عملیات حرارتی در دمای 400°C .

افزایش استحکام باند با افزایش زمان عملیات حرارتی را می‌توان با پدیده‌ی نفوذ نیز توجیه کرد. در صورتی که فازهای ترد در فصل مشترک دو لایه تشکیل نشود، نفوذ اتمی، موجب افزایش استحکام باند می‌شود. نفوذ اتمی، موجب حذف فصل مشترک و یکپارچه شدن دو لایه می‌شود [۱۵] و [۱۶]. سیر نزولی استحکام باند پس از رسیدن به حد اکثر، معمولاً غالب شدن مکانیزم‌های کاهنده‌ی استحکام است. با افزایش زمان عملیات حرارتی، پدیده‌ی رشد دانه‌ها موجب کاهش استحکام دو آلیاژ و در نتیجه کاهش استحکام باند می‌شود [۱۳].

از نمودار شکل (۱۱) می‌توان دریافت که مقدار افزایش استحکام باند در نمونه‌هایی که حین نورد، تغییر شکل بیشتری داده‌اند، بالاتر است. در توضیح این مطلب لازم است به مکانیزم تبلور مجدد اشاره شود. انرژی ذخیره شده در ماده‌ای که تحت کار سرد قرار می‌گیرد، نیروی محرکه‌ی لازم برای بازیابی و تبلور مجدد است. با افزایش میزان تغییر شکل، این نیرو افزایش و زمان لازم برای تبلور مجدد (در یک دمای خاص) کاهش می‌یابد [۱۷]. همچنین از آنجا که در تغییر شکل‌های بالاتر، سطح تماس واقعی دو لایه بیشتر است، امکان نفوذ اتمی افزایش می‌یابد و منجر به استحکام بالاتر می‌شود؛ علت این که آزمون لایه کنی در نمونه‌های با درصد کاهش سطح مقطع بالاتر از ۷۰٪ اجرا نشده آن است که در صورت کاهش سطح مقطع بیش از این مقدار، میزان افزایش استحکام باند به اندازه‌ی زیاد خواهد بود که نتایج آزمون لایه کنی قابل اعتماد نیست.

نتیجه گیری

بالاترین استحکام اتصال در ورق‌های دو لایه ($\sim 7 \text{ N/mm}$) در نمونه‌هایی با ۷۰٪ کاهش سطح مقطع و پس از ۴۰ دقیقه عملیات حرارتی در دمای 400°C به دست می‌آید. با افزایش زمان عملیات حرارتی بر روی ورق‌های دو لایه، ابتدا استحکام اتصال افزایش و سپس کاهش می‌یابد. افزایش استحکام اتصال ناشی از تبلور مجدد و نفوذ اتمی در فصل مشترک دو لایه و کاهش استحکام ناشی از رشد دانه است.

مراجع

- [1] J. A. Forster and S. Jha, "The Processing and Evaluation of Clad Metals", JOM, Vol. 6, 35-38 (1993).
- [2] J. Yong and P. Dashu, "Analysis of Clad Sheet Bonding by Cold Rolling", J. Mat. Process. Tech., Vol. 105, 32-37 (2000).
- [3] W. Zhang and N. Bay "Cold Welding - Experimental Investigation of the Surface Preparation Methods", Weld. J., Vol. 8, 326s-330s (1997).
- [4] H. A. Mohamed and J. Washburn, "Mechanism of Solid State Pressure Welding", Weld. J., Vol. 9, 302s-310s (1975).
- [5] H. R. Maddah-Hosseini and A. H. Kokabi, "Cold Roll Bonding of 5754 - Aluminum Strips", Mat. Sci. Eng., A335, 186-190 (2002).
- [6] N. Bay, "Cold Welding: Part II Process Variant and Application", Met. Const., Vol. 8, 486-490 (1986).
- [7] T. Tabata and S. Masaki, "Bond Criterion in Cold Pressure Welding of Aluminum", Mat. Sci. Tech., Vol. 5, 377-381, (1989).
- [8] ASM Handbook, "Solid State Welding", Vol. 6, 672-690 (1993).
- [9] W. Zhang and N. Bay, "Cold Welding - Theoretical Modeling of Weld Formation", Weld. J., Vol. 10, 417s-420s (1997).
- [10] L. R. Vaidyanath and M. G. Nicholas, "Pressure Welding by Rolling", Brit. Weld. J., Vol. 6, 13-28 (1959).
- [11] N. Bay, "Cold Welding: Part I Characteristic, Bonding Mechanism, Bond Strength", Met. Const., Vol. 6, 369-372 (1986).
- [12] P. K. Wright & Snow D. A., "Interfacial Conditions and Bond Strength in Cold Pressure Welding by Rolling", Met. Tech., 1978, pp. 24-31.
- [13] H. R. Maddah-Hosseini, "Cold Roll Bonding of 5754-Aluminum Alloy", M. Sc. Thesis, Faculty of Material Science and Engineering, Sharif Univ. of Tech. (1995).
- [14] ASTM, "Standard Test Method for Peel or Stripping Strength of Adhesive Bonds", Vol. 15.06, D903-49 (1989).
- [15] C. A. Harper, "Handbook of Plastics, Elastomers and Composites", Mc. Graw Hill, 2nd Ed., USA, 1996.
- [16] M. R. Baghestani, "Roll Bonding of Al-Sn Alloy to Steel", M. Sc. Thesis, Faculty of Material Science & Engineering, Sharif Univ. of Tech. (2002).
- [17] I. J. Butlin and Mackay, "Experiments on the Roll Bonding of Tin Coatings to Non-Ferrous Substrates", Sheet Met. Ind., Vol. 11, 1063-1072 (1979).

