

## مطالعه رفتار سوپر پلاستیک آلیاژ Sn-1%Bi پس از فرآیند فورج چند محوره آزمایش پانچ برشی

فرشاد اکبری پناه\*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

یاسر مرادی

دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ایران

## چکیده

در این مقاله رفتار سوپرپلاستیک آلیاژ Sn-1%Bi در شرایط MDF شده، توسط آزمون پانچ برشی در دمای اتاق ( $T > 0.6T_m$ ) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون پانچ برشی مقدار ضریب حساسیت به نرخ کرنش ( $m$ ) را برای نمونه‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ پاس MDF شده به ترتیب ۰/۱۱، ۰/۲۳، ۰/۳۵ و ۰/۵۳ گزارش کرد. این مقادیر نیز نشان می‌دهد که نمونه‌های ۶ و ۸ پاس MDF شده رفتار سوپرپلاستیک را تجربه می‌کنند. تصاویر میکروسکوپ نوری نشان دادند که مقدار اندازه دانه از  $4/2 \mu m$  قبل از فرآیند MDF به  $2/7 \mu m$  بعد از دو پاس MDF می‌رسد و طی پاس‌های بعدی تغییرات چشمگیری مشاهده نمی‌شود به گونه‌ای که بعد از ۸ پاس MDF در نهایت این مقدار به  $2 \mu m$  می‌رسد؛ اما با افزایش تعداد پاس‌های MDF یکنواختی ساختار به مراتب بیشتر شده و در نمونه ۸ پاس MDF شده شاهد ساختاری بسیار همگن با دامنه تغییرات اندازه دانه کوچک هستیم. همچنین به نظر می‌رسد سهم مرزخانه‌های بزرگ زاویه در نمونه ۸ پاس MDF شده افزایش قابل توجهی نسبت به نمونه ۶ پاس MDF شده دارد. **واژه‌های کلیدی:** فورج چند محوره، آزمایش پانچ برشی، سوپر پلاستیک.

## Superplasticity Behavior of MDFed Sn-1Bi Alloy Determined by Shear Punch Test

F. Akbaripناه

Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

Y. Moradi

Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

## Abstract

The strain rate sensitivity (SRS) of a fine-grained Sn-1wt% Bi alloy, processed by multi-directional forging (MDF) was investigated by shear punch testing (SPT) at room temperature. The grain size decreased from 4.2 to 2.6  $\mu m$ , after 2 passes of MDF and continue the process had little effect on it, so that eventually reached 2  $\mu m$  after 8 passes, however, the microstructural homogeneity increased greatly with increasing the number of MDF passes. The results indicate the strain rate sensitivity of the shear yield stress increases from 0.11 to 0.53, as the number of passes increased from 2 to 8. The high SRS index of 0.53 is indicative of a superplastic deformation behavior dominated by grain boundary sliding.

**Keywords:** Multi Directional Forging, Shear punch test, superplastic.

تکرار پاس‌ها تا رسیدن به اندازه دانه‌های بسیار ریز وجود دارد [۳].

نتایج تحقیقات نشان داده است که این فرایند برای دستیابی به رفتار سوپرپلاستیک در آلیاژهای منیزیم [۴]، آلومینیوم [۵] و آلیاژ تیتانیوم [۶] موفق عمل کرده است.

آزمون پانچ برشی<sup>۳</sup> (SPT) یکی دیگر از آزمون‌های موضعی استفاده شده از سال ۱۹۸۴ به بعد است [۷]. این آزمون مزیت‌های گوناگونی دارد که برجسته‌ترین آن‌ها، استفاده از مقدار کمی ماده برای ارزیابی خواص مکانیکی موادی است که از نظر دسترسی محدودیت دارند. از آنجاکه یک رابطه خطی بین استحکام برشی و استحکام کششی برقرار است، با داده‌هایی که از SPT بدست می‌آید، می‌توان استحکام نهایی کششی و تنش تسلیم کششی را پیش‌بینی کرد [۸]. در این آزمون نمونه‌هایی با ضخامت کمتر از یک میلی‌متر به وسیله دو قید از بالا و پایین بسته شده و سپس مطابق شکل ۱ فرورونده‌ای با سرعت ثابت بارگذاری بر نمونه اعمال می‌شود.

در این فرایند تنش مؤثر از معادله زیر بدست می‌آید:

## ۱- مقدمه

اساساً عملیات با «تغییر شکل پلاستیک شدید» را می‌توان پروسه‌هایی از تغییر شکل فلزات تعریف کرد که در آن‌ها کرنش بسیار بالایی بر روی یک توده جامد اعمال می‌شود بدون اینکه تغییر مهمی در ابعاد جسم ایجاد گردد و نتیجه آن تولید ماده‌ای با دانه‌های فوق‌ریز است [۱].

فورج چند محوره<sup>۲</sup> MDF به عنوان یک فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید، از روش‌های اعمال کرنش زیاد به مواد حجمی است و می‌تواند از روش‌های بسیار مؤثر برای رسیدن به مواد با اندازه دانه‌های بسیار ریز باشد [۲]. در این روش ابتدا نمونه در یک جهت تحت فشار تک‌محور قرار می‌گیرد و سپس در طول محور دیگری تحت فشار قرار می‌گیرد و این فرآیند برای رسیدن به کرنش‌های تجمعی بالا چندین بار تکرار می‌شود. نمونه در یک جهت درون قالب تحت فشار قرار می‌گیرد و بدون اینکه تغییری در ابعاد اولیه آن ایجاد گردد در جهت دیگری تحت فشار قرار می‌گیرد. به دلیل ثابت ماندن ابعاد قطعه، امکان

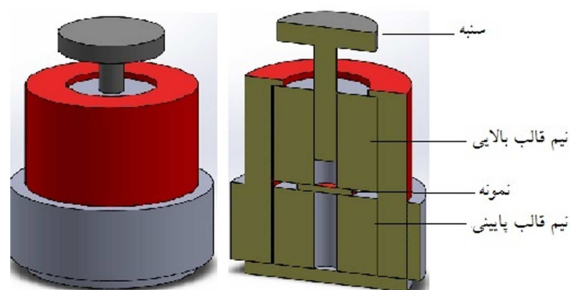
\* Severe Plastic Deformation

<sup>۲</sup> Multi-Directional Forging (MDF)

<sup>۳</sup> Shear Punch Test (SPT)

$$(۱) \quad \tau = \frac{P}{2\pi r t}$$

که در این رابطه  $\tau$  تنش برشی مؤثر،  $r'$  شعاع میانگین (میانگین شعاع پانچ و شعاع قالب) و  $t$  ضخامت نمونه می‌باشد.



شکل ۱- تصویر شماتیک برش خورده دستگاه پانچ برشی

از آزمایش پانچ برشی برای بررسی رفتار سوپرپلاستیک پس از فرآیند ECAP<sup>۱</sup> [۹ و ۱۰] با استفاده از اندازه گیری ضریب حساسیت به نرخ کرنش (SRS)<sup>۲</sup> یا شاخص  $m$  استفاده شده است، اما تا کنون هیچ مطالعه‌ای بر رفتار سوپرپلاستیک مواد پس از فرآیند MDF توسط SPT گزارش نشده است.

آلیاژهای قلع- بیسموت به‌عنوان یکی از مواد کاندیدا برای آلیاژهای لحیم بدون سرب مطرح می‌باشند. بیشتر داده‌های آزمایش‌های انجام‌شده بر روی خواص مکانیکی آلیاژهای قلع-بیسموت، مربوط به سیستم یوتکتیک این آلیاژ می‌باشد. محمودی و همکاران بر روی خزش آلیاژ Sn-(1-5)%Bi مطالعاتی انجام داده و با استفاده از آزمون خزش فروروندگی گزارش کرده‌اند که افزایش درصد بیسموت از ۱ تا ۵ درصد مقاومت خزشی قلع را بهبود می‌بخشد [۱۱]. Alden در تحقیق جامعی بر روی آلیاژ Sn-5%Bi نشان داد که در این آلیاژ با اندازه دانه‌های کم ( $<10\mu m$ )، تنش سیلان حساسیت به نرخ کرنش زیادی نشان می‌دهد و تغییر شکل به‌صورت سوپرپلاستیک می‌باشد، بطوریکه سهم عمده کرنش از لغزش مرزدانه‌ای (GBS) ناشی می‌گردد، او همچنین نشان داد که تنش سیلان و ضریب حساسیت به نرخ کرنش در این آلیاژ به‌شدت تابع نرخ کرنش و اندازه دانه قلع می‌باشد [۱۲].

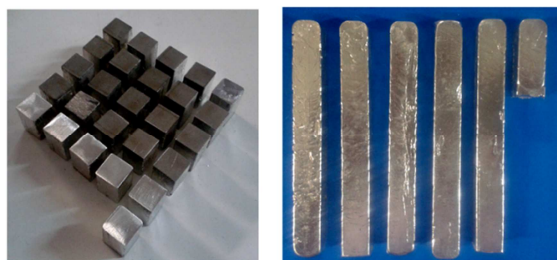
## ۲- مواد و روش‌ها

برای تهیه آلیاژ Sn-1%Bi، قلع و بیسموت با خلوص بالا (۹۹/۹٪) به نسبت‌های وزنی مشخص، در بوته گرافیتی قرار گرفته و در کوره الکتریکی در دمای  $350^\circ C$  ذوب گردیدند. بعد از ذوب کامل و قبل از ریختن در قالب، مذاب به مدت ۳۰ ثانیه به‌صورت یکنواخت هم زده شد و سپس به درون قالب مکعبی شکل با ابعاد  $13 \times 13 \times 110$  mm ریخته شد. بیلت‌های ریخته‌گری شده جهت عملیات همگن‌سازی و MDF، توسط دستگاه وایرکات، به قطعاتی با ابعاد  $13 \times 13 \times 20$  mm برش داده شدند (شکل ۲). در این پژوهش نمونه‌ها در دمای  $152^\circ C$  به مدت ۸ ساعت در کوره الکتریکی تحت

<sup>۱</sup> Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

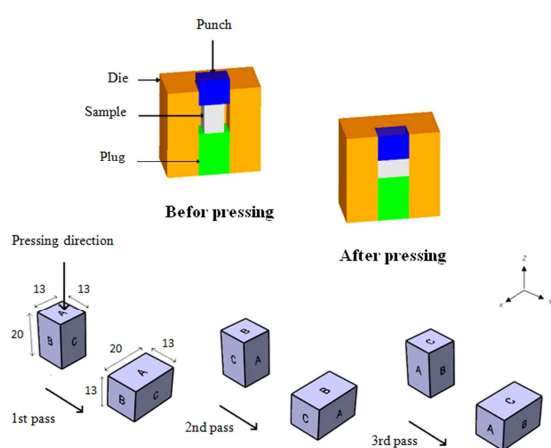
<sup>۲</sup> strain rate sensitivity

عملیات حرارتی همگن‌سازی قرار گرفتند.



شکل ۲- بیلت‌های بدست آمده از عملیات ریخته‌گری و برش بیلت‌ها به قطعاتی با ابعاد  $13 \times 13 \times 20$  mm جهت عملیات همگن‌سازی و MDF

پس از عملیات همگن‌سازی، نمونه‌ها تحت عملیات MDF قرار گرفتند. فرآیند MDF در دمای محیط و به تعداد پاس‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ انجام شد. اعمال بار توسط دستگاه MTS و با سرعت ثابت ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. از نوار تفلون به‌عنوان روانکار استفاده شد و نمونه‌ها قبل از اعمال هر پاس، توسط نوار تفلون کاملاً پوشانده شدند. تصویر شماتیک فرآیند MDF و نحوه چرخش نمونه بین پاس‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- تصویر شماتیک فرآیند MDF و نحوه چرخش نمونه بین پاس‌ها

با توجه به این شکل و با در نظر گرفتن رابطه ۲ مقدار کرنش اعمال شده در هر پاس  $0.43$  می‌باشد و مقدار کرنش تجمعی بعد از ۸ پاس تقریباً به  $3.45$  می‌رسد. در شکل ۴ تصویر یکی از نمونه‌ها قبل و بعد از فرآیند MDF آورده شده است.

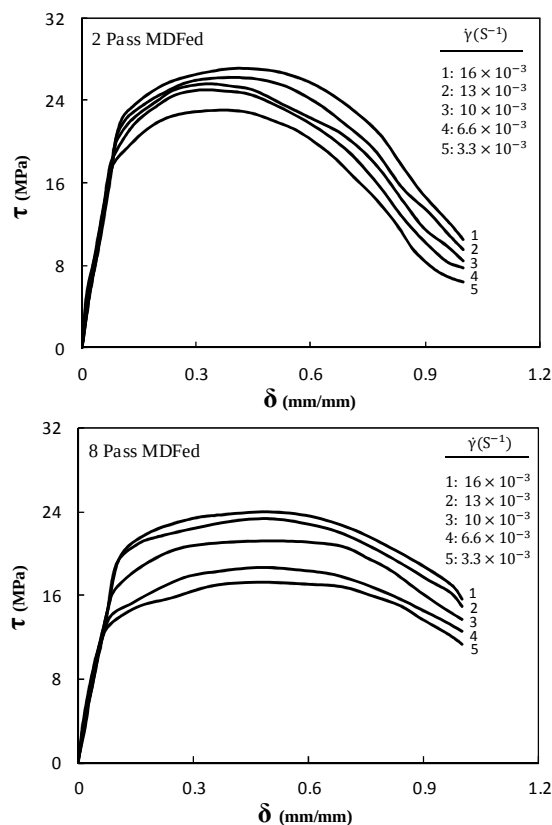
$$\Delta \epsilon_i = \ln \frac{h_0}{h_f} \quad i=1,2,\dots,n \quad (۲)$$

نمونه‌های با ضخامت  $0.9$  mm با سنباده زدن تا ضخامت  $0.7$  mm برای آزمون پانچ برشی آماده‌سازی شدند. برای این آزمون از قالب پانچ برشی با قطر پانچ  $3.175$  mm و قطر حفره قالب  $3.225$  mm استفاده گردید. آزمون‌های پانچ برشی توسط دستگاه نیوپورسال MTS و در دمای اتاق انجام گرفت. سرعت فک دستگاه MTS در محدوده  $0.1$  تا  $0.5$  میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد و داده‌های حاصل از

آورده شده است؛ سپس با استخراج مقادیر تنش تسلیم برشی<sup>۱</sup> و استحکام برشی نهایی<sup>۲</sup> از نمودارهای تنش برشی-جابجایی نرماله شده و با استفاده از رابطه ۴، ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m)، به عنوان شیب نمودارهای لگاریتمی «تنش تسلیم برشی-نرخ برش» و «استحکام برشی نهایی-نرخ برش» قابل محاسبه خواهد بود.

$$m = \frac{d \ln \tau}{d \ln \dot{\gamma}} \quad (4)$$

جهت مقایسه بهتر، هردو منحنی مذکور برای هر نمونه در یک نمودار ترسیم گردید. شکل‌های ۷ و ۸ نمودارهای مربوط به محاسبه m برای تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۶- نمودارهای تنش برشی برحسب جابجایی نرماله شده برای الف) نمونه ۲ پاس MDF شده و ب) نمونه ۸ پاس MDF شده

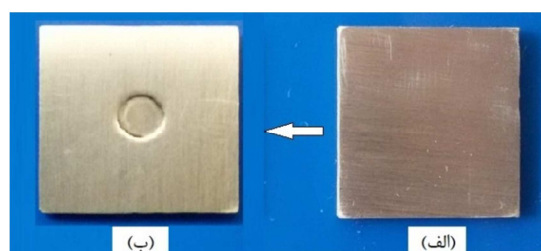
همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود منحنی‌های تنش برشی برحسب جابجایی نرماله شده شامل یک ناحیه الاستیک خطی، نقطه تسلیم، ناحیه کرنش سختی، استحکام برشی نهایی و در نهایت شکست می‌باشد. همچنین کاملاً واضح است که با افزایش نرخ کرنش برشی، منحنی‌ها بالاتر رفته و مقدار تنش تسلیم برشی و استحکام برشی نهایی افزایش می‌یابد.

تغییرات تنش تسلیم برشی (SYS) و استحکام برشی نهایی (USS) برحسب نرخ کرنش برشی برای نمونه‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ پاس به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها

دستگاه به صورت نیرو برحسب جابجایی فک بدست آمدند. در شکل ۵ نمونه آزمون پانچ برشی را قبل و بعد از آزمون نشان می‌دهد.



شکل ۴- تصویر یکی از نمونه‌ها قبل و بعد از عملیات MDF



شکل ۵- تصویر یک نمونه، الف) قبل و ب) بعد از آزمون سنبه برشی

نرخ کرنش برشی اعمال شده با توجه به سرعت حرکت فک دستگاه طبق رابطه ۳ [۱۳] در بازه  $0.003 \text{ S}^{-1}$  تا  $0.16 \text{ S}^{-1}$  محاسبه شد.

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{2} \left( \frac{\dot{Z}}{W} \right) \quad (3)$$

در رابطه بالا  $\dot{\gamma}$  نرخ کرنش برشی،  $\dot{Z}$  سرعت حرکت فک دستگاه و W لقی بین سنبه و قالب است.

نمونه‌ها با استفاده از سنباده ۵۰۰۰ آماده شده و در ادامه با استفاده از نمد همراه با آب و صابون پولیش شدند؛ سپس با محلولی حاوی ml ۶۰ الکل، ۳۰ ml آب، ۵ ml HCl و ۲ گرم  $\text{FeCl}_3$  اچ شدند. به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری استفاده شد. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار CLEMEX میانگین اندازه دانه‌ها و همچنین توزیع آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

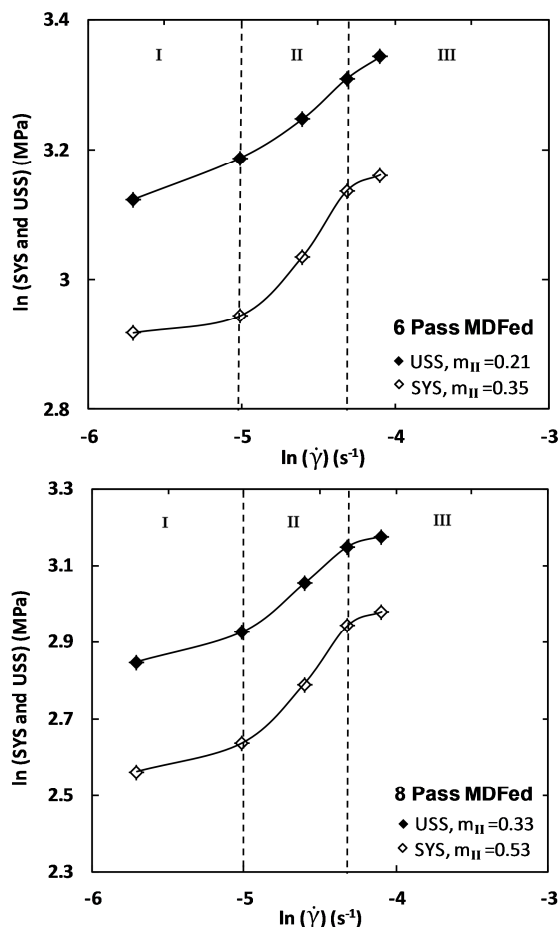
### ۳- نتایج و بحث

به منظور بدست آوردن ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m) با استفاده از آزمون پانچ برشی، ابتدا نمودار تنش برشی برحسب جابجایی نرماله شده ترسیم گردید. داده‌های خام بدست آمده از دستگاه MTS بر اساس نیرو برحسب جابجایی سنبه می‌باشد؛ با تقسیم جابجایی سنبه بر ضخامت نمونه و تقسیم نیروی مربوط به هر نقطه بر محیط سنبه و ضخامت نمونه (طبق رابطه ۱) می‌توان نمودار تنش برشی-جابجایی نرماله شده را بدست آورد. در ادامه نمودار تنش برشی-جابجایی نرماله شده مربوط به نمونه‌های ۲ پاس و ۸ پاس در شکل ۶

<sup>1</sup> Shear Yield stress(SYS)

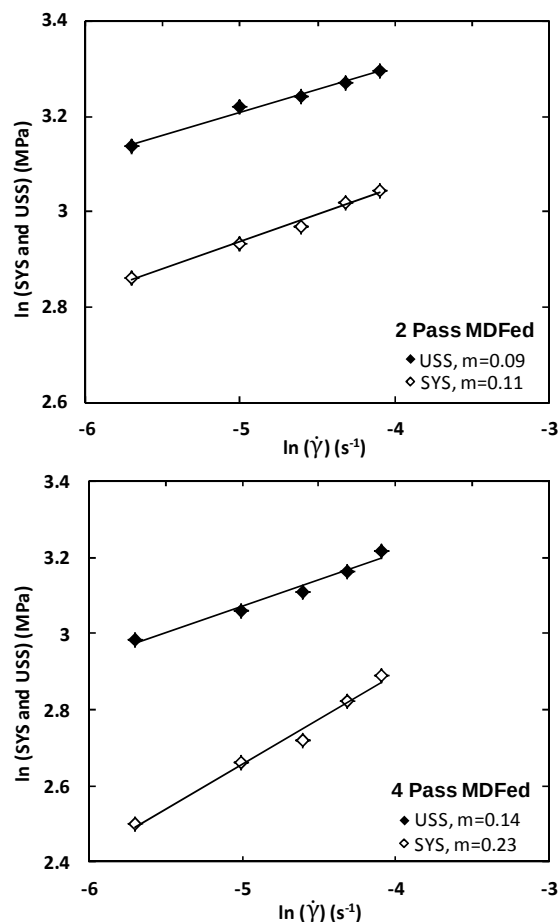
<sup>2</sup> Ultimate Shear Strength(USS)

می‌توان مشاهده نمود که نمونه‌های ۲ پاس و ۴ پاس رفتاری خطی از خود نشان می‌دهند و مقدار شیب آن‌ها ( $m$ ) نیز بسیار کم می‌باشد؛ اما در نمونه‌های ۶ و ۸ پاس، نمودارها به شکل S درآمده و شامل سه ناحیه مجزای I، II و III می‌باشند که نشان از رفتار سوپرپلاستیک می‌دهد.



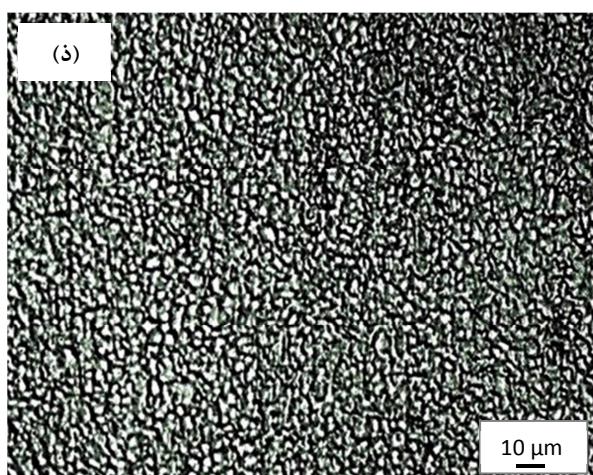
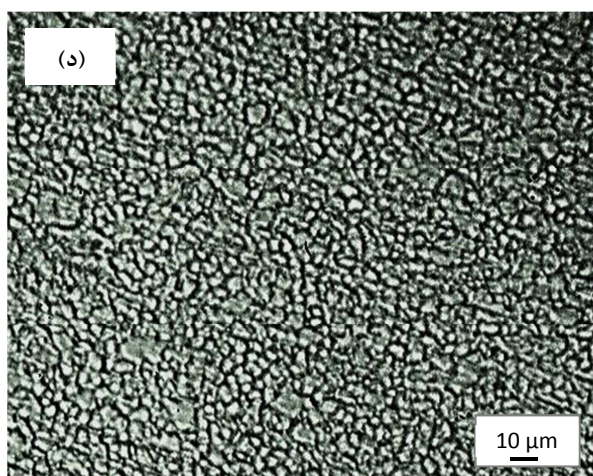
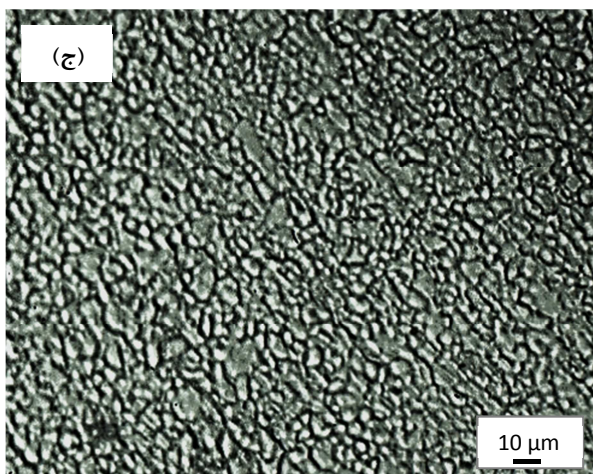
شکل ۸- نمودار تغییرات تنش برشی و استحکام برشی نهایی برحسب نرخ برش در مقیاس لگاریتمی برای نمونه حاصل از: الف) ۶ پاس MDF و ب) ۸ پاس MDF

جدول (۱) مقادیر  $m$  بدست آمده از منحنی‌های USS و SYS را برای تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد. با توجه به این جدول می‌توان گفت که با افزایش تعداد پاس‌های MDF مقدار  $m$  نیز افزایش یافته است و همچنین در همه نمونه‌ها مقدار  $m$  بدست آمده از منحنی SYS از مقداری که از منحنی USS بدست آمده است بیشتر است که ناشی از اثرات کرنش سختی می‌باشد. این موضوع مشابه با نتایجی است که اخیراً محمودی و همکاران [۱۴] در تحقیقی روی آلیاژ Sn-5%Sb گزارش کرده‌اند. در این تحقیق رفتار سوپرپلاستیک آلیاژ Sn-5%Sb تحت ۴ پاس فرآیند ECAP، با استفاده از آزمون پانچ برشی مورد بررسی قرار گرفته است که مقدار  $m$  بدست آمده از منحنی USS برای نمونه‌های ۱ تا ۴ پاس به ترتیب ۰/۱۵، ۰/۲۰، ۰/۲۳ و ۰/۳۵ گزارش شده، درحالی‌که مقادیر متناظر بدست آمده از منحنی SYS به ترتیب ۰/۲۳، ۰/۲۷، ۰/۳۰ و ۰/۵۷ می‌باشند.



شکل ۷- نمودار تغییرات تنش برشی و استحکام برشی نهایی برحسب نرخ برش در مقیاس لگاریتمی برای نمونه حاصل از الف) ۲ پاس MDF و ب) ۴ پاس MDF

ناحیه میانی II، محدوده‌ای است که رفتار سوپرپلاستیک در آن رخ می‌دهد و حساسیت به نرخ کرنش در این ناحیه حداکثر است. شیب منحنی USS و SYS در ناحیه II برای نمونه ۶ پاس به ترتیب ۰/۲۱ و ۰/۳۵ و برای نمونه ۸ پاس ۰/۳۳ و ۰/۵۳ به دست آمد که مقادیر مذکور نشان از بروز رفتار سوپرپلاستیک در نمونه‌های ۶ و ۸ پاس است. توجه به این نکته ضروری است که رابطه  $m = \frac{\partial \ln \tau}{\partial \ln \dot{\gamma}}$  فقط زمانی معتبر و صحیح است که مقدار اندکی کارسختی وجود داشته باشد و تغییرات در تنش تنها ناشی از تغییر در نرخ کرنش باشد [۱۴]. اما همان‌طور که در شکل (۶) قابل‌مشاهده است همه منحنی‌ها شامل یک ناحیه مشخص از کرنش سختی هستند و بنابراین نمودارهای لگاریتمی تغییرات USS برحسب نرخ کرنش برشی تحت تأثیر کرنش سختی قرار گرفته است که همین موضوع دلیل تفاوت در مقادیر بدست آمده از منحنی‌های USS و SYS می‌باشد. با توجه به این مطلب



شکل ۹- تصویر میکروسکوپ نوری از آلیاژ در حالت‌های الف) قبل از فرآیند MDF، ب) بعد از ۲ پاس MDF، ج) بعد از ۴ پاس MDF، د) ج) بعد از ۶ پاس MDF و ذ) بعد از ۸ پاس MDF

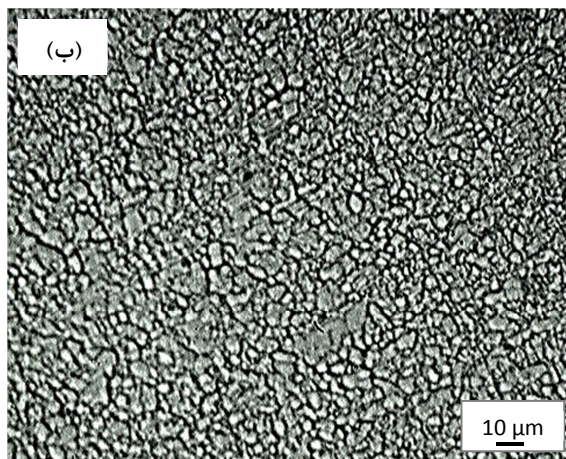
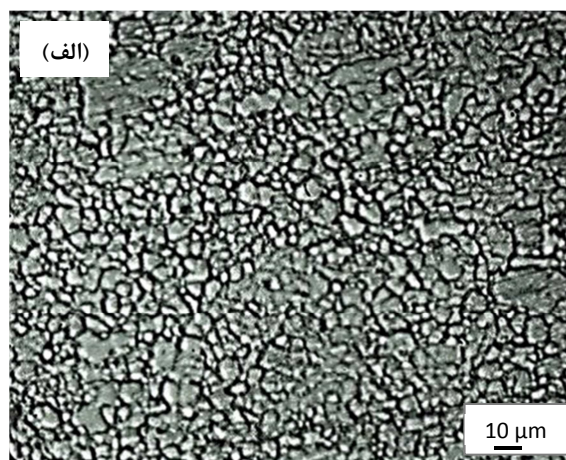
شکل ۹- ج نشان می‌دهد که میانگین اندازه دانه‌ها در نمونه ۴ پاس MDF شده نسبت به حالت پیشین اندکی افزایش یافته که دلیل این موضوع می‌تواند گرمای ایجاد شده حین فرآیند باشد که باعث شده دانه‌ها به میزان کمی رشد کنند؛ اما در شکل ۹-د می‌توان مشاهده کرد که ریزساختار آلیاژ در حالت ۶ پاس مجدداً کاهش یافته و میانگین اندازه دانه‌ها به  $2/4 \mu m$  رسیده است، همچنین توزیع اندازه دانه‌ها به

جدول ۱- مقادیر ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m) بدست آمده از منحنی SYS و USS برای نمونه‌های مختلف

| وضعیت | (m) <sub>sys</sub> | (m) <sub>uss</sub> |
|-------|--------------------|--------------------|
| ۲ پاس | ۰/۱۱               | ۰/۰۹               |
| ۴ پاس | ۰/۲۳               | ۰/۱۴               |
| ۶ پاس | ۰/۳۵               | ۰/۲۱               |
| ۸ پاس | ۰/۵۳               | ۰/۳۳               |

تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار آلیاژ قبل از فرآیند و بعد از ۲، ۴، ۶ و ۸ پاس فرآیند MDF در شکل ۹ آورده شده است. همچنین با بررسی ۱۰۰۰ دانه در هر مورد، میانگین اندازه دانه محاسبه گردیده است.

شکل ۹-الف نشان می‌دهد که ساختار نمونه قبل از فرآیند MDF شامل دانه‌های نسبتاً درشت در کنار تعداد زیادی از دانه‌های ریزتر با اندازه‌های متفاوت است که دامنه وسیعی از اندازه دانه با میانگین  $4/2 \mu m$  را نشان می‌دهد؛ اما با توجه به شکل ۹-ب مشاهده می‌شود که ساختار آلیاژ پس از ۲ پاس فرآیند، نسبت به حالت MDF نشده ریزتر و میانگین اندازه دانه‌ها به  $2/6 \mu m$  کاهش یافته است که توزیع یکنواخت‌تر دانه‌ها را نشان می‌دهد.



## ۵- مراجع

- [1] Valiev R.Z., Langdon T.G., Progress in Materials Science, Vol. 51, pp.881-981, 2006.
- [2] Biswas S., Suwas S., Scripta Materialia, Vol. 66, pp.89-92, 2012.
- [3] Miura H., Maruoka T., Yang X., Jonas J.J., Scripta Materialia, Vol. 66 pp. 49-51, 2012.
- [4] Xing J.Y., Miura X., Sakai H., Materials T., Transactions, Vol. 48, No. 6, pp.1406-1411, 2007.
- [5] Funami M .N. M. H. a. K., Materials Transactions, Vol. 44, No. 11, pp. 2288-2297, 2003.
- [6] E.A.K. Gennady A. Salishchev, Sergey V. Zhrebtsov, S. Lee Semiatin, Materials Science Forum, Vol. 735, pp.253-258, 2012.
- [7] Lucas G.E., Shekherd J.W., Odette G.R., S. Panchanadeeswaran, Journal of Nuclear Materials, Vol. 122, pp.429-434, 1984.
- [8] Nayyeri G., Mahmudi R., Materials Science and Engineering: A, Vol. 527, pp. 4613-4618, 2010.
- [9] Karami M., Mahmudi R., Materials Science and Engineering: A, Vol. 576, pp.156-159, 2013.
- [10] Mahmudi R., Alizadeh R., Azhari S., Materials Letters, Vol. 97, pp. 44-46, 2013.
- [11] Mahmudi R., Geranmayeh A.R., Mahmoodi S.R., Khalatbari A., Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Vol. 18, pp.1071-1078, 2007.
- [12] Alden T.H., Acta Metallurgica, Vol. 15, PP. 469-480, 1967.
- [13] Guduru R.K., Darling K.A., Kishore R., R.O. Scattergood, C.C. Koch, K.L. Murty, Materials Science and Engineering: A, Vol. 395, pp. 307-314, 2005.
- [14] Mahmudi R., Alizadeh R., Azhari S., Materials Letters, Vol. 97, pp.44-46, 2013.

سمت دانه‌بندی ریزتر رفته و دامنه تغییرات اندازه دانه نسبت به نمونه‌های ۲ و ۴ پاس کمتر شده که نشان‌دهنده موفقیت نسبی فرآیند MDF در ایجاد ساختاری ریز و همگن است. درنهایت ریزساختار و نمودار توزیع دانه‌ها پس از ۸ پاس فرآیند MDF شکل ۹- ذ نشان می‌دهد که میانگین اندازه دانه‌ها به  $2\text{ }\mu\text{m}$  رسیده و تغییرات زیادی نسبت به حالت ۶ پاس نداشته است اما دامنه تغییرات اندازه دانه نسبت به حالت‌های قبل به مراتب کوچک‌تر شده و ساختاری همگن شامل دانه‌های بسیار ریز بدست آمده که از جمله موارد موردنیاز برای دستیابی به رفتار سوپرپلاستیک در مواد است. این توزیع از دانه‌بندی لغزش دانه‌ها بر روی یکدیگر و در نتیجه سیلان سوپرپلاستیک در آلیاژ را سهل می‌سازد.

درمجموع می‌توان این نتیجه‌گیری را کرد که بیشترین کاهش اندازه دانه بعد از دو پاس فرآیند رخ داده است و طی پاس‌های بعدی تغییر قابل توجهی در اندازه دانه مشاهده نمی‌شود و ادامه فرآیند بعد از پاس دوم صرف ایجاد یکنواختی بیشتر در ساختار آلیاژ گردیده است.

## ۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از پانچ برشی رفتار سوپرپلاستیک آلیاژ Sn-1%Bi فرآوری شده با فرآیند فورج چندجهته (MDF) مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج زیر حاصل شد:

۱- نتایج آزمون پانچ برشی برای نمونه‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ پاس MDF شده، مقدار  $m$  را به ترتیب ۰/۱۱، ۰/۲۳، ۰/۳۵ و ۰/۵۳ گزارش می‌کند. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده، این آزمون نیز نشان می‌دهد که نمونه‌های ۶ و ۸ پاس MDF شده سوپرپلاستیسته را تجربه می‌کنند.

۲- بررسی‌های ریزساختاری نشان می‌دهد که میانگین اندازه دانه بعد از دو پاس فرآیند MDF از  $4/2\text{ }\mu\text{m}$  در حالت اولیه به  $2/7\text{ }\mu\text{m}$  کاهش می‌یابد و طی پاس‌های بعدی تغییرات چشم‌گیری ندارد به‌گونه‌ای درنهایت بعد از ۸ پاس به  $2\text{ }\mu\text{m}$  می‌رسد اما بررسی نمودارهای توزیع اندازه دانه حاکی از آن است که ریزساختار آلیاژ قبل از فرآیند MDF بسیار ناهمگن بوده و تغییرات اندازه دانه‌ها دامنه گسترده‌ای دارد، درحالی‌که با انجام فرآیند MDF به‌مرور از میزان این ناهمگنی کاسته شده و درنهایت در نمونه ۸ پاس MDF شده شاهد ریزساختاری بسیار یکنواخت و همگن با دامنه کوچکی از تغییرات اندازه دانه هستیم.

۳- مشاهده مقادیر میانگین اندازه دانه در نمونه‌های ۶ و ۸ پاس MDF شده نشان از تغییرات زیادی نمی‌دهد درحالی‌که با توجه به نتایج آزمون پانچ برشی رفتار سوپرپلاستیک در این دو حالت متفاوت است و مقدار ضریب حساسیت به نرخ کرنش در نمونه ۸ پاس MDF شده تقریباً ۰/۲ بیشتر است. اعتقاد بر این است که در نمونه ۸ پاس MDF شده سهم مرزدانه‌های بزرگ زاویه به مقدار قابل‌توجهی نسبت به حالت ۶ پاس MDF شده افزایش یافته است و شرایط برای لغزش دانه‌ها روی یکدیگر به‌عنوان مکانیسم اصلی تغییر شکل در مواد سوپرپلاستیک فراهم شده است.