بررسی پارامترهای مؤثر شکل‌دهی و ارائه مدل ریاضی برای جوش‌پذیری در کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیم - مس حین فرآیند ECAE

بهزاد طولمی‌نژاد[۱]، علی کریمی طاهری[۲]، حسین عربی[۳]، محمد شاهمیری[۴]

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی شریف

۳ و ۴- استاد، استادیار، دانشگاه علم و صنعت ایران

btolaminejad@iust.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، با استفاده از فرآیند اکستروژن در کانال زاویه‌دار همسان (ECAE)، در فصل مشترک لایه‌های تسمه دولایه Al/Cu یک جوش‌سرد نسبی ایجاد کرده و استحکام جوش تولید شده بررسی گردید. نتایج آزمایش‌ها مبین آن است که اندازه زوایای قالب، نسبت ضخامت و نحوه قرارگیری لایه‌ها بر امکان اتصال لایه‌ها تاثیر می‌گذارند. به این ترتیب که با افزایش زوایای داخلی و گوشه خارجی قالب، تغییر شکل آستانه برای ایجاد جوش افزایش می‌یابد. درحالیکه با کاهش نسبت ضخامت مس به آلومینیم و قراگیری لایه مسی در مجاورت زاویه داخلی جوش‌پذیری بالا می‌رود. همچنین به‌منظور شناخت ماهیت مورفولوژیکی فصل مشترک، سطوح شکست توسط میکروسکپ الکترونی روبشی مطالعه گردید و یک مدل ریاضی براساس تئوری‌های مکانیک شکست برای پیش‌بینی وضعیت فصل مشترک لایه‌ها ارائه گردیده است.

واژه‌های کلیدی:

کامپوزیت لایه‌ای، جوش سرد، اکستروژن در کانال زاویه‌دار همسان، آلومینیم / مس

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر ساخت چند لایه های فلزی با استفاده از فرآیندهای جوش سرد با توجه به خصوصیات قابل توجه و منحصر به‌فرد در خواص مکانیکی، الکتریکی و شیمیایی که از خود نشان می‌دهند، مورد توجه قرار گرفته است[۱].

به‌طور کلی جوش‌سرد ایجاد یک باند اتم به اتم بین اجزاء جوش

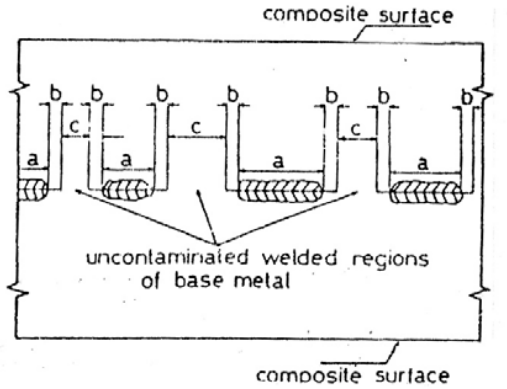
است که از انواع جوش‌کاری حالت جامد (SSW) بوده و از تاریخچه‌ای طولانی برخوردار می‌باشد. با توجه به تئوری، اگر دو سطح کاملا تمیز فلزی در حالت سرد به یکدیگر فشرده شوند، باند فلزی در فصل مشترک آنها ظاهر شده و دو سطح به همدیگر جوش سرد داده می‌شوند[۲].

تاکنون بر اساس نوع فرآیند مورد استفاده، چهار تئوری برای بیان مکانیزم ایجاد جوش‌سرد بین دو فلز توسط محققین ارائه گردیده است که شامل تئوری فیلم سطحی[۳]، تئوری سد انرژی[۴]، تئوری اتصال نفوذی[۵] و تئوری تبلور مجدد[۶] است.

براساس تئوری فیلم سطحی برای به‌وجود آمدن چنین باندی باید اتم‌های یک فلز به اندازه کمتر از 25nm به اتم‌های فلز دیگر نزدیک شوند تا نیروهای بین اتمی جهت ایجاد باند مؤثر واقع شوند[۷].

همزمان با ورود کامپوزیت لایه‌ای به منطقه تغییر شکل، لایه ترد سطحی که می‌تواند لایه اکسیدی و یا لایه ایجاد شده طی عملیات آماده‌سازی سطحی نظیر برس‌کاری باشد، ترک برداشته و فلز تمیز و بکر(virgin metal) زیرین از بین ترک‌های آن اکسترود می‌شود. طبق مشاهدات این فرآیند از مکانیزم نشان داده‌شده در شکل (۱) پیروی می‌کند[۸] و تنها مناطق تازه فلزی که پس از تغییر شکل آستانه(threshold deformation) ظاهر می‌شوند، در ایجاد جوش دخالت خواهند داشت[۹].

مطابق این مکانیزم در ابتدای تغییر شکل، فلز بکر بین ترک‌ها در اثر تماس با قطعات لایه سطحی و هوای محبوس در فصل مشترک، آلوده شده و توانائی جوش خوردن را از دست می‌دهد. با افزایش میزان تغییر شکل و گذر از حد آستانه، فلز تمیز با جریان یافتن روی مناطق مرده‌ای که در اطراف قطعات لایه برس خورده به‌وجود آمده‌اند، با فلز تمیز سمت مقابل فصل مشترک تماس یافته و باند فلزی را به‌وجود می‌آورد.



تغییر شکل آستانه شامل a) قطعات لایه برس‌کاری شده
b) فلز پایه آلوده جوش نخورده و
c) فلز پایه بکر جوش خورده[۸].

به‌منظور دست‌یابی به جوش‌سرد از چند دهه قبل از تکنیک‌های مختلفی استفاده شده‌است. به‌عنوان مثال می‌توان از کاربرد فرآیندهای نورد، فشار و کشش از داخل قالب نام برد[۱۰].

از طرفی امروزه جهت تولید مواد با استحکام بالا، روش‌های SPD با سرعت پیشرفت نموده‌اند و در حال گذر ازحالت آزمایشگاهی به صنعتی می‌باشند[۱۱].

فرآیند اکستروژن‌در کانال‌زاویه‌دار همسان(ECAE) یکی از متداول‌ترین این روش‌ها به‌شمار می‌رود. یک نمونه از انجام این فرآیند درون قالبی با طرح ساده و زاویه داخلی (φ) و گوشه خارجی (ψ) در شکل (۲) نشان داده شده‌است.

در این قالب نمونه در کانال عمودی قرار می‌گیرد و توسط سنبه‌ای به کانال افقی رانده می‌شود. تحت این شرایط به نمونه در حالیکه سطح مقطع آن بدون تغییر می‌ماند، حین خم‌شدن در کانال افقی کرنش بالایی بسته به هندسه قالب وارد می‌شود[۱۲].

هرپاس‌عبور (N) از قالب سبب ایجاد مقداری کرنش در ماده می‌شود. مقدار این کرنش از رابطه زیر قابل محاسبه است[۱۳]:

$$\bar{\varepsilon}_N = \frac{N}{\sqrt{3}}\left(2\cot\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right)+\psi\,\mathrm{cosec}\left(\frac{\varphi+\psi}{2}\right)\right) \qquad (۱)$$

جدول(۱): خصوصیات تسمه‌های اولیه مصرفی

نوع ماده	ترکیب شیمیایی	استحکام تسلیم (MPa)	ضخامت (mm)	طول (mm)
آلومینیم-1100	99Al ,0.6Si ,0.2Cu	34	9,10,11,12	45
مس خالص تجاری آنیل شده-OFHC	99.9Cu	68	2,3,4,5	45

۲- روش تحقیق

مواد مورد استفاده در تحقیق حاضر شامل تسمه‌هایی از جنس مس‌خالص تجاری (OFHC) آنیل شده وآلومینیمAA۱۱۰۰ می‌باشد. ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و ابعاد اجزاء فوق در جدول (۱) ارائه شده‌است. جزئیات مربوط به قالب‌های مورد استفاده نیز در جدول (۲) آمده‌است.

جنس قالب‌ها از فولاد SPK انتخاب گردید. قالب‌ها و سنبه‌های مربوطه همگی در دمای $۹۶۰^{0}C$ به‌مدت نیم‌ساعت تحت عملیات انحلال قرار گرفتند و سپس در محیط روغن سرد شدند. عملیات بازپخت نیز در دمای $۱۸۰^{0}C$ و ظرف ۴۵ دقیقه اعمال گردید.

ساخت این قالب با استفاده از طراحی دو تکه ضمن ساده نمودن عملیات ساخت، امکان خارج کردن نمونه در صورت گیرکردن در قالب را پس از فرآیند ECAE فراهم می‌سازد. روش آماده‌سازی سطح، شامل چربی‌زدایی و برس‌کاری به عنوان یک روش بهینه در ساخت دوفلزی‌های آلومینیم/مس مطرح می‌باشد. برای این کار ابتدا نمونه‌های آلومینیمی و مسی به‌وسیله استن شستشو شده و مجددا پس‌از برس‌زنی نمونه‌ها وارد حمام استن دوم شدند.

عملیات برس‌کاری با استفاده از یک برس سیمی خورشیدی با قطر ۷۰ میلی‌متر با سیم‌های فولادی با قطر ۰/۴ میلی‌متر تحت سرعت دورانی ۶۰۰ دور در دقیقه و مقدار پیشروی ۲ میلی‌متر بر ثانیه صورت گرفت.

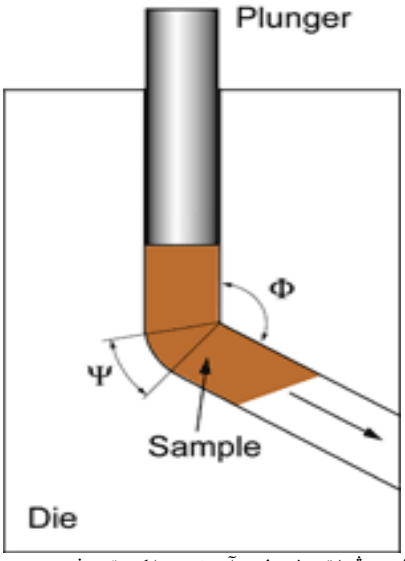
این فرآیند برای از بین‌بردن لایه‌های اکسید سطحی و همچنین ایجاد لایه کار سخت ترد روی سطح، جهت ایجاد جوش‌سرد در فصل مشترک بین لایه‌ها صورت گرفت. نهایتاً در مرحله اکسترود تسمه‌های مونتاژ شده، هر نمونه از قرار گرفتن یک لایه آلومینیمی کنار یک لایه مسی با بست مناسب تهیه شد.

این نمونه‌ها توسط یک دستگاه فشار امسلر با ظرفیت ۵۰ تن و با سرعت۲۰ mm/min تحت زوایای مختلف طی یک پاس اکسترود گردیدند.

از سولفید مولیبدن (MoS_2) به شکل اسپری جهت روانکاری سطوح کانال در مراحل مختلف استفاده شد. همچنین آزمایش استحکام برشی، جهت بررسی کیفی استحکام باند به‌کار گرفته‌شد.

به‌منظور بررسی مکانیزم جوش‌سرد در فرآیند اکستروژن در کانال زاویه‌دار همسان در کامپوزیت‌های فلزی، سطوح متصل و لایه‌کنی شده آلومینیم و مس در مقاطع مختلف توسط میکروسکوپ الکترونی با ولتاژ کاری ۲۰ kv مورد بررسی قرار گرفتند.

همچنین با استفاده از تحلیل‌گر EDS ماهیت فلزات اکسترود شده از ترک‌ها و ایجاد شده بر روی سطوح مشترک در حین تغییر شکل مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق از روش ویکرز برای میکروسختی‌سنجی سطح مقطع نمونه‌ها توسط دستگاه سختی‌سنج Reichelt مدلMD-4000 تحت بار ۶۰ g در عرضS ۵ استفاده شد.



شکل(۲) : شماتیک فرآیند اکستروژن در کانال زاویه‌دار همسان (ECAE)[۱۲].

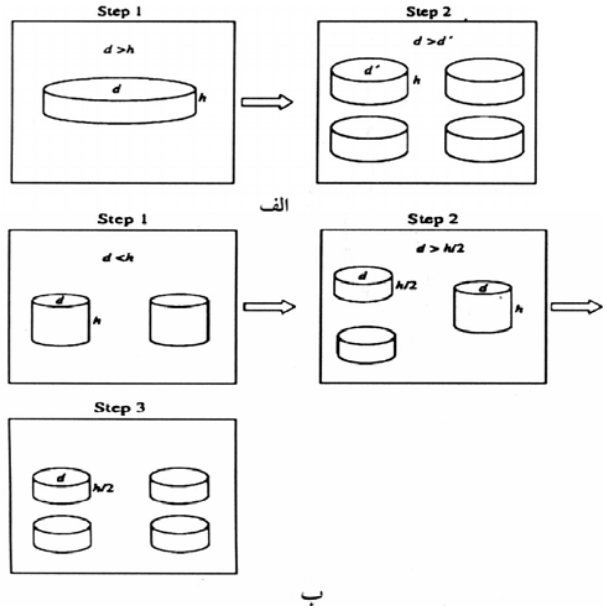
۳- نتایج و مباحث

ارائه مدل ریاضی

با توجه به مکانیزم بیان شده در شکل (۱) برای ایجاد جوش‌سرد، قطعات خردشده لایه اکسیدی پس از فرآیند ECAE دیسکی شکل در نظر گرفته شده و با توجه به تردی آنها از تغییر شکل پلاستیک در مقابل تغییر شکل الاستیک صرفنظر می‌گردد. بدین‌ترتیب از تئوری کرنش نرمال ماکزیمم شکست جهت پیش‌بینی نحوه توزیع این قطعات استفاده شده‌است.

تحت این شرایط دیسک‌های اکسیدی وابسته به ابعادشان تحت دو مد شکست خرد می‌شوند. به‌نحوی که وقتی قطر آنها بیش از ضخامت باشد، شکست در راستای جهت عمود بر سطح دیسک صورت می‌گیرد (شکل۳-الف) و در غیر این‌صورت شکست در راستای صفحه عمود بر محور دیسک اکسیدی رخ می‌دهد (شکل۳-ب).

تحت شرایط کرنش صفحه‌ای شکل اخیر، زمانی‌که میزان کرنش ε_{xo} لایه اکسیدی به کرنش شکست ε_{tl} برسد، ترک



شکل(۳): دو مد شکست مختلف قطعات اکسیدی دیسکی شکل در حالت (الف) بیشتر بودن قطر دیسک نسبت به ضخامت آن، (ب) بیشتر بودن ضخامت دیسک نسبت به قطر آن

ایجاد می‌گردد. بدین‌ترتیب میزان انرژی کرنشی بر واحد حجم لایه اکسیدی عبارتست از:

$$u = \int_0^{\varepsilon_{tl}} \sigma_{xo}.d\varepsilon_{xo} + \int_0^{\varepsilon_{tl}} \sigma_{yo}.d\varepsilon_{yo} = \frac{E_0.\varepsilon_{tl}^2}{1+\upsilon} = \frac{\sigma_t^2}{(1+\upsilon)E_0} \qquad (۲)$$

البته با توجه به تغییر شکل هم‌زمان فلز پایه می‌توان کرنش نظیر آن را به‌صورت $\Delta\varepsilon_{xm} = (\frac{E_0}{E_m}).\varepsilon_{tl}$ به‌دست آورد. لذا می‌توان حد آستانه بروز ترک را تعیین نمود:

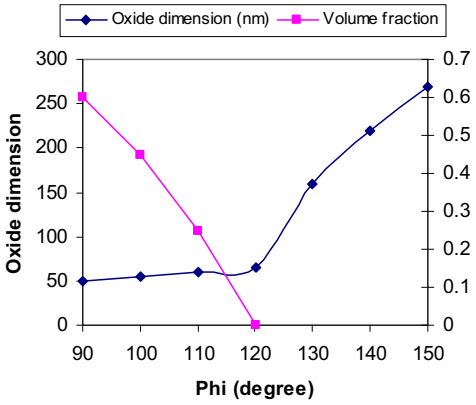
$$T = \frac{\varepsilon_{xmt}}{\Delta_{\varepsilon xm}} \qquad (۳)$$

لازم به ذکر است که E_0، E_m و ε_{xmt} به‌ترتیب بیانگر مدول یانگ لایه اکسیدی و فلز پایه و همچنین کرنش اصلی کششی فلز پایه می‌باشند. با توجه به روابط (۱) تا (۳) میزان انرژی کرنشی بر واحد حجم اکسید حین فرآیند ECAE مطابق route-A عبارتست از:

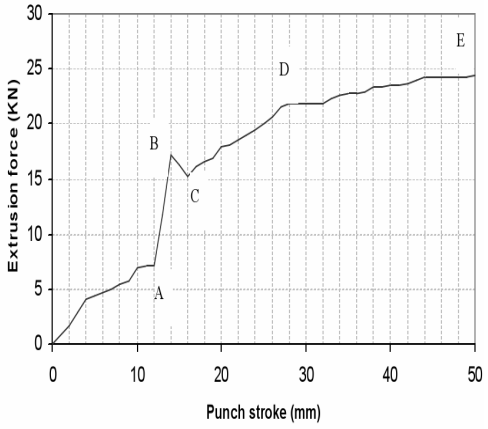
$$U = T.u = \frac{N.\sigma_t.E_m.\bar{\varepsilon}_N}{(1+\upsilon).E_0} \qquad (۴)$$

جدول۲- مشخصات ابعادی قالب‌های مورد استفاده در این تحقیق

φ (0)	ψ (0)	کرنش اعمالی تقریبی	سطح مقطع کانال (mm^2)	طول کانال ورودی (mm)	طول کانال خروجی (mm)
90	0	1	14×14	125	55
90	20	0.8	14×14	125	55
120	0	0.6	14×14	125	55



شکل (۴): تغییرات کسر حجمی و ضخامت قطعات اکسیدی پیوسته برحسب زوایای داخلی مختلف براساس مدل ارائه شده



شکل (۵): دیاگرام نیروی اکستروژن-پیشروی پانچ برای کامپوزیت Cu/Al در قالبی با پروفیل $\varphi=90^0$ و $\psi=0^0$

از طرفی با توجه به مدل‌های به‌دست آمده توسط سایر محققین[۱۵] می‌توان میزان کشیدگی سطحی را بر حسب میزان فصل مشترک اکسید - فلز باقیمانده محاسبه نمود:

$$S=\frac{2^n(1+f_n)}{h}+\frac{4}{d}-\frac{2}{h} \qquad (۵)$$

در این رابطه n تعداد مراتب خردایش قطعات و f_n کسر حجمی دیسک اکسیدی با ضخامت $\frac{h}{2^n}$ می‌باشد. بدین‌ترتیب می‌توان میزان انرژی کرنشی را با توجه به انرژی فصل مشترک بین اکسید و فلز پایه نیز به‌شکل زیر به‌دست آورد:

$$U=\gamma_{m\ o}.S \qquad (۶)$$

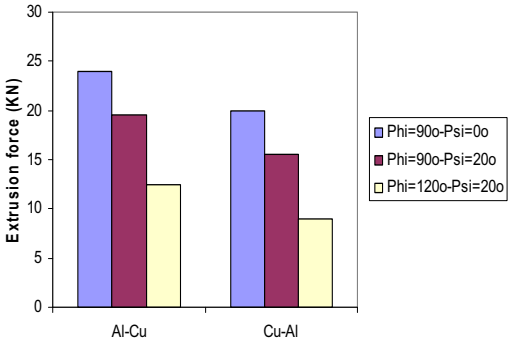
در این تحقیق در حالت پایای اولیه مقادیر ابعادی قطعات اکسید آلومینیم (Al_2O_3)، h=d=50nm در نظر گرفته شده‌است.

با توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی مورد استفاده در مدل ارائه شده که در جدول (۳) ارائه گردیده، مطابق شکل (۴) با استفاده از روابط (۴) تا (۶) حین فرآیند ECAE تا حدود زاویه ۱۲۰^0 مد شکست دوم حاکم است و قطر دیسک‌های اکسیدی تغییر نمی‌کند ولیکن با افزایش زاویه داخلی (φ-Phi) مد شکست اول غالب می‌گردد و ذرات اکسیدی با نسبت قطر به ضخامت بیشتری پراکنده می‌شوند.

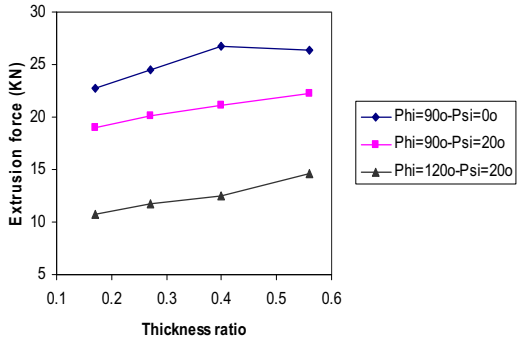
در شکل (۵) تصویر شماتیکی از نیروی اکستروژن بر حسب پیشروی پانچ برای کامپوزیت فلزی با نسبت ضخامت لایه‌ای

جدول(۳): برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی Al و Al_2O3 [۱۴].

کمیت	نشانه	مقدار	واحد
انرژی فصل مشترک Al/Al_2O_3	γ_{m-o}	1.39	(J/m^2)
استحکام فشاری Al_2O_3	σ_c	2548-1.63(T-273)	MPa
استحکام کششی Al_2O_3	σ_t	258.6-0.166(T-293)	MPa
ضریب پوآسون Al_2O_3	υ	$0.27+9.2\times10^{-5}$(T-293)	---
مدول یانگ Al_2O_3	E_0	374.6-0.154(T-293)	GPa
مدول یانگ Al	E_m	$72.2-3.56\times10^{-3}$(T-273)-9.2×10^{-5}(T-273)	GPa



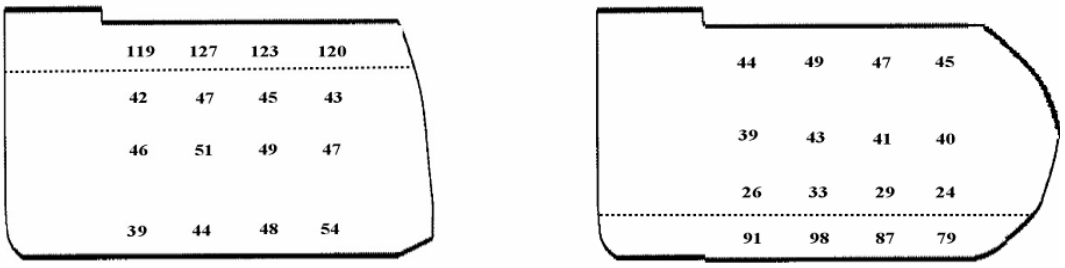
شکل (۶): تأثیر نحوه قرار گرفتن لایه‌ها در کامپوزیت‌های Cu/Al تحت زوایای داخلی و انحنای خارجی مختلف



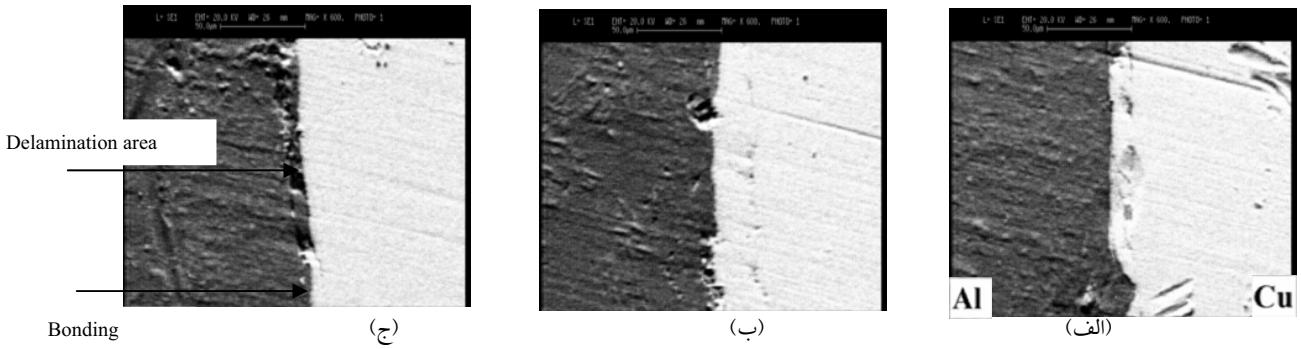
شکل (۷): تأثیر نسبت ضخامت لایه‌ها در کامپوزیت Cu/Al بر نیروی اکستروژن برای قالب‌های با پروفیل متفاوت

مس به آلومینیم 0.27 برای قالب با پروفیل $\varphi = 90°$ و $\psi = 0°$ نشان داده شده‌است. همچنانکه ملاحظه می‌شود نیروی اکستروژن با افزایش پیشروی پانچ به‌تدریج بالا می‌رود (از نقطه O به نقطه A). این افزایش به‌واسطه حرکت آسان اولیه کامپوزیت فلزی درون قالب می‌باشد و در ادامه میزان افزایش نیرو به‌طور ناگهانی ازدیاد یافته تا اینکه به نقطه B می‌رسد. این افزایش را می‌توان به‌دلیل ایجاد منطقه مرده دانست. در هر صورت پس از نقطه B نیروی اکستروژن به نقطه C خواهد رسید. دلیل این روند محدودیت کانال ثانویه قالب می‌باشد که منجر به فورج کامپوزیت می‌گردد. در واقع در ابتدای حرکت کامپوزیت، شرایط اصطکاک استاتیکی حکمفرما است.

ولیکن با پیشرفت فرآیند تغییر شکل، شرایط دینامیکی غالب گردیده و باعث افت اندکی در نیرو می‌شود (از نقطه B به C). اما از نقطه C تا D بر نیروی اکستروژن مجدداً با نرخ صعودی کمتری افزوده می‌شود که تا انتهای فرآیند ادامه می‌یابد. تنش تسلیم بالاتر لایه‌های کامپوزیتی سخت شده در کانال خروجی نسبت به لایه‌های کامپوزیتی که در کانال اولیه هنوز تغییر شکل نیافته‌اند، باعث افزایش تدریجی نیروی اکستروژن می‌گردد. نهایتاً نیروی اکستروژن ماکزیمم مربوط به نقطه E به‌عنوان نیروی حاصله در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۶) تأثیر جابه‌جایی مکان قرارگیری لایه‌ها با نسبت ضخامت ذکر شده بر نیروی اکستروژن برای قالب‌های با پروفیل‌های مختلف ارائه شده‌است.



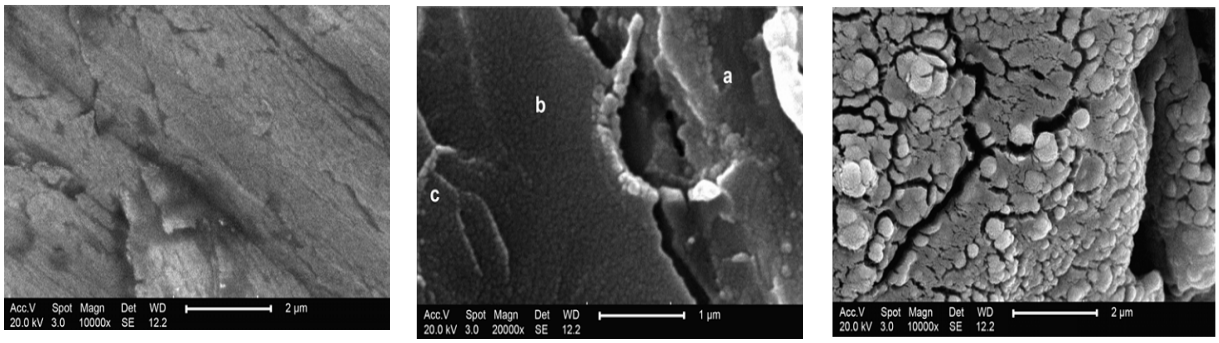
شکل (۸): مقادیر میانگین میکروسختی ویکرز($Hv(kg/mm^2)$) از فصل مشترک نمونه اکسترود شده از قالبی با $\varphi=90^0$ و $\psi=20^0$ در طرح شماتیکی از کامپوزیت‌های اکسترود شده نهایی (الف)Al-Cuو(ب)Cu-Al



شکل (۹): تصویر میکروسکپی از مقطع اتصال نمونه‌های اکسترود شده با قالب‌های مختلف
(الف)$\psi=0^0-\varphi=90^0$، (ب)$\psi=20^0-\varphi=90^0$ و (ج)$\psi=20^0-\varphi=120^0$

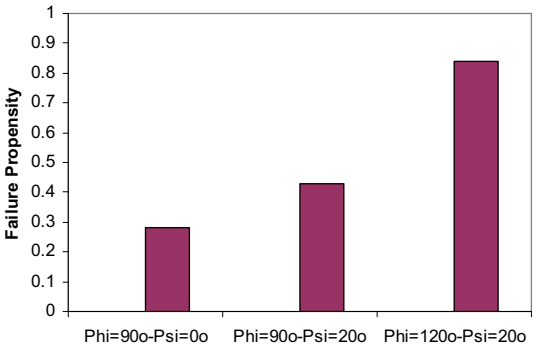
با توجه به این شکل می‌توان دریافت با افزایش زاویه داخلی (φ) شبیه تاثیر زاویه گوشه انحنای خارجی(ψ:Psi)، نیروی اکستروژن کاهش می‌یابد[۲۱ و۱۶]. البته لازم به‌ذکر است که تحت این شرایط نقش زاویه داخلی غالب می‌باشد[۱۸]. از طرفی با قرارگرفتن لایه سختتر مسی در مجاورت زاویه داخلی (حالت Al/Cu) نیروی اکستروژن افزایش می‌یابد. همچنین شکل (۷) بیانگر این است که با افزایش نسبت ضخامت لایه‌ها، نیروی اکستروژن افزایش می‌یابد که این روند صعودی مخالف تأثیر زوایای پروفیل قالب می‌باشد.

در شکل (۸) توزیع میکروسختی اندازه‌گیری شده از فصل مشترک کامپوزیت‌های لایه‌ای Al/Cu و Cu/Al با نسبت لایه‌ای ثابت 0.27 اکسترود شده توسط قالبی با زوایای $\varphi=90^0$ و$\psi=20^0$ آمده‌است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، میزان سختی زمانی‌که لایه مسی در مجاورت زاویه داخلی قرار گرفته‌است، افزایش می‌یابد. تصاویر میکروسکپ الکترونی مربوط به فصل مشترک نمونه‌های کامپوزیتی Al-Cu عبوری از قالب‌های مختلف نیز در شکل (۹) نشان‌داده شده‌است. همچنانکه ملاحظه می‌گردد، می‌توان دریافت که بیشترین پیوستگی در فصل مشترک لایه‌های کامپوزیتی مربوط به نمونه عبوری از قالبی با پروفیل $\varphi=90°$ و$\psi=20°$ به نحوی که لایه مسی در مجاورت زاویه داخلی قرار گرفته‌باشد، است. در این ارتباط شکل (۱۰-الف) مربوط به‌سطح مسی لایه کنی شده نمونه مزبور می‌باشد.

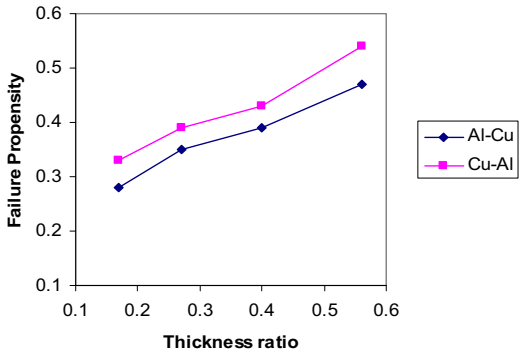


(ج) (ب) (الف)

شکل ۱۰- تصویر SEM از الف:سطح مس لایه‌کنی شده ،ب:سطح آلومینیم لایه‌کنی شده در نمونه عبوری از قالبی با $\psi=20^0$-$\varphi=90^0$ و ج:سطح مس لایه‌کنی شده نمونه عبوری از قالبی با $\psi=20^0$-$\varphi=120^0$



شکل (۱۱): تغییرات تخریب باند کامپوزیت‌های Al/Cu اکسترود شده از قالب‌های با پروفیل هندسی مختلف



شکل (۱۲): تغییرات کسر تخریب باند بر حسب نسبت ضخامت لایه‌ها در دو چیدمان متفاوت از لایه‌های مس و آلومینیم

همان‌طورکه مشاهده می‌شود بر روی سطح مس شبکه گسترده‌ای از ترک وجود دارد که این ترک‌ها در جهات مختلف تشکیل شده‌اند. بعضی از آنها به‌طور قابل توجهی در طول و پهنا رشد کرده و بعضی دیگر در ابعاد کوچک‌تر باقی مانده‌اند. اما در نقطه متناظر این سطح روی لایه آلومینیمی (شکل ۱۰-ب) تصویری متفاوت از لحاظ ظاهری دیده‌می‌شود. فقط یک ترک یا در واقع یک شیار در وسط تصویر دیده‌می‌شود. همچنین از مقایسه این تصویر با تصویر مربوط به نمونه مشابه عبوری از قالبی با زوایای با $\varphi=120^0$ و $\psi=20^0$ می‌توان دریافت که میزان ترک‌های سطحی به‌دلیل اعمال کرنش کمتر در نمونه اخیر بسیار کاهش یافته است(شکل ۱۰-ج). نهایتاً با توجه به شکل (۱۱) می‌توان بیان نمود که با افزایش زوایای داخلی و انحنای خارجی قالب، با توجه به نتایج تجربی و به‌کارگیری آنالیز آماری ANOVA امکان تضعیف جوش (failure propensity) افزایش می‌یابد. البته لازم به‌ذکر است که تأثیر افزایش زاویه داخلی در این ارتباط بسیار موثرتر بنظر می‌رسد. از طرفی نتایج حاصل از تأثیر نسبت ضخامت و نحوه قرارگیری لایه‌ها بر استحکام باند در شکل (۱۲) نشان داده شده‌است. همچنانکه ملاحظه می‌شود با کاهش نسبت ضخامت

لایه‌ها یا کاهش ضخامت لایه مسی بالاخص تحت شرایط قرارگیری این لایه در مجاورت زاویه داخلی φ امکان برقراری جوش‌سرد علیرغم کاهش نیروی اکستروژن (شکل۷)، افزایش یافته‌است.

با توجه به شکل (۶) در واقع کاهش اندکی در زاویه داخلی φ سبب افزایش عمده‌ای در نیروی اکستروژن می‌گردد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از قالب‌هایی با زوایای φ کوچک و ψ بهینه اکستروژن لایه‌های با داکتیلیته پایین امکان‌پذیر می‌باشد. همچنین مطابق یافته‌ها، با افزایش نسبت ضخامت لایه‌ای، نیروی اکستروژن افزایش یافته‌است. این افزایش به‌دلیل ازدیاد تنش سیلان معادل کامپوزیت فلزی است که به‌طور عمده به تنش تسلیم لایه سخت مسی وابسته است[۲۳و۲۲]. اما از طرفی اتصال نسبی تشکیل شده در فرآیند ECAE را می‌توان به دو عامل فرآیندی وابسته دانست. عامل اول میزان کشیدگی سطحی (تعداد و اندازه ترک‌های تشکیل شده) و عامل دوم میزان نیروی اعمالی بر سطوح منبسط شده می‌باشد. در این راستا میزان جوش پذیری با افزایش زاویه داخلی و زاویه انحنای خارجی با توجه به کاهش کرنش اعمالی که عامل اصلی در باز شدن ترک‌های عرضی و اکسترود فلزات بکر طرفین به سمت یکدیگر جهت ایجاد جوش‌سرد می‌باشد، کاهش می‌یابد شکل (۱۱) و (۱۲). این نتایج با کاهش کرنش اعمالی جهت افزایش میزان کشیدگی سطحی(surface expansion) و فشار اعمالی شکل (۷) و نهایتاً عدم پیوستگی مناسب در فصل مشترک شکل (۹-ج) مطابقت دارد. همچنین دلیل افزایش استحکام باند با کاهش ضخامت لایه مسی را می‌توان به میزان کرنش اعمالی بالاتر در فصل مشترک لایه‌ها مربوط دانست. در واقع با نیروی کمتری کرنش مورد نیاز در ابتدای منطقه تغییر شکل سریعتر به‌دست می‌آید و بدین‌ترتیب زمان اعمال نیرو جهت بهبود جوش‌پذیری افزایش می‌یابد[۲۴]. این موضوع بالاخص در حالت قرارگیری لایه مسی در مجاورت زاویه داخلی φ با نتایج سختی‌سنجی از نواحی اطراف فصل مشترک اتصال همخوانی خوبی دارد. به‌طور کلی در فرآیند ECAE دو عامل همزمان موجب افزایش سختی ماده می‌شوند. نخست استحکام بخشی از طریق مرز دانه‌ها است که در این فرآیند، مرز دانه‌های زاویه بزرگ با اندازه کوچکتر ایجاد و از طریق رابطه Hall-Petch باعث افزایش سختی می‌شوند. همچنین استحکام بخشی از طریق افزایش دانسیته نابجایی‌ها است که به‌دلیل کرنش‌های پلاستیک زیاد در لایه‌ها ایجاد و از طریق رابطه کارسختی(افزایش استحکام با مجذور دانسیته نابجایی‌ها) باعث استحکام بخشی می‌گردد[۲۵]. تحت این شرایط می‌توان ترک‌های باز شده بیشتری را ناشی از شکست فیلم اکسیدی روی لایه کار سخت شده اولیه توسط برس‌کاری به‌واسطه سختی ثانویه حین فرآیند ECAE، جهت اکستروژن فلزات بکر طرفین انتظار داشت. در تحلیل پدیده جوش‌پذیری با توجه به سطوح لایه‌کنی شده، همچنانکه در شکل (۱۰-ب) دیده می‌شود، در طرفین ترک در سطح لایه‌کنی شده، دو منطقه به‌چشم می‌خورد. یکی منطقه قرار گرفته در سمت راست آن که دارای سطحی روشن و برجستگی‌های بزرگ می‌باشد و دیگری منطقه قرار گرفته در سمت چپ شیار که دارای سطحی تیره و البته با برجستگی‌هایی ظریف و پولکی شکل می‌باشد. براساس انجام آنالیز EDS در این مناطق درصد اتمی مس در نقطه a واقع در منطقه روشن ۴۲ درصد و در نقطهb واقع در منطقه تیره ۲/۵ درصد اندازه‌گیری شد. در واقع روشنی منطقه راست شیار، ناشی از بقایای اکستروژن از ترک‌های سطحی می‌باشد. بدین‌ترتیب تحت شرایط گذر از حد آستانه تغییر شکل($\bar{\varepsilon}_n$=1) برای قالب با ψ=0°-φ=90° بر روی سطوح در اثر کشیدگی طولی مجموعه‌ای از ترک تشکیل می‌شود و تماس فلز بکر اکسترود شده از هر کدام از این ترک‌ها در فصل مشترک، می‌تواند منجر

به ایجاد جوش‌سرد بین این دو سطح گردد. رگه‌های سفید موجود در منطقه c در شکل (۱۰- ب) فلز تازه اکسترود شده از چند ترک را نشان می‌دهد که در تماس با سطح مجاور ایجاد اتصال کرده و بر روی سطح باقی مانده‌است. در حالیکه جوش پذیری پایینی را براساس شکل (۱۱) و (۱۰- ج) می‌توان برای کامپوزیت اکسترود شده تحت تغییر شکل کمتری از حد آستانه ($\bar{\varepsilon}_{\prime\prime}$=0.6) درون قالبی با $\psi=20^\circ-\varphi=120^\circ$ با درصد کشیدگی سطحی ناچیز ملاحظه نمود. با توجه به تئوری فیلم سطحی به‌عنوان مکانیزم جوش‌سرد می‌توان دلیل وجود تغییر شکل آستانه و کاهش جوش پذیری بین لایه‌ها با کاهش میزان تغییر شکل را توجیه کرد[۲۶]. در واقع با توجه به مدل ارائه شده در شکل(۳) و(۴)، زیر حد آستانه ($\varphi\approx 120^o$) به‌دلیل پراکندگی ذرات اکسیدی با نسبت بالای قطر به ضخامت (افت کسر حجمی قطعات با ضخامت h/2 نسبت به قطعات به ضخامت h)، مکان‌های میکرو کنتاکت سطحی جهت رسیدن فلزات بکر طرفین از میان آنها کاهش می‌یابد.

٤- نتیجه‌گیری

۱-با توجه به اینکه زاویه داخلی قالب از تأثیر بالاتری نسبت به زاویه انحنای خارجی در افزایش نیروی اکستروژن برخوردار است، لذا به‌کارگیری قالبی با زاویه داخلی کوچک اما زاویه انحنای بهینه جهت نیاز به نیروی اکستروژن کمتری در تغییر شکل کامپوزیت‌های دوفلزی با داکتیلیته کم و نیل به جوش‌سرد بهتراست.

۲-افزایش زاویه انحنای خارجی به‌واسطه محدود نمودن ضریب اصطکاک برازدیاد نیروی اکستروژن بهینه است ولیکن به‌دلیل تضعیف کرنش موثر جهت ایجاد جوش‌سرد، کاهش این زاویه به‌ویژه در قالب‌هایی با زاویه داخلی بزرگ نظیر 90^0، از ۲۰ به 0^0 با عبور از حد آستانه تغییر شکل، جوش پذیری را بهبود می‌بخشد.

۳-با کاهش نسبت ضخامت لایه‌های مس به آلومینیم از ۰/۵۶به ۰/۱۷ و قرار دادن لایه سخت مسی در مجاورت زاویه داخلی، علیرغم کاهش نسبی نیروی اکستروژن، جوش پذیری تا حدود ۳ برابر افزایش می‌یابد.

۴-ایجاد جوش‌سرد بین لایه‌ها مستلزم کشیده‌شدن المان‌های سطحی روی هم برای ایجاد ترک توسط کرنش حداقلی براساس مدل ارائه شده با زاویه انحنای خارجی 120°، اعمال فشار در فصل مشترک لایه‌ها به‌منظور اکسترود شدن فلزات تازه زیرین‌سطح از میان ترک‌ها و زمان بهینه برای در معرض هم قرار گرفتن فلزات تازه اکسترود شده برای به‌وجود آمدن پیوندهای فلزی طی عبور نمونه در کانال خروجی می‌باشد.

٥- مراجع

[1]. R. F. Tylcote, "Investigation on pressure welding", Brit. Weld. J, 5, 117-134, 1994.

[2] R. Dixon "Introduction to solid state welding", ASM Metals Hand book, Vol.6, pp.140-142.

[3] .N. Bay, "Cold welding part 2, process variants and applications", Metal construction, 486-490, 1986.

[4] N. Bay,"Cold welding: part 1, Characteristic, bonding mechanisms, bond strength", Metal construction, 369-372, 1986.

[5] P. Bilmes, A.C. Gonzales, J.C.Cuyas,"Barrier interlayer in explosive cladding of aluminum to steel", Metal construction, 113-114, 1988.

[6] H.Granjun, "Fundamental of Welding Metallurgy", Abginton publishing, Cambridge, pp.1-25, 1991.

[7] J. Parks,"Recrystallization welding",Welding Journal, 209-221,1953.

[8] N. Bay, "Cold welding characteristics and bond strength", J. Material construction, 18, 369, 1986.

[9] H. Kreye, K.Thomas,"Electron microscopic investigation on bond mechanism of cold pressure welding", J.welding and cutting, 29, 249, 1977.

[10] P.K.Wright,D.A.Snow,"Interfacial conditions in cold pressure welding ", Metals Technology, 24, 1978.

[11] V.M.Segal," Materials Processed by simple shear", Mater.Sci.Eng.A.197,157-164,1995.

[12] V.V.Stlyarov, R.Lapovok,"Effect of back pressure on structure and properties of AA5083 alloy processed by ECAP", Journal of Alloys and Compounds, 378, 233-236, 2004.

[13].Y.Iwahashi, Z.Horita, M.Nemoto, T.G.Langdon,"Principle of equal channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials", Scr.Mater.35, 143-146,1996.

[14] G.V.Samsonov, "Oxide Hand book", IFI/Plenum Data corporation, New York, NY, 1982.

[15] Y.J.Lin,Y.Z.Zhou,"Modeling of oxide break up during forging of reactively gas-atomized aluminum powders", Metall.Mater.Trans.A, 36, 177-186,2005.

[16] R.E.Goforth,K.T.Hartwig, L.R.Cornwell,"Severe plastic deformation of materials by equal-channel angular extrusion(ECAE)",in:T.C.LOWE,R.Z.Valiev(Eds.),Investigations and application of severe plastic deformation, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 3-12,2000.

[17] H.Cui,"Computational modeling of equal channel angular extrusion", Ph.D.Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University, College station, TX, 1996.

[18] J.Alkorta, J.G.Sevillano, "A comparison of FEM and upper-bound type analysis of equal-channel angular pressing (ECAP)", J.Mat.Process.Technol.141, 313-318, 2003.

[19] B.S.Altan, G.Purcek, I.Miskioglu, An upper-bound analysis for equal-channel angular extrusion, J.Mat.Process.Technol.168, 137-146, 2005.

[20] D.N.Lee, "An upper-bound solution of channel angular deformation", Scr.Mater, 43, 115-118,2000.

[21] C.J.Luis Perez, "Upper bound analysis and FEM simulation of equal fillet raddi angular pressing", Model.Simul.Mater.Sci.Eng, 12, 205-214, 2004.

[22] H.Danesh Manesh, A.Karimi Taheri,"Theoretical and experimental investigation of cold rolling of tri-layer strip", J.Matr.Process.Technol, 166, 163-172, 2005.

[23] M.Movahedi, H.R.Madaah-Hosseini, A.H.Kokabi,"The influence of roll bonding parameters on the bond strength of Al-3003/Zn soldering sheets",Mater.Sci.and Eng.A,243,215-221,2008.

[24] J.Yong, P.Dashu, L.Dong,"Analysis of superplastic forming processes using a finite-element method ", J.Mater.Process.Technol, 105, 32-37, 2000.

[25] K.O.Ishi, Z.Horita, M.Furukawa,"Optimizing thre rotation conditions for grain refinement in equal-channel angular extrusion", Metallurgical and Materials Transactions, 29, 2011-2013, 1998.

[26] H.Danesh Manesh, A.Karimi Taheri,"Study of mechanisms of cold roll welding of Aluminum alloy to steel strip", J. of.Mat.Sci. and Tech, 20, 1064-1068, 2004.