

مطالعه تجربی تولید آلومینیوم نانو ساختار با استفاده از روش اتصال فشاری جمعی

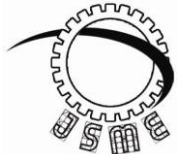
سعید شهرکی^۱، محسن مطهری نژاد^{۲*}

* نویسنده مسئول: mmotaharinezhad@gmail.com

واژه‌های کلیدی	چکیده
نانوساختار	در این مقاله روش اتصال فشاری تجمعی که روش جدید تغییر شکل پلاستیک
استحکام	شدید برای تولید فلزات نانوساختار حجیم بر پایه فشردن در قالب کانالی است مورد
کرنش	مطالعه قرار می‌گیرد. این فرآیند بر روی یکی از پرکاربردترین فلزات در صنعت
قالب کانالی	یعنی آلومینیوم انجام شده است. با بررسی و تحلیل نمونه‌ها مشخص شد که استحکام
آلومینیوم ۱۰۵۰	کششی نهایی پس از چهار مرحله فرآیند به حدود ۲ برابر نمونه آنیل شده افزایش
تاریخ ارسال: ۹۵/۰۶/۰۶	یافته و از ۶۰ به ۱۲۳ رسیده است. ساختار اولیه با دانه‌های خشن $6-8 \mu\text{m}$ به
تاریخ بازنگری: ۹۵/۱۰/۱۵	ساختاری با اندازه سلول‌های $1/2 \mu\text{m}$ در اولین پاس کرنش دهی، 627 nm بعد از
تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۱	پاس چهارم، تبدیل شده است. همچنین سختی ویکرز نمونه‌ها پس از چهار پاس
	فرایند از ۲۰ به $51/8$ می‌رسد. این بهبود خواص از جمله افزایش استحکام و سختی
	و دستیابی به نسبت استحکام به وزن بالا می‌تواند به گسترش کاربرد این مواد جهت
	سبک‌سازی مؤثر سازه در صنایع خودروسازی و هواپیماسازی کمک شایانی نماید.

۱- عضو هیئت علمی گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، ایران.

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران.



Experimental Investigation of Nano-structured Aluminum Production Using Accumulative Channel-die Compression Bonding (ACCB)

Saeed Shahraki¹, Mohsen Motaharinezhad^{2,*}

* Corresponding Author: mmotaharinezhad@gmail.com

Abstract:

In this paper, the Accumulative Channel-die Compression Bonding (ACCB) method is investigated as a new method of severe plastic deformation to produce Nano-crystalline bulk metals on the basis of pressing in a channel mold. Aluminum as One of the most usable metal in industry is processed using this method. Analyzing the processed samples show that after four passes of ACCB method, the ultimate strength of samples reaches to 120 from 60 Mpa. The grain sizes of samples reaches to 627 nm from 8-6 μ m in annealed phase after four passes of ACCB method. Also, the vicker's hardness of samples reaches to 51.8 from 20 HV after four passes. These changes consist of the increasing the hardness and strength of aluminum sample and achieving to the high ratio of strength to weight of sample can help us to better use this materials to fabricate less weight structures for using in automotive and airplane industry.

Key words:

Nanostructure.
Strength.
Strain.
Channel mold.
Aluminum 1100.

1- Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Zabol University, Iran.

2- South Tehran Branch, Islamic Azad University, Young Researchers and Elite Club, Tehran, Iran.

۱- مقدمه

می‌شوند. مثال‌های این روش شامل: تراکم گاز خنثی [۲]، رسوب الکترونی [۳] و فرز کاری ساچمه‌ای با جامد شدن متوالی [۴]. این روش‌ها توانایی تولید مواد با اندازه دانه بسیار ریز را دارند، ولی آن‌ها دارای معایبی نیز هستند. از آنجائیکه همواره اندازه‌های محصول نهایی بسیار کوچک است، آلودگی‌هایی در طی پروسه ایجاد شده (برای مثال از فرآیند فرز کاری ساچمه‌ای) و مقدار کمی تخلخل باقیمانده نیز وجود خواهد داشت.

در روش "بالا به پایین" از به وجود آمدن آلودگی و تخلخل به خاطر استفاده از مواد جامد توده‌ای (حجم) ۸ با اندازه دانه‌ای نسبتاً درشت و تحت فرایند قرار دادن به منظور بهبود اندازه دانه تا حداقل سطح زیر میکروسکوپی جلوگیری می‌کند. اکنون چندین روش ممکن برای انجام این پروسه بر روی مواد جامد حجیم وجود دارد، اما همه این روش‌ها بر اعمال کرنش شدید و در نتیجه آن ایجاد دانسته نابجایی بسیار بالا استوار است. از آنجائیکه این روش‌ها، تغییر شکل پلاستیکی شدید بر روی مواد ایجاد می‌کنند، توضیح همه این روش‌ها با استفاده از اصطلاح کلی فرآیند روش تغییر شکل پلاستیک شدید راحت‌تر است. روش تغییر شکل پلاستیک شدید به عنوان یکی از روش‌های تولید مواد با اندازه دانه نانومتری می‌باشد، اولین مشاهدات تولید ساختار بسیار ریزدانه با این روش در سال ۱۹۹۰ در ادبیات علمی جهان مطرح شد. از دیدگاه تاریخ علمی، روش‌های SPD نسبتاً جدید به حساب می‌آیند و پیشرفت‌های آنها مربوط به پنجاه سال اخیر است. البته نقطه‌ی آغازین این تکنولوژی مربوط به تحقیقات بریجمن در آمریکا می‌باشد. در مطالعات بریجمن، فلزات در معرض فشار و کرنش‌های زیاد قرار گرفتند تا خواص مکانیکی آنها ارتقاء یابد [۵]. روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید به دلیل بهبود خواص مکانیکی، فیزیکی، سایشی و ... فلزات و آلیاژها از طریق ریز کردن

با توجه به پیشرفت علم و تکنولوژی در عصر حاضر و پیشرفت روزافزون صنعت، دیگر مواد و ساختارهای مرسوم کارآمد نبوده و نیاز به مواد با خواص برتر احساس می‌شود. در چند دهه اخیر تلاش‌های زیادی در جهت کاهش وزن سازه‌های فلزی، از طریق جایگزینی قطعات فولادی با ساختارهای آلومینیومی صورت گرفته است. اما آلومینیوم خالص به تنهایی تمام ویژگی‌های مورد نیاز سازه را دارا نیست بنابراین پژوهش و تحقیق در زمینه بهبود خواص آلومینیوم با استفاده از فرآیندهای ثانویه توسعه یافته است. فناوری مواد با ساختار ریزدانه از جمله زمینه‌هایی است که در این دهه بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. هدف از این فناوری دستیابی به سازه‌هایی با وزن پایین و استحکام بالا و خواص مکانیکی بهینه است. با وجود فرآیندهای گسترده در این زمینه، اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید تنها روش قابل قبول برای تولید این مواد در مقیاس وسیع می‌باشد.

مواد حجیم با دانه‌های خیلی ریز، مواد حجیمی هستند که دارای میکرو ساختار همگن و متقارن با میانگین اندازه دانه کمتر از $1\mu\text{m}$ و اکثر دانه‌ها دارای مرزدانه با زاویه زیاد بدون جهت‌دهی منظم می‌باشند. ساختارهای UFG_۲ به موادی تقسیم می‌شوند که اندازه دانه‌ای در حد چند میکرومتر دارند و مواد نانو کریستال واقعی با اندازه دانه‌ای کمتر از 500nm هستند. مواد با میکروساختارهای UFG با استفاده از دو روش مختلف ساخته می‌شود که معمولاً به نام روش‌های "پایین به بالا ۳" و "بالا به پایین ۴" معروف هستند [۱]. در روش "پایین به بالا" جامدات حجیم از طریق به هم چسبیدن اتم‌ها یا مواد جامد نانو ذره‌ای تولید

5 inert gas condensation

6 electro deposition

7 ball milling with subsequent consolidation

8 Bulk

1 Severe plastic deformation (SPD)

2 ultrafine-grained

3 bottom-up

4 top-down

اساساً از یکدیگر متفاوتند، اما هر کدام دانه‌ریزی بسیار عالی در سطح زیر میکروسکوپی ایجاد می‌کنند. بسته به نوع فرآیند، هندسه قطعات و ابعاد آنها متغیر است و از یک صفحه گسترده تا شمش‌های استوانه‌ای، دیسک‌ها و رینگ‌ها را شامل می‌شود. فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید توسط روش‌های مختلفی مانند ECAP، ARB، HPT، CGP و بر آلومینیوم انجام شده است و توسط محققین مختلفی گزارش شده است [۱۰]. همچنین این فرآیند‌ها توسط روش‌های مختلفی بر روی فلز مس انجام شده و توسط محققین گزارش شده است [۱۱ و ۱۲-۱۴].

فرآیند پرسکاری به روش اتصال فشاری جمعی یک فرآیند جدیدی می‌باشد و هنوز تحقیقات گسترده‌ای در زمینه آن انجام نشده است. در این مقاله روش اتصال فشاری جمعی به عنوان یک روش جدید تغییر شکل پلاستیک شدید برای تولید آلومینیوم نانو ساختار حجیم بر پایه فشردن در قالب کانالی معرفی شده است. کاربرد این روش اساساً مربوط به حوزه فلزکاری، مخصوصاً تولید مواد فلزی ریز ساختار با کارآیی بالا با استفاده از تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد.

۲- مطالعات تجربی

روش اتصال فشاری جمعی دارای مزایایی نظیر تولید مستقیم قطعات فلزی با ابعاد بزرگ (قطعات بالک) و اندازه دانه‌های نانومتری، قابلیت انجام فرآیند به وسیله دستگاه‌ها و تجهیزات مرسوم، امکان ساخت کامپوزیت‌های پایه فلزی، عدم بوجود آمدن کرنش خمشی یا ناهمگنی کرنشی قابل ملاحظه و نصب ساده و راحت ملزومات و قالب فرآیند می‌باشد.

روش اتصال فشاری جمعی به عنوان یک روش جدید تغییر شکل پلاستیک شدید برای تولید فلزات نانو ساختار حجیم بر پایه فشردن در قالب کانالی ابداع شده است. در این روش ابعاد کانال دستگاه و در نتیجه طراحی قالب به ابعاد فلز اولیه مورد استفاده بستگی دارد. این فرآیند می‌تواند برای فلزات حجیم با اندازه‌های متفاوت به کار رود و به دلیل ساده بودن

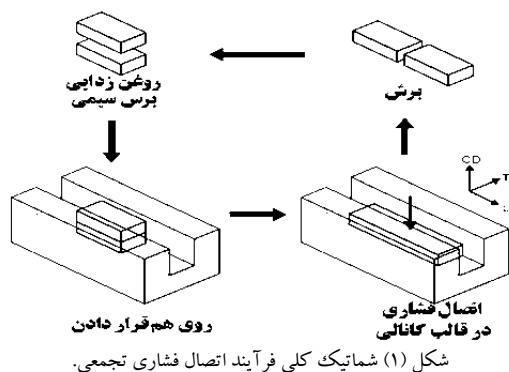
دانه‌ها بوسیله تولید و تکثیر نابجایی‌ها مورد توجه محققین و صنعت‌گران قرار گرفته است. ریشه این مسئله را می‌توان در کاربرد وسیع و رو به گسترش این نوع از مواد در صنایع مختلف جستجو کرد. در حال حاضر بسیاری از صنایع به دلیل خواص عالی مواد نانو ساختار به صورت جدی در حال مطالعه و پژوهش و صنعتی نمودن روش‌های تولید این دسته از مواد هستند. تغییر شکل پلاستیک شدید، یک استراتژی امیدوارکننده برای تولید فلزات نانو ساختار حجمی (بالک) با ابعادی در مقیاس بزرگ است.

اصول روش تغییر شکل پلاستیک شدید اعمال کرنش به ماده فلزی، بدون تغییر ابعاد ظاهری آن است. تاکنون فرآیندهای متعددی برای اعمال تغییر شکل شدید پلاستیک در مواد فلزی و رسیدن به ساختارهای نانومتری پیشنهاد شده‌اند که در بسیاری موارد با موفقیت‌هایی نیز همراه بوده‌اند. ویژگی مشترک و منحصر به فرد این فرایندها، ثابت بودن ابعاد و عدم تغییر شکل ظاهری ماده حین فرآیند می‌باشد، در نتیجه محدودیت در اعمال کرنش از بین می‌رود و دستیابی به کرنش‌های بسیار بالا (در حدود هشت تا ده) در ماده به راحتی میسر است. به این ترتیب در اثر اعمال کرنش، امکان اصلاح ریز ساختار، کاهش اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری و بهبود خواص مکانیکی نمونه فلزی فراهم می‌آید. در حالی که شکل نمونه تغییری نکرده است. ویژگی دیگر این فرآیندها افزایش استحکام و اصلاح ساختار دانه‌ها بدون اضافه کردن عناصر آلیاژی یا ذرات سرامیکی است [۶].

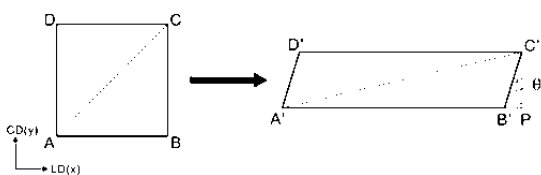
در حال حاضر چندین روش "بالا به پایین" در دسترس هستند، ولی سه روش توجه بیشتری را به سمت خودشان معطوف می‌کنند که عبارتند از: "پرس کردن در کانال‌های هم اندازه زاویه دار (ECAP) [۷]، اتصال نورد جمعی (ARB) [۸] و پیچش فشار بالا (HPT) [۹]؛ این سه روش

- 1 Equal-channel angular pressing
- 2 Accumulative roll-bonding
- 3 High-pressure torsion

ضخیم با ابعاد نسبتاً بزرگ می‌تواند به کار برده شود. علاوه بر این در فرآیند اتصال فشاری تجمعی کرنش و نرخ کرنش دقیقاً با کنترل مقدار تغییر شکل و سرعت پرس می‌تواند کنترل شود. جنس قالب کانالی استفاده شده از فولاد گرم کار ۲۳۴۴ انتخاب شده و قبل از عملیات وایرکات، برای رسیدن به سختی و استحکام مناسب آبکاری شده است. شماتیک از فرآیند اتصال فشاری تجمعی در قالب کانالی در شکل ۱ و شماتیک یک شبکه منفرد قبل و بعد از تغییر شکل در قالب کانالی در شکل ۲ آورده شده است.



شکل (۱) شماتیک کلی فرآیند اتصال فشاری تجمعی.



شکل (۲) شماتیک یک شبکه منفرد از نمونه قبل و بعد از تغییر شکل در فرآیند اتصال فشاری تجمعی.

۲-۱- تئوری طراحی فرآیند

با توجه به مطالب قبلی ذکر شده که در برگیرنده فاکتورهای اساسی در فرآیندهای با تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد، سعی بر آن شده است که پارامترهای این فرآیند طوری تعیین گردد که نیازهای زیر را برآورده کند:

- نمونه‌های اکستروود شده در این فرآیند از نظر ابعادی بزرگ باشد.
- توزیع کرنش در نمونه تا حد امکان همگن باشد.
- با انجام تعداد مراحل کم‌تر بتوان ساختاری همگن و با اندازه دانه‌ای در حد میکرو یا نانو بدست آورد.

روش و ملزومات کم فرآیند، صنعتی و مقرون به صرفه می‌باشد. از جمله مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر فرآیند اتصال فشاری تجمعی به صورت زیر قابل اشاره است: نوع فلز مورد استفاده، اصطکاک بین نمونه و قالب، ابعاد نمونه، میزان و نرخ فشار اعمالی، آماده سازی سطح نمونه‌ها برای روی هم قرار گرفتن و سپس فشرده شدن، میزان کاهش ضخامت در هر مرحله، تعداد مراحل انجام فرآیند. کاربرد این روش اساساً مربوط به حوزه فلزکاری، مخصوصاً تولید مواد فلزی ریز ساختار با کارایی بالا با استفاده از تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد.

در فرآیند اتصال فشاری تجمعی، یک نمونه به شکل شمش در قالب کانالی برای اولین بار فشرده می‌شود. تغییر شکل در قالب کانالی، کاهش در ضخامت و ازدیاد طول در طول نمونه را بدون هیچ گسترش جانبی فراهم می‌کند. در این فرآیند نمونه ۵۰ درصد فشرده شده و سپس به نصف در طول بریده می‌شود و دو شمش به ضخامت اولیه به هم چسبیده می‌شوند. شمش‌های چسبیده شده (روی هم قرار گرفته شده) مجدد در قالب کانالی ۵۰ درصد فشرده می‌شوند. برای دستیابی به نمونه حجیم با یک اتصال خوب، سطح اتصال دو شمش قبل از فشردن روغن‌زدایی و پولیش سیمی می‌شوند. این تغییر شکل اتصال فشاری نامیده می‌شود. این روند برش، روی هم قرار دادن و اتصال فشاری جهت ارائه تغییر شکل کرنشی بسیار بالا بدون هیچ تغییر قابل توجهی در ابعاد نمونه تکرار می‌شود. برای به حداقل رساندن اصطکاک بین نمونه و قالب می‌تواند از گریس مکانیکی از نوع پارافین به عنوان روانکار استفاده شود. نمونه‌های فشرده شده به نصف در طول بریده شد و دو قسمت نمونه برای رسیدن به ابعاد مشابه برش داده می‌شود. دو نمونه مشابه بوسیله استون روغن‌زدایی شده و سطوح تماس برس سیمی زده می‌شود. درحالی که فرآیند اتصال فشاری تجمعی در اصول بسیار شبیه به فرآیند نورد تجمعی است، مزیت آن این است که می‌تواند در یک قالب کانالی متصل به یک دستگاه پرس معمولی، بدون نیاز به دستگاه نورد با ظرفیت بالا انجام شود. این فرآیند برای یک شمش

سنگ زنی مغناطیسی دو کفه قالب با هم جفت شده و آماده انجام فرآیند گردید.

۲-۳- فاکتورهای تجربی تأثیرگذار در فرآیند

هنگامی که مواد تحت فرآیند اتصال فشاری جمعی قرار می‌گیرند چندین فاکتور مختلف روی قابلیت و خصوصیات ریزساختاری یک بیلت پرس شده تأثیر می‌گذارد. این فاکتورها به دو دسته جدا از هم قابل تفکیک است:

♦ فاکتورهایی که به طور مستقیم با فرآیند

وابستگی دارند، مانند میزان فشردگی در هر

مرحله، تمیز نمودن سطوح اتصالی نمونه به

وسیله روغن‌زدایی و پولیش سیمی و ...

♦ فاکتورهای آزمایشگاهی که کنترل آن‌ها

توسط تجربه به دست می‌آید که شامل سرعت

پرس، دمای عملیات پرس و ... می‌باشند.

به منظور اعمال نیروی لازم برای انجام فرآیند از پرس هیدرولیکی با ظرفیت ۳۵۰ تن استفاده شده است. سرعت پرس مقدار ثابت ۵mm/s می‌باشد ولی هنگام انجام فرآیند بر اساس نوع ماده‌ای که تحت فرآیند قرار می‌گیرد، سرعت تغییر می‌کند. هنگام انجام فرآیند بر روی آلومینیوم خالص تجاری، سرعت پرس به ۲ میلی‌متر بر ثانیه می‌رسد. بر اساس اطلاعات بدست آمده از سازنده دستگاه، قطر جک پرس ۳۰۰mm می‌باشد. در طی فرآیند اتصال فشاری جمعی آلومینیوم، فشاری که توسط دستگاه پرس نمایش داده می‌شود در حدود نزدیک به ۴۰bar می‌باشد.

آلومینیوم فلزی است نرم و سبک به رنگ سفید-نقره‌ای با نماد Al، عدد اتمی ۱۳، وزن اتمی ۲۶/۹۸۱، وزن مخصوص ۲/۷۵ گرم بر سانتی متر مکعب، نقطه جوش ۲۴۶۷ درجه سانتی گراد و نقطه ذوب ۶۶۰/۲۵ درجه سانتی گراد.

امروزه آلومینیوم پس از فولاد پرمصرف‌ترین فلز محسوب می‌شود. آلومینیوم و آلیاژهای آن نقش تعیین‌کننده‌ای در صنعت معاصر دارند. مجموعه ویژگی‌های خاصی که این فلز دارد بسیار نادر و غیر قابل جایگزینی است. بدون

• کرنش مؤثر اعمال شده بر نمونه در هر مرحله از فرآیند حدود نیم تا یک باشد.

• ساخت قالب و تجهیزات وابسته به آن راحت باشد.

• پارامترهای قالب طوری انتخاب گردند که در عین برآورده کردن موارد بالا کمترین اصطکاک را بین نمونه و قالب ایجاد کرده و بنابراین نیروی مورد نیاز کمترین باشد.

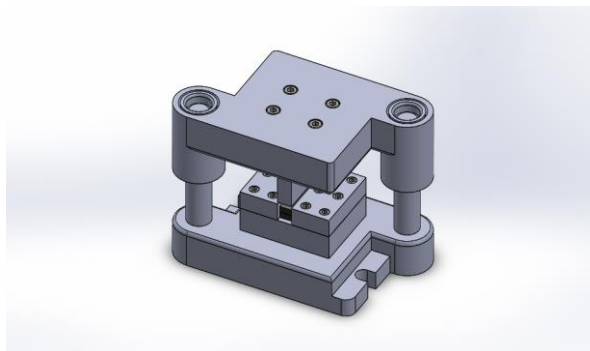
• مقدار تنش هیدرواستاتیکی ایجاد شده در قالب ماکزیمم باشد.

• و در کل هزینه‌های ساخت قالب و تجهیزات مربوطه حداقل باشد.

با توجه به موارد فوق طراحی و ساخت قالب‌ها صورت گرفته است.

۲-۲- طراحی و ساخت قالب

در این بخش به فرآیند ساخت قالب می‌پردازیم. برای ساخت قالب نقشه‌های استاندارد به همراه اطلاعات تکمیلی توسط نرم افزار SolidWorks ترسیم شده است. نمایی از قالب طراحی شده در شکل ۳ آورده شده است. با توجه به شرایط بارگذاری و خصوصیات قالب مورد نیاز جنس سنبه و قالب از فولاد گرم کار ۱/۲۳۴۴ انتخاب شده است.



شکل (۳) شماتیک قالب طراحی شده

در نهایت قالب اتصال فشاری جمعی ساخته شده است. بخش سنبه و بخش اصلی قالب توسط فرز CNC ساخته شده است. سپس با انجام عملیات حرارتی تمامی قطعات به استحکام مورد نظر رسیده و نهایتاً بعد از مونتاژ قالب توسط



شکل (۴) تصویر دستگاه اتصال فشاری تجمعی

ضخامت نمونه اولیه تحت فرآیند ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. فرض کنید فشار کرنش صفحه‌ای ایده‌آل توسط قالب کانالی تحقق یافته است، کرنش معادل اعمال شده (ε) می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{1}{1-r} \quad (1)$$

که r کاهش در ضخامت است. بنابراین کرنش معادل برای ۵۰ درصد فشردن برابر با ۰/۸ است. فشردن در دمای اتاق و در یک سرعت پرس ثابت برابر ۲ میلی‌متر بر ثانیه، متناظر با یک نرخ کرنش متوسط $8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ انجام شده است. برای به حداقل رساندن اصطکاک بین نمونه و قالب از کریس مکانیکی از نوع پارافین یا دی‌سولفید مولیبدن به عنوان روانکار استفاده می‌شود. نمونه‌های فشرده شده به نصف در طول بریده شد و دو قسمت نمونه برای رسیدن به ابعاد مشابه برش داده می‌شود. دو نمونه مشابه بوسیله استون روغن‌زدایی شده و سپس سطوح تماس برس سیمی زده می‌شود. نمونه‌ها مجدداً روی هم قرار داده شده و در معرض ۵۰ درصد فشرده‌سازی در کانال قالب قرار می‌گیرد. برش، روی هم قرار دادن و اتصال فشاری در قالب کانالی به عنوان یک

آلومینیوم هوایما و ماهواره وجود نمی‌داشت، وسایل نقلیه موتوری سوخت بیشتری مصرف می‌کردند و امکان حفظ مواد غذایی به مدت طولانی وجود نداشت. صرفه جویی در انرژی و روش‌های اقتصادی‌تری در بسیاری از زمینه‌ها تنها به خاطر وجود آلومینیوم میسر شده است. هدایت الکتریکی و حرارتی زیاد، وزن کم و مقاومت آلومینیوم در شرایط مختلف آب و هوایی و محیطی و قابلیت ساخت عالی سبب می‌شود که این فلز به عنوان یک ماده ارزان و مفید مطرح باشد.

در این مقاله، نمونه‌هایی از جنس آلومینیوم خالص تجاری ۱۰۵۰ استفاده گردیده است. برای تعیین دقیق جنس نمونه‌ها از آزمون کوانتومتری (آنالیز شیمیایی) استفاده شده است که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول (۱) نتایج آنالیز شیمیایی آلومینیوم خالص تجاری ۱۰۵۰ بر حسب درصد وزنی.

Al	Mn	Cu	Fe	Si	Ti	Mg	Zn
۹۹,۱۲	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۴	۰,۲۵	۰,۰۳	۰,۰۵	۰,۰۵

۲-۴- انجام فرآیند اتصال فشاری تجمعی

برای انجام فرآیند اتصال فشاری تجمعی در قالب کانالی، ابتدا نمونه‌های اولیه آلومینیوم خالص تجاری بریده و آماده سازی شده‌اند. نمونه‌های آماده شده قبل از انجام فرآیند تحت عملیات آنیل کامل در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱/۵ ساعت قرار گرفته‌اند. عملیات حرارتی آنیل، با هدف بدست آوردن یک ساختار تبلور مجدد یافته کامل و احتمالاً حذف سابقه قبلی تغییر شکل انجام شده است. سپس سطح اکسید شده نمونه‌ها سنباده زده شده‌اند. برای انجام هر پاس از فرآیند، نمونه توسط روانکار دی‌سولفید مولیبدن روانکاری شده و در داخل کانال قالب که پیش از مونتاژ قالب روانکاری شده، قرار داده شده و مجموعه قالب در زیر پرس هیدرولیکی قرار داده می‌شود (شکل ۴).

تغییر شکل مثلث ABC به A'B'C' را در نظر بگیرید. مولفه های کرنش اسمی در راستای LD و CD (ϵ_x و ϵ_y) و مولفه های کرنش برشی (γ_{xy}) را می توان محاسبه کرد که در زیر آورده شده است.

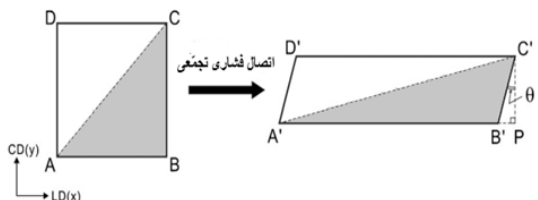
$$\epsilon_y = \ln \frac{|PC'|}{|BC|} = \ln \frac{|B'C'| \cos \theta}{|BC|}, \gamma_{xy} = \tan \theta \quad (2)$$

$$\epsilon_x = \ln \frac{|A'B'|}{|AB|} \quad (3)$$

که هر طول و زاویه را می توان با ثبت مختصات نقاط می توان بدست آورد. یک کرنش معادل در مثلث A'B'C' با فرض شرایط کرنش صفحه ای توسط رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\epsilon_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{2}{3}(\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2) + \frac{1}{3}\gamma_{xy}^2} \quad (4)$$

از آنجا که مثلث A'B'C' بر مثلث A'B'C' همبسته نیست، همین روند برای محاسبه کرنش محلی در آن انجام می گیرد.



شکل (۶) نمایش شماتیکی تغییر یک سلول از شبکه قبل و بعد از اعمال تغییر شکل حاصل از فرایند اتصال فشاری جمعی در قالب کانالی

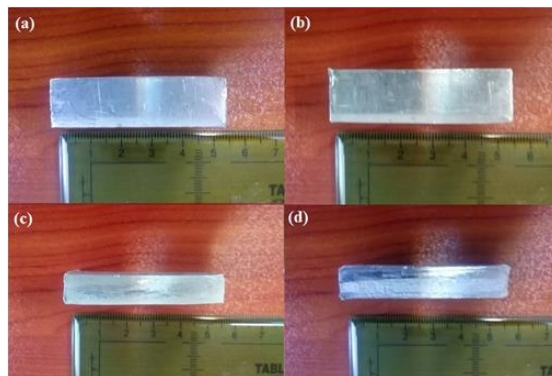
۲-۶- بررسی خواص مکانیکی نمونه ها تحت فرآیند

به منظور بررسی تأثیر فرآیند بر آلومینیوم خالص تجاری لازم است پس از انجام فرآیند، آزمون های مکانیکی از جمله آزمون کشش و سختی سنجی بر روی نمونه ها به عمل آید. در این بخش نحوه انجام آزمون ها و استانداردهای مربوط به هر یک بیان گردیده است.

۲-۷- فرآیند آماده سازی نمونه های متالوگرافی

فرایند آماده سازی نمونه های متالوگرافی شامل گام های زیر می باشد:

پاس از فرآیند در نظر گرفته می شود و این فرآیند تا ۴ پاس تکرار شده است. از آنجاییکه کرنش معادل ۰/۸ در یک پاس اعمال می شود، کرنش معادل در ۴ پاس برابر ۳/۲ است (شکل ۵).

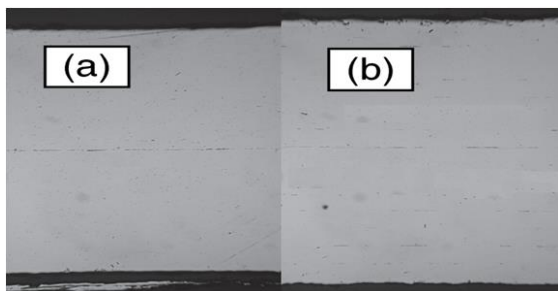


شکل (۵). (a و c) نمونه آبل شده (b و d) نمونه یک پاس اتصال دهی شده

۲-۵- اندازه گیری تنش با الگوی شبکه

به طور کلی، تغییر شکل فشاری به سبب اصطکاک و اثر هندسی بین نمونه و کانال قالب، یکنواخت نیست و غیریکنواختی کرنش اغلب در سرتاسر ضخامت نمونه مشاهده می شود. در آزمایش الگوی شبکه توزیع کرنش در نمونه تغییر شکل داده شده اندازه گیری می شود. مواد اولیه شمش با ۲۰ میلی متر ضخامت، ۱۵ میلی متر عرض و ۵۰ میلی متر طول بود که به نصف در عرض بریده شد. سطح مقطع نمونه پولیش مکانیکی شده و الگوی شبکه با مربع های ۲ میلی متری مشخص شد.

نیمی از نمونه با نیمه دیگر نمونه ثابت و ۵۰ درصد فشرده سازی در قالب کانالی انجام شد. اعوجاج الگوی شبکه پس از فشرده سازی در قالب کانالی مورد بررسی قرار گرفت و کرنش معادل موضعی طبق روش زیر محاسبه شد. شکل ۶ تصویر شماتیک تغییر یک شبکه منفرد قبل و بعد از تغییر شکل توسط فرآیند اتصال فشاری جمعی را نشان می دهد. فرض کنید مربع ABCD بعد از تغییر شکل در قالب کانالی به شکل A'B'C'D' تبدیل شود. ضخامت مربع در جهت CD کاهش یافته و طول آن در جهت LD افزایش یافته است. علاوه بر این زاویه راس A که در اصل ۹۰ درجه بود، توسط تنش برشی به اندازه θ کاهش یافته است. حال



شکل (۷) افزایش سطح اتصال با افزایش تعداد پاس‌ها (a) دو لایه اتصال (b) چهار لایه اتصال

فرآیندهای جوش سرد، شامل فرآیندهای شکل‌دهی فلزات مانند اکستروژن، شکل‌دهی انفجاری و کشش است. براساس نوع فرآیند مورد استفاده جهت ایجاد جوش سرد بین فلزات، چهار تئوری برای بیان مکانیزم ایجاد جوش سرد بین دو فلز توسط اعمال فشار، بیان شده است که عبارتند از: تئوری فیلم سطحی^۱، تئوری تپه انرژی^۲، تئوری اتصال نفوذی^۳ و تئوری تبلور مجدد^۴. تحقیقات نشان می‌دهد در دمای پایین، فرآیند جوش سرد از تئوری فیلم سطحی پیروی می‌کند.

در حین انجام فرآیند اتصال فشاری، دما افزایش می‌یابد. این افزایش دما ناشی از کار پلاستیک، دمای قالب و اصطکاک میان نمونه و قالب است. این افزایش دما دارای اهمیت است زیرا ممکن است شرایط تغییر فاز و یا تغییر در ریز ساختار را فراهم سازد. حرارت تولیدی ناشی از کار تغییر شکل در ناحیه تغییر شکل اصلی در نمونه، مقداری به قالب انتقال می‌یابد و انرژی باقیمانده ذخیره می‌شود. حرارت داخلی ناشی از کار تغییر شکل معمولاً ۹۰٪ کار تغییر شکل در نظر گرفته می‌شود. بنا بر آنچه هیونگ ارائه داده است، مقدار افزایش دمای نمونه (ΔT) برابر است با:

۱. انتخاب و برش نمونه‌ها از قطعه کار پردازش شده

۲. برداشتن پلیسه‌های برش

۳. نشانه‌گذاری نمونه

۴. مانع گرم نمونه‌ها

۵. سمباده‌زنی با کاغذ سنباده Sic به ترتیب با شماره‌های ۱۰۰، ۲۴۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ با

استفاده از آب جاری به عنوان روانکار

۶. پولیش مکانیکی با پودر ۰,۰۵ آلومینا

۷. اچ کردن نمونه‌ها

پیدا کردن محلول اچ مناسب برای آشکارسازی ساختار دانه‌ای آلومینیوم ۱۰۵۰ مشکل است. چندین محلول پیشنهاد داده شده مورد استفاده قرار گرفت. این محلول‌ها شامل محلول توکر، بارکر، پولتن، کلر و HF بوده است. با این حال، اچ کردن نمونه‌ها با استفاده از این محلول‌ها ناموفق بود. محلول اچ پولتن در مقایسه با سایر محلول‌ها بهتر بود. اما نمونه‌ها به سرعت OVERETCH می‌شد. اما ساختار دانه‌ای واضحی با چشم بر روی نمونه مشاهده می‌شد. بنابراین، محلولی رقیق‌تر نسبت به پولتن (POULTON,S) شامل ۱۲ درصد HF، ۱۲ درصد HCL، ۲۵ درصد HNO₃ و ۵۱ درصد آب مقطر استفاده شد. نتایج حاصل شده با این محلول مناسب به نظر می‌رسید و با دادن زمان OVERETCH نمونه‌ها حاصل می‌شود. با تکرار آزمایش در زمان‌های مختلف زمان مناسب بدست آمد. که در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد زمان مناسب دو دقیقه به دست آمد.

۳- نتایج آزمایشگاهی

با افزایش تعداد پاس‌ها، مقاومت برشی افزایش پیدا کرده است و پیوند بهتری در بین سطوح اتصالی فلز برقرار شده است. این به دلیل اعمال فشار بیشتر بر ماده با افزایش مقدار پاس است. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، با افزایش تعداد پاس از یک به سه، سطح مشترک بهتری به وجود آمده است و حفره‌های بیشتری در مرز پوشانده شده است.

¹ Film Theory

² Energy Barrier Theory

³ Diffusion Bonding Theory

⁴ Joint Recrystallization Theory

است که سطوح در حال تماس لایه‌ها بایکدیگر می‌شکنند و مواد در زیر لایه‌های زیرین سطح به نام مواد بکر، از بین ترک‌های سطحی اکستروود می‌شوند. دو پارامتر اساسی بر مقاومت پیوند اثر گذار است: فشار وارده بر دو سطح و انبساط سطوح. هرچه فشار بیشتر باشد، کیفیت پیوند بهتری خواهیم داشت. هنگامی که در اثر اعمال فشار، انبساط سطحی به حدی برسد که سطوح مقابل دو فلز در تماس نزدیک به هم قرار گیرند، یک پیوند میان مناطق عاری از آلودگی بوجود می‌آید. البته قفل شدگی مکانیکی اولیه ناشی از پرس‌های جا زدن دو لوله در یکدیگر، پدیده‌ای موثر در میزان مقاومت برشی است و می‌بایست تاثیر این موضوع نیز در نظر گرفته شود. عوامل مختلفی از قبیل میزان تغییر شکل، نوع فلز، دما، میزان فشار، زمان، آماده‌سازی سطحی، هندسه منطقه تغییر شکل و عملیات حرارتی پس از انجام فرایند بر روی جوش سرد بین فلزات موثر است. جهت ایجاد یک پیوند متالورژیکی خوب، حذف آلودگی‌های سطحی بر روی فلزات نیز ضروری است. افزون بر این، آنیل کردن نمونه‌ها در دمای ۳۵۰ °C موجب شده است تا مقاومت برشی افزایش یابد. با انجام آنیلینگ در این دما، بدلیل حذف تاثیرات تغییر شکل شدید بر داکتیلیتی اتصال، پیوند بهتری برقرار می‌گردد. سطوح اتصالی آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ اتصال فشاری تجمعی شده در حالت آنیل و یک و دو پاس در شکل ۸ نشان داده شده است.

$$\Delta T = \frac{0.9\sigma\varepsilon + 0.5m \left(\frac{\sigma}{\sqrt{3}}\right) u \frac{A}{V} \Delta t}{\rho c + \frac{A}{V} h \Delta t} \quad (5)$$

که در آن σ ، ε ، m ، A ، V ، c ، ρ ، u و ΔT به ترتیب بیانگر تنش، کرنش، فاکتور اصطکاک، مساحت سطح خارجی ناحیه تغییر شکل اصلی، حجم ناحیه تغییر شکل اصلی، ظرفیت حرارتی ماده، سرعت نسبی میان نمونه و قالب، چگالی ماده، زمان توقف دامنه (قسمتی از ماده که تغییر شکل می‌یابد) در ناحیه تغییر شکل و ضریب انتقال حرارت میان نمونه و قالب است.

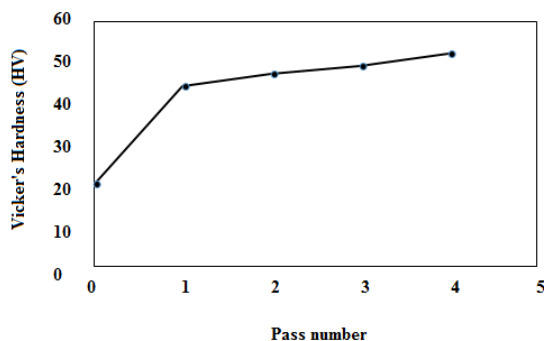
از آنجا که در این فرآیند طول نمونه در مقایسه با عرض و ضخامت نمونه بلندتر است، می‌توان آن را یک فرآیند حالت پیوسته در نظر گرفت، غیر از دو انتهای نمونه که حالت پیوسته برقرار نیست. به همین دلیل، انتقال حرارت رسانش در طول ماده قابل صرف نظر کردن است. این فرض در فرآیندهای حالت پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای حل معادله بالا σ_{eq} برابر در لایه آلومینیومی MPa ۱۰۲ است. همچنین ε_{eq} برابر با ۰/۸ خواهد بود. ρ ، c ، h نیز به ترتیب برای آلومینیوم 2990 kg/m^3 ، 910 J/kg.k ، $2500 \text{ W/m}^2\text{k}$ خواهند بود. با حل کردن معادله حرارت بالا، افزایش دما برای آلومینیوم به ترتیب ۳۶/۱۲ درجه کلون خواهد بود. افزایش دما در سطح مشترک نیز برابر میانگین این دماها، ۵۶/۲ درجه کلون است. این مقدار افزایش دما و علاوه بر آن مدت زمان کوتاهی که نمونه در منطقه تغییر شکل اصلی تحت فشار و شکل دهی قرار می‌گیرد، اجازه نمی‌دهد تا نفوذ در میان لایه‌ها انجام شود. بنابراین تئوری نفوذ در این مورد صادق نیست.

مکانیزم غالب برای ایجاد جوش سرد در فرایندهای ذکر شده تئوری فیلم سطحی است. این تئوری بر این مبنا استوار

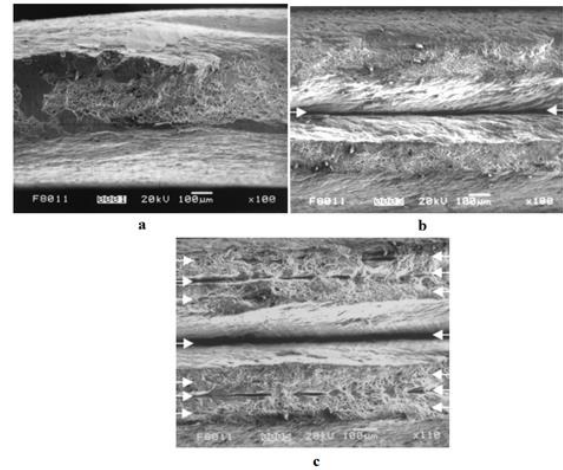
که بیشترین تأثیر فرآیند در افزایش سختی مربوط به پاس ابتدایی می‌باشد.

شکل ۹ تغییرات سختی بر حسب تعداد پاس بر روی نمونه‌های آلومینیوم خالص تجاری در فرآیند اتصال فشاری را نشان می‌دهد. همانطوری که مشخص است مقدار سختی نمونه در مراحل یک و دو با سرعت بیشتری افزایش یافته و در ادامه در مرحله سه و چهار این سرعت کاهش می‌یابد. افزایش سختی با افزایش تعداد مراحل پرسکاری را میتوان ناشی از دلایل زیر دانست. اول اینکه که در نتیجه انجام کار سرد روی نمونه‌ها، نابه جایی‌ها تولید شده و هر چه مقدار کرنش اعمالی افزایش می‌یابد، چگالی این نابه جایی‌ها افزایش یافته و برخورد نابه جایی‌ها با یکدیگر بیشتر می‌شود. بنابراین با افزایش تعداد مراحل پرس کاری، مقدار کار سرد انجام شده روی نمونه بیشتر شده و این به نوبه خود منجر به افزایش سختی نمونه‌ها می‌شود. دلیل دیگر اینست که اعمال کرنش شدید باعث ایجاد مرزهای نابه جایی و تقسیم دانه‌های اولیه به واحدهای کوچکتر به نام بلوک‌های سلولی می‌شود. با افزایش کرنش اعمالی، فاصله این مرزها کوچکتر و در نتیجه یک ریزساختار با دانه بندی بسیار ریز تشکیل می‌شود و بنابراین سختی افزایش می‌یابد.



شکل (۹) تغییرات سختی بر حسب تعداد پاس بر روی نمونه‌های آلومینیوم خالص تجاری در فرآیند اتصال فشاری

بعد از انجام فرآیند اتصال فشاری تا چهار پاس که بر روی



شکل (۸) سطوح اتصال آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ اتصال فشاری تجمعی شده در حالت (a) آنیل یک و (b) دو پاس

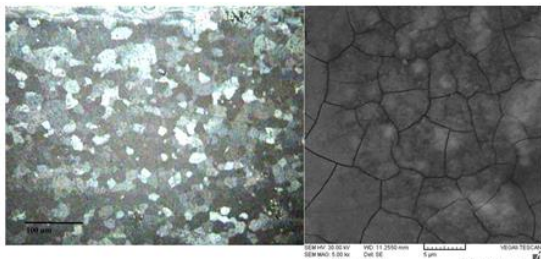
برای اندازه‌گیری سختی هر یک از نمونه‌های آلومینیوم خالص تجاری در حالت آنیل و اتصال تجمعی شده از روش سختی سنجی ویکرز استفاده شده است. سختی اندازه‌گیری شده به طور قابل توجهی با تعداد پاس‌ها در طول فرآیند در ارتباط است. افزایش تعداد پاس منجر به افزایش میکروسختی می‌شود. همان‌گونه که در مقادیر سختی مشاهده می‌شود، بیشترین تأثیر فرآیند مربوط به پاس ابتدایی می‌باشد و پاس‌های بعدی سهم کم‌تری در افزایش سختی نمونه‌ها در مقایسه با پاس اول دارد. جدول ۲ مقادیر متوسط سختی سنجی ویکرز نمونه آلومینیومی فرآوری شده را نشان می‌دهد.

جدول (۲) مقادیر متوسط سختی سنجی ویکرز نمونه آلومینیومی فرآوری شده

تعداد پاس	۰	۱	۲	۳	۴
سختی	۲۰	۴۳٫۲	۴۵٫۴	۴۸٫۹	۵۱٫۸

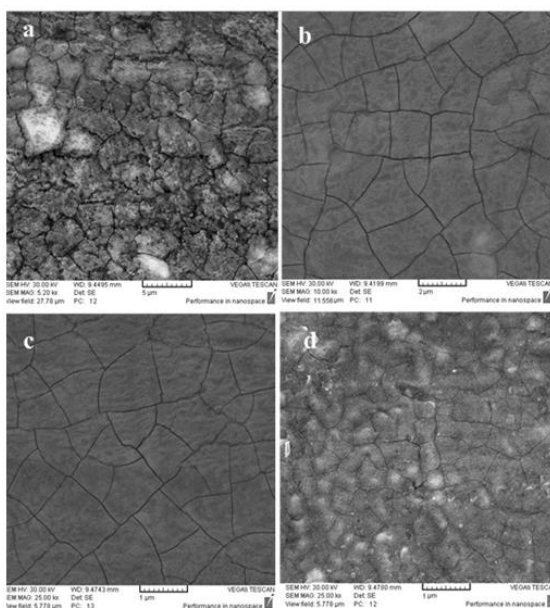
همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، اعمال فرآیند اتصال فشاری برای نمونه آلومینیوم خالص تجاری موجب افزایش سختی به مقدار ۱۱۶٪، ۱۲۷٪، ۱۴۴/۵٪ و ۱۵۹٪ به ترتیب برای پاس‌های اول، دوم، سوم و چهارم در مقایسه با نمونه آنیل شده حاصل می‌گردد. هم‌چنین می‌توان دریافت

نشان می‌دهد تصاویر بیانگر ساختاری هم محور که در اثر آنیل بوجود آمده است می‌باشد، و اندازه متوسط دانه‌ها برای ورق آنیل شده در حدود ۷ میکرومتر می‌باشد.



شکل (۱۱) ریز ساختار نمونه بعد از آنیل

شکل ۱۲ تصاویری از ریزساختار نمونه‌هایی که تحت تعداد پاس‌های مختلف فرآیند قرار گرفته اند را نشان می‌دهد. ساختار اولیه با دانه‌های خشن ۶-۸ μm به ساختاری با اندازه سلول‌های ۱/۲ μm در اولین پاس کرنش دهی، ۶۲۷ nm بعد از پاس چهارم، تبدیل شده است. این بهبود دانه مهم ترین اثر کرنش دهی شدید است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، بعد از تغییر ناگهانی در پاس اول، در پاس دوم و سوم از شدت بهبود دانه کاسته شده است. تا جایی که در پاس سوم و چهارم به مقداری ثابت می‌رسد.

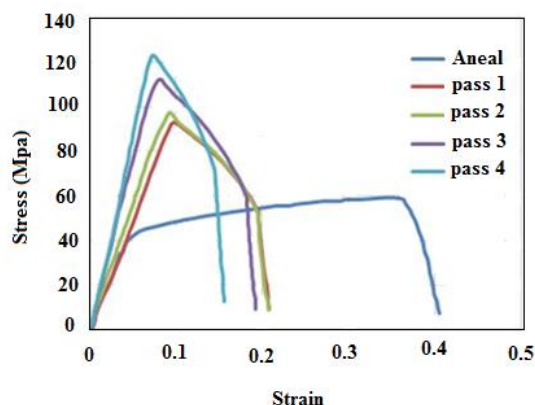


شکل (۱۲) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار آلومینیوم (a) نمونه یک پاس (b) نمونه دو پاس (c) نمونه سه پاس (d) نمونه چهار پاس

آلیاژ آلومینیوم خالص تجاری در دمای محیط صورت گرفته است، آزمون کشش به منظور بررسی روند استحکام و داکتیلیته مواد حاصل از این دو فرآیند و نیز تأثیر تعداد پاس‌ها انجام گرفته است. لازم به ذکر است که برای هر یک از پاس‌ها تعداد سه نمونه برای بررسی روند تکرار پذیری انتخاب شده و نهایتاً مقدار متوسط آن‌ها بیان گردیده است. جدول ۳ خواص مکانیکی نمونه‌های آلومینیومی بعد از فرآیند را نشان می‌دهد. همین طور که در این جدول دیده می‌شود با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند استحکام نهایی قطعه افزایش می‌یابد. همچنین منحنی تنش-کرنش آلومینیوم ۱۰۵۰ در فرآیند اتصال فشاری جمعی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد پاس شیب منحنی تنش کرنش افزایش می‌یابد.

جدول (۳) خواص مکانیکی نمونه‌های آلومینیوم بعد از فرآیند

تعداد پاس	استحکام نهایی (Mpa)	درصد ازدیاد طول
۰	۶۰	۴۲
۱	۹۳	۲۳
۲	۹۷	۲۲
۳	۱۱۲	۱۹
۴	۱۲۳	۱۶



شکل (۱۰) منحنی تنش-کرنش آلومینیوم ۱۰۵۰ در فرآیند اتصال فشاری جمعی

شکل ۱۱ تصاویر ساختار ماده اولیه که بوسیله میکروسکوپ الکترون روبشی و میکروسکوپ نوری گرفته شده است را

- [7] Valiev R.Z., Langdon T.G., Progress in Materials Science, Vol. 51, 2006, pp. 881-981.
- [8] Saito Y, Tsuji N, Utsunomiya H, Sakai T, Hong R.G. Scripta Mater, 1998, pp. 39-1221.
- [9] Smirnova N. A, Levit V. I., Pilyugin V. I., Kuznetsov R. I., Davydova L. S., Sazonova V. A., Fiz Metal Metalloved, Vol. 61, 1986, pp. 1170-1177.
- [10] Shin D.H., Park J.J., Kim Y.S., Park K.T., Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum, Materials Science and Engineering: A, Vol. 98, 2001, pp. 98-103.
- [11] Shaarbaf M., Toroghinejad M.R., Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding process, Materials Science and Engineering A, Vol. 473, 2008, pp. 28-33
- [12] Yoon S.C., Krishnaiah A., Chakkingal U., Kim H.S., Severe plastic deformation and strain localization in groove pressing, Computational Materials Science, Vol. 43, 2008, pp. 641-645.
- [13] Shirdel A., Khajeh A., Moshksar M.M., Experimental and finite element investigation of semi-constrained groove resisting process, Materials & Design, 2010, pp. 946-950.
- [14] Estrin Y. and Necking H., A unified phenomenological description of work hardening and creep based on one-parameter models, Acta Mater, 1998, pp. 57-70.

۴- نتیجه گیری:

خواص مکانیکی بهینه و دستیابی به سازه‌هایی با نسبت استحکام به وزن بالا از اهداف فن آوری مواد با ساختار بسیار ریز یا نانو می‌باشد. در این مقاله روش اتصال فشاری تجمعی به عنوان یک روش جدید تغییر شکل پلاستیک شدید برای تولید فلزات نانو ساختار حجیم بر پایه فشردن در قالب کانالی معرفی شد. فرآیند بر روی یکی از پرکاربردترین فلزات در صنعت یعنی آلومینیوم انجام شد. با بررسی و تحلیل نمونه‌ها مشخص شد که استحکام کششی نهایی پس از چهار مرحله فرآیند به حدود ۲ برابر نمونه آنیل شده افزایش یافته و از ۶۰ به ۱۲۳ رسیده است. این بهبود خواص از جمله افزایش استحکام و سختی و دستیابی به نسبت استحکام به وزن بالا می‌تواند به گسترش کاربرد این مواد جهت سبک سازی مؤثر سازه در صنایع خودروسازی و هواپیماسازی کمک شایانی نماید.

مراجع:

- [1] Shin D.H., Park J.J., Kim Y.S., Park K.T., Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum, Materials Science and Engineering A, Vol. 98, 2001, pp. 98-103.
- [2] Gleiter H., Hansen N., Horsewell A., Leffers T., Lilholt H., Deformation of polycrystals: Mechanisms and microstructures. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, 2000, pp. 15.
- [3] Erb U., El-Sherik A.M., Palumbo G., Aust K.T., Synthesis, structure and properties of electroplated nanocrystalline materials, Nanostruct Mater, Vol. 2, 1993, pp. 383-390.
- [4] Koch C.C., Cho Y.S., Nanocrystals by high energy ball milling, Nanostruct Mater, Vol. 1, 1992, pp. 207-212.
- [5] Zhu Y.T., Lowe T.C., Langdon T.G., Performance and applications of nanostructured materials produced by severe plastic deformation, Scripta Materialia, Vol. 8, 2004, pp. 825-830.
- [6] Valiev R.Z., Estrin Y., Horita Z., Langdon T.G., Zehetbauer M.J., Zhu Y.T., Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation, Overview Nanostructured Materials, Vol. 58, 2006, pp. 33-39.

