گواهی ارائه مقاله

ضمن تشکر و قدردانی از ارائه مقاله با عنوان

بررسی فرآیند تغییر شکل سوپرپلاستیک آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۶ به روش حداکثر مقدار m

در هشتمین کنفرانس بین المللی مهندسی مواد و متالورژی
و سیزدهمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن علمی ریخته‌گری ایران
در تاریخ ۱۵ لغایت ۱۷ مهرماه ۱۳۹۸ - ایران، تهران

این گواهی به نویسندگان مقاله:

عاطفه سعید، ابوالفضل رضایی بزاز، محمد مزینانی

اعطا می گردد. موفقیت روزافزون شما را در پیشرفت علم و فناوری، از خداوند متعال خواستاریم.

محمد تقی صباحی
دبیر کنفرانس

جلال عبادی
رییس انجمن علمی ریخته‌گری ایران

محمود یکی احمدآبادی
رییس انجمن متالورژی و مواد ایران

بررسی فرآیند تغییر شکل سوپرپلاستیک آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۶ به روش حداکثر مقدار m

عاطفه سعید[۱]، ابوالفضل رضایی بزاز[۲]، محمد مزینانی[۲]

atefehsaeed72@gmail.com

چکیده

در فرآیند تغییر شکل سوپرپلاستیک (SPD) حساسیت به نرخ کرنش m پارامتر مهمی است به‌گونه‌ای که با افزایش مقدار m، خاصیت سوپرپلاستیک مواد افزایش می‌یابد. در این پژوهش مفهوم جدیدی به نام تغییر شکل سوپرپلاستیک با حداکثر m (MaxmSPD) مورد استفاده قرار گرفته است. در مرحله اول آزمایش‌ها چندین آزمایش کشش گرم در دمای ۴۲۰°C و نرخ کرنش‌های مختلف بر روی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۶ انجام و نتایج به‌صورت نمودار نیرو-جابجایی توسط دستگاه سنتام ۱۵ تنی ثبت شد با استفاده از فرمول‌های موجود مقادیر تنش-کرنش حقیقی محاسبه شد و بهینه‌سازی توسط تابع Solver در اکسل بر روی آنها انجام گرفت در نهایت مقایسه‌ای بین داده‌های تجربی و تئوری انجام شد نتایج این بخش نشان‌دهنده این بود که m علاوه بر نرخ کرنش به کرنش نیز وابسته است. در مرحله دوم آزمایش کشش گرم به‌صورت چندمرحله‌ای در نرخ کرنش‌ها و کرنش‌های مختلف انجام گرفت به‌گونه‌ای که در هر نرخ کرنش و کرنش مقدار m حداکثر باشد. نتایج تجربی نشان داد که بدون فرآیند اصلاح دانه، ازدیادطول آلیاژ ۵۰۸۶ نسبت به فرآیند (SPD) که در آن کرنش تغییر شکل ثابت نگه‌داشته شده بود به‌اندازه ۳۲,۴۲%افزایش یافت. بنابراین یافته‌ها، توسعه فرآیند (MaxmSPD) نه‌تنها نیاز به اصلاح دانه را برای (SPD) کم می‌کند، بلکه سبب کاهش هزینه‌های مصرفی و صرفه‌جویی در زمان تولید می‌شود.

---

[۱]- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه فردوسی مشهد

[۲]- دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه فردوسی مشهد

کلمات کلیدی: سوپرپلاستیک، MaxmSPD، آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۶، ضریب حساسیت به نرخ کرنش

۱- مقدمه

تاکنون، مطالعات زیادی بر روی رفتار سوپرپلاستیک مواد صورت گرفته است. بعضی از این مطالعات ویژگی‌های اصلی این پدیده و کاربرد آن را موردبحث قرار می‌دهد. شربی[۱] و واس ورد[۲] عنوان کرده‌اند که تاریخچه رفتار سوپرپلاستیک ممکن است به دوره اولیه برنز حدود ۲۵۰۰ سال قبل از میلاد مسیح برگردد. برنز آرسنیک و فولادهای معروف دمشق (۳۰۰ سال قبل از میلاد مسیح) به‌عنوان نمونه‌های اولیه از مواد سوپرپلاستیک ارائه‌شده است. طلا و نقره و همچنین ورق‌های بسیار نازک قلع و یا شیشه‌های معمولی که در دمای بالا تغییر شکل می‌دهند، ممکن است به‌عنوان مواد سوپرپلاستیک در نظر گرفته شوند. اولین گزارش رسمی درباره رفتار سوپرپلاستیک به سال ۱۹۱۲ برمی‌گردد که آلیاژ برنج در تنش تک محوری در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تا ۱۶۳٪ ازدیاد طول داشت[۱].

در سال ۱۹۳۴ رفتار سوپرپلاستیک مواد توسط پیرسن[۳] در انگلستان با انجام آزمایش بر روی آلیاژهای یوتکتیک Pb-Sn و Bi-Sn و مشاهده ازدیاد طول‌های زیاد قبل از شکست نمونه موردمطالعه قرار گرفت. این نتیجه تا حد زیادی توسط دانشمندان و مهندسان به مدت تقریباً ۳۰ سال در اروپای غربی و ایالات‌متحده نادیده گرفته شد. کار تجربی بر روی مواد سوپرپلاستیک توسط آندروود[۴] در سال ۱۹۶۲ در اتحاد جماهیر شوروی و نهایتاً تحقیقات گسترده‌ای از رفتار سوپرپلاستیک در آمریکا توسط بکافن[۵] و همکارانش در سال ۱۹۶۴ انجام شد. از آن زمان تا به امروز تحقیقات زیادی بر روی مواد سوپرپلاستیک و شکل‌دهی آن انجام شد که منجر به تولید قطعات یکپارچه در ابعاد بزرگ شده‌است[۲].

سوپرپلاستیسیته توانایی یک ماده پلی کریستال برای نمایش ازدیاد طول کششی بسیار زیاد قبل از شکست، تحت شرایط مناسب دمایی و نرخ کرنش است. این رفتار در شکل‌دهی قطعات، اجزاء سازه ساختمان که به‌طورمعمول نمی‌توان آن‌ها را به‌آسانی تولید کرد به‌کارگرفته می‌شود[۳]. برای اینکه ماده رفتار سوپرپلاستیک از خود نشان دهد لازم است که موارد زیر رعایت شود:

- میانگین اندازه دانه، d نباید بیش از یک مقدار بحرانی که حدود ۱۰-۱۵ میکرومتر است باشد.
- دمای تغییر شکل T نباید کمتر از (۰٫۴-۰٫۵ Tm) باشد. (Tmنقطه ذوب ماده بر حسب کلوین است.)

---

[۱] Sherby
[۲] Wadsworth
[۳] Pearson
[۴] Underwood
[۵] Backofen

_ سوپرپلاستیسیته تنها در محدوده‌ای از نرخ کرنش (معمول $(10^{-1}-10^{-5})s^{-1}$) رخ می‌دهد.

_ ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m) باید بیشتر از ۰٫۳ باشد.

برای بررسی رفتار مکانیکی مواد سوپرپلاستیک از آزمایش کشش استفاده می‌شود. مهم‌ترین خاصیت مکانیکی مواد سوپرپلاستیک حساسیت بالای تنش سیلان به نرخ کرنش است که با m نشان داده می‌شود. برای بررسی رفتار مواد در تغییر شکل اولاً، هولمان[۱] یک رابطه تجربی را برای تغییر شکل پلاستیک به شکل توانی پیشنهاد کرد[۴]:

$$\sigma=K_H\varepsilon^n \qquad (۱)$$

K_H ثابت هولمان و n نشان‌دهنده کرنش سختی یک ماده است. بکافن[۲] و همکارانش مدل تجربی برای مواد سوپرپلاستیک پیشنهاد دادند:

$$\sigma = K_B\dot{\varepsilon}^m \qquad (۲)$$

K_B ثابت بکافن و m نشان‌دهنده حساسیت به نرخ کرنش برای مشخص کردن توانایی سوپرپلاستیسیته مواد است. روسارد[۳] یک معادله تجربی را با توجه به اثرات کرنش سختی در تغییر شکل سوپرپلاستیک پیشنهاد کرد:

$$\sigma = K_R\varepsilon^n\dot{\varepsilon}^m \qquad (۳)$$

K_R ثابت روسارد است. از آنجایی‌که معادله روسارد شامل اثر مشترک حساسیت به نرخ کرنش و کرنش سختی است، توانایی جامع‌تری در توصیف رفتار سوپرپلاستیک نسبت به معادله بکافن دارد[۴].

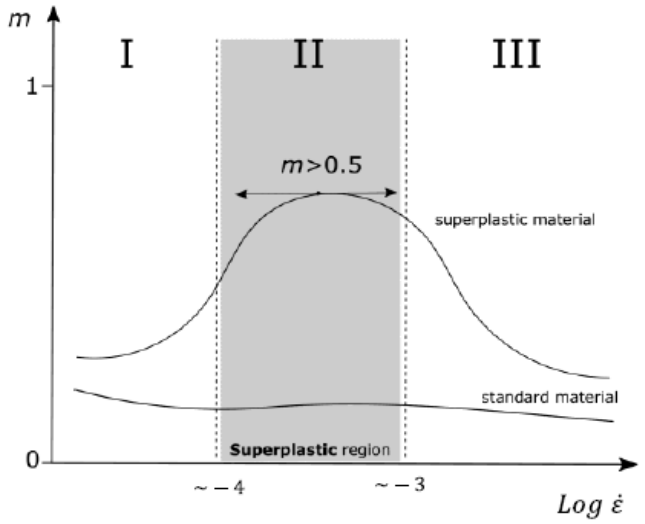
مهم‌ترین خاصیت مکانیکی مواد سوپرپلاستیک حساسیت بالای تنش سیلان به نرخ کرنش است که با m نشان داده می‌شود.مقدار m برای موادی که خاصیت سوپرپلاستیک دارند بیشتر از ۰٫۳ است (محدوده آن ۰٫۴-۰٫۸) که هرچه مقدار m افزایش یابد مقاومت در برابر گلویی بیشتر است و درنتیجه می‌توان به ازدیاد طول‌های زیادی رسید. با به دست آوردن شیب منحنی لگاریتم نرخ کرنش-تنش که با استفاده از معادله (۲) رسم می‌شود می‌توان مقدار m را به دست آورد[۵].

طبق این منحنی در ناحیه I و III m <0.3 و نرخ کرنش کم است درحالی‌که منطقه II با m> 0.3 رفتار سوپرپلاستیک را نشان می‌دهد که در آن ازدیاد طول زیاد است[۵]. ناحیه دوم از اهمیت بالایی در تغییر شکل سوپرپلاستیک برخوردار است. در این ناحیه در سرتاسر سیلان دانه‌ها به‌صورت هم‌محور باقی

---

[۱] Hollomon
[۲] Backofen
[۳] Rossard

می‌مانند (نرخ کرنش به‌اندازه دانه وابسته است.) و تغییر شکل توسط مکانیسم لغزش مرز دانه کنترل می‌شود. در این ناحیه حساسیت به نرخ کرنش مقدار بالایی دارد به عبارتی برای مشاهده رفتار سوپرپلاستیک در مواد تغییر شکل باید در این ناحیه رخ دهد[٦]. شکل (۱) تغییرات m برحسب لگاریتم نرخ کرنش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقدار m از یک مقدار حداقل به حداکثر و درنهایت مجدداً به یک مقدار حداقل می‌رسد درنتیجه در قله منحنی بیشترین میزان m را خواهیم داشت[۵].



شکل ۱. تغییرات نرخ کرنش با حساسیت به نرخ کرنش (m) [۷].

رابطه بین درصد ازدیاد طول در مواد سوپرپلاستیک و مقدار mاز اهمیت بالایی برخوردار است. فرض کنید در یک میله سوپرپلاستیک به سطح مقطع A که باری به‌اندازه P به آن اعمال می‌شود. در این حالت مقدار تنش برابر است با:

$$\frac{P}{A} = \sigma = C(\varepsilon\cdot)^m \rightarrow \varepsilon\cdot = \frac{1}{L}\frac{dL}{dt} = -\frac{1}{A}\frac{dA}{dt} \qquad (٤)$$

با توجه به روابط فوق داریم:

$$-\frac{dA}{dt} = \left(\frac{P}{C}\right)^{\frac{1}{m}}\left(\frac{1}{A^{\frac{(1-m)}{m}}}\right) \qquad (٥)$$

طبق این معادله تا هنگامی‌که m<1 است، هرچه سطح مقطع کوچک‌تر باشد، سطح با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد. هنگامی‌که m=1 است، تغییر شکل به‌صورت گرانروی نیوتنی است و dA/dt مستقل از A بوده و از هرگونه گلویی شدن اولیه حین ازدیاد طول جلوگیری می‌شود. با نزدیک شدن m به مقدار واحد، آهنگ رشد گلویی‌های اولیه به‌شدت کم می‌شود[۸].

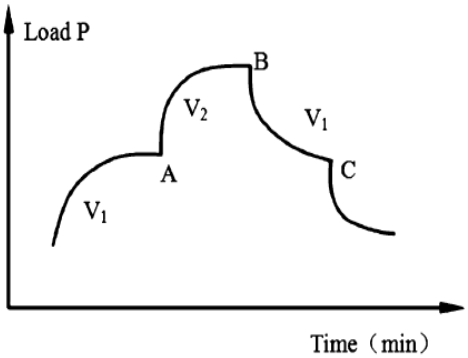
هدف از محاسبه مقدارm این‌است‌که درک رابطه بین قوانین مکانیک ماکروسکوپیک و مکانیسم‌های فیزیکی میکروسکوپی در هنگام تغییر شکل سوپرپلاستیک آسان گردد[۹].

یک مفهوم کاملاً جدید از تغییر شکل سوپرپلاستیک به نام حداکثر m در تغییر شکل سوپرپلاستیک پیشنهادشده است که از طریق اندازه‌گیری هم‌زمان مقدار m و کنترل نرخ کرنش تغییر شکل به‌گونه‌ای انجام می‌شود که حداکثر m همیشه در فرآیند تغییر شکل، از طریق کنترل دینامیکی و تنظیم نرخ کرنش تغییر شکل حفظ شود.[۱۲,۱۰]معادلات زیر با استفاده از مشتق معادله (۲) به‌دست‌آمده‌اند. با توجه به تغییرات سیکلی نرخ کرنش در فرآیند تغییر شکل سوپرپلاستیک

$$m = \frac{Log(\frac{P_B}{P_A})}{Log(\frac{V_2}{V_1})} \qquad (۵)$$

$$m = \frac{Log(\frac{P_B}{P_C})}{Log(\frac{V_2}{V_1})} \qquad (٦)$$

پارامترهای به کار رفته در معادلات (۵) و (٦) در شکل (۲) نشان داده شده است[۹].



شکل .۲. منحنی تغییرات زمان‌بر حسب بارگذاری برای اندازه‌گیری مقدارm [۱۳].

در طول فرآیند تغییر شکل سرعت تغییر شکل به‌طور مداوم، افزایش یا کاهش می‌یابد. یک سری از P_i و V_i به‌صورت دینامیکی اندازه‌گیری و بر اساس معادله (۵) و (٦)، m به‌طور لحظه‌ای تعیین می‌شود. با توجه به حداکثر مقدار m، سرعت تغییر شکل می‌تواند کنترل و تنظیم شود به‌طوری‌که سرعت تغییر شکل همیشه در موقعیتی است که m حداکثر حفظ شود[۱۰]. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده‌شده است منحنی در سرعت v_1 به نقطه اوج A می‌رسد سپس برای مدتی به یک پایداری نسبی رسیده و درنهایت با پرش سرعت از v_1 به v_2 به نقطه اوج B که بار آن P_B می‌رسد. طول نمونه در نقطه A برابر طول نمونه در نقطه

B می‌باشد درنتیجه $v_2.\Delta t_1 = v_1\Delta t_2$ با جایگذاری P_A،P_B،v_1وv_2 در معادله (۵) می‌توان m را به‌طور لحظه‌ای به‌دست آورد[۹]. هنگامی‌که سرعت تغییر شکل در مرحله افزایشی است، سرعت می‌تواند به‌طور مداوم افزایش یابد اگر$m_i > m_{i-1}$، اما هنگامی‌که سرعت تغییر شکل در مرحله کاهشی است، سرعت می تواند به‌طور مداوم کاهش یابد اگر $m_i < m_{i-1}$.[۱٤]

در تحقیقاتی که جدیداً بر روی آلیاژهای پایه تیتانیم با استفاده از روش حداکثر m شکل‌دهی سوپرپلاستیک صورت گرفته است مشاهده‌شده که بدون ریزدانه کردن ساختار می‌توان ازدیاد طول‌های نسبتاً بالایی به دست آورد. در پژوهش حاضر از آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸٦ استفاده شد. هدف از انجام این پروژه رسیدن به ازدیاد طول‌های بالا با استفاده از روش حداکثر m شکل‌دهی سوپرپلاستیک بدون ریزدانه کردن ساختار اولیه است.

۲- مواد و روش تحقیق

در تحقیق حاضر از آلیاژ آلومینیوم AA5086 به‌عنوان ماده اولیه استفاده‌شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژ مذکور با استفاده از روش اسپکترومتری نشری به وسیله دستگاه PMI Master Smart مشخص شده که در جدول (۱) نشان داده‌شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ AA5086

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Be	Ca	Li
0.11	0.13	0.07	0.53	3.5	0.05	Trace	0.01	0.0006	Trace	0.002	Trace
Pb	Sn	Sr	V	Na	Bi	Zr	B	Ga	Cd	Co	Al
0.004	<0.005	Trace	0.02	0.003	<0.004	Trace	<0.001	0.004	0.005	<0.002	Base

نمونه‌های آزمایش از یک بیلت[1] با سطح مقطع دایره‌ای شکل به قطر ۹ و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر با استفاده از فرآیند برشکاری و تراشکاری ساخته شدند. آماده‌سازی نمونه برای بررسی ریزساختاری و میکروسکوپی نمونه انجام شد. ریزساختار ماده مورد استفاده در این تحقیق بوسیله حکاکی با محلولی با ترکیب زیر مشخص شد.

12 ml HCl +6 ml HNO3+1 ml HF (48%)+1 ml H2O

25 ml HNO3

[1] Billet

3gr chromic acid+10 ml of H2O

با مخلوط کردن ترکیبات فوق طی سه مرحله متوالی ترکیب محلول حکاکی به دست می‌آید[۱۵]. درنهایت تصویر ریزساختار نمونه با استفاده از میکروسکوپ نوری Olympus BX60M گرفته شد. آزمایش کشش با استفاده از دستگاه سنتام ۱۵ تنی مجهز به کوره سه ناحیه‌ای انجام گرفت. شمایی از دستگاه مورداستفاده در شکل (۳) نشان داده‌شده است. برای پایدار شدن دمای فک‌ها و میله‌های بالایی و پایینی از یک سیستم گردش آب استفاده می‌شود.

شکل ۳. دستگاه سنتام STM-150.

به‌منظور بررسی خاصیت سوپرپلاستیک ماده مورد بررسی آزمایش‌ها در سه مرحله انجام شد. در مرحله اول آزمایش کشش گرم در دمای ۴۲۰°C و نرخ کرنش‌های s^{-1} (۱×۱۰$^{-۳}$، ۲×۱۰$^{-۳}$، ۴×۱۰$^{-۳}$، ۱×۱۰$^{-۴}$، ۲×۱۰$^{-۴}$، ۴×۱۰$^{-۴}$) انجام گرفت. نتایج آزمایش کشش به‌صورت منحنی نیرو-جابجایی به‌طور خودکار در رایانه ثبت شد. برای رسم نمودار تنش-کرنش حقیقی ابتدا داده‌های آزمایش به تنش و کرنش مهندسی و در نهایت به تنش-کرنش حقیقی تبدیل شدند.

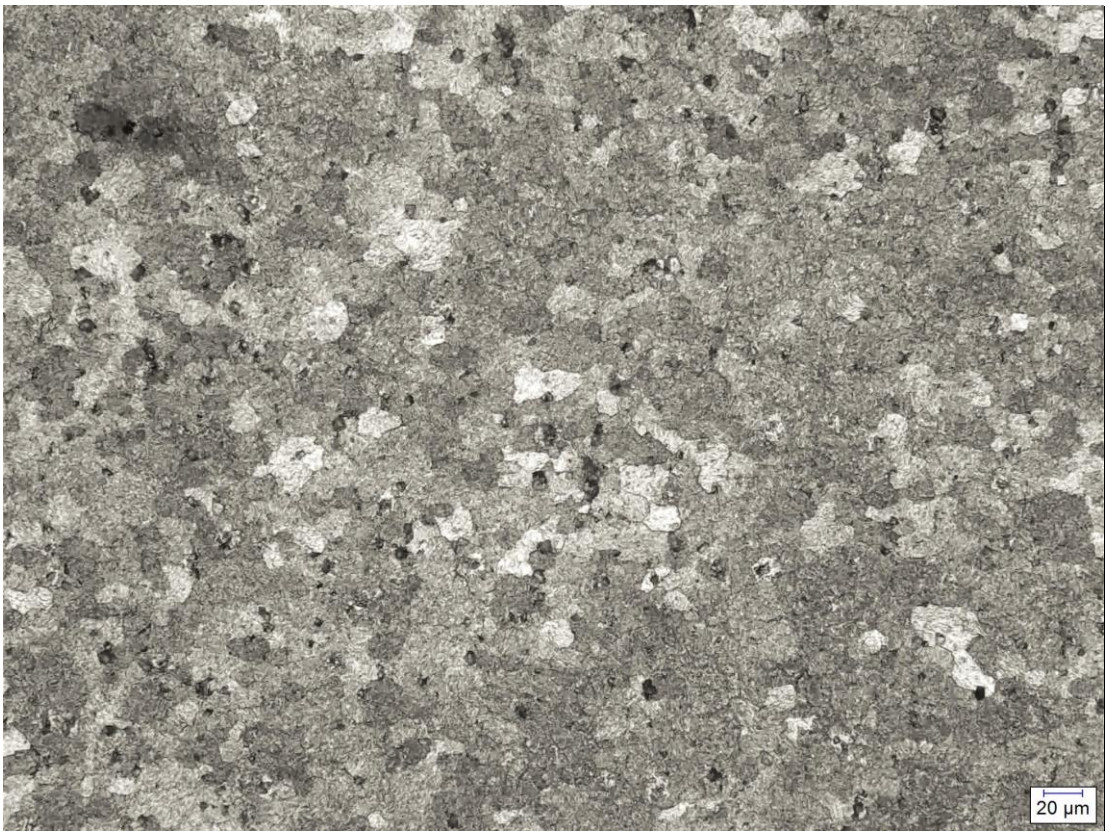
در مرحله دوم ثوابت معادله (۷) ازطریق رسم منحنی برازنده منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمایش به روش کمترین مربعات و با استفاده از تابع solver در اکسل به دست آمد.

$$\sigma = k\dot{\varepsilon}^{(g_0+g_1\dot{\varepsilon}+g_2\varepsilon+g_3\dot{\varepsilon}\varepsilon+g_4\dot{\varepsilon}^2+g_5\varepsilon^2+g_6\dot{\varepsilon}^3)} \cdot \varepsilon^{(h_0+h_1\dot{\varepsilon}+h_2\varepsilon+h_3\dot{\varepsilon}\varepsilon+h_4\dot{\varepsilon}^2+h_5\varepsilon^2+h_6\varepsilon^3+h_7\varepsilon^4)} \quad (۷)$$

در مرحله سوم ابتدا مقادیر m حداکثر در نرخ کرنش‌های مختلف به‌وسیله تابع solver در اکسل به دست آمد. سپس آزمایش کشش به‌صورت چندمرحله‌ای در دمای ثابت انجام گرفت. در این آزمایش سرعت کرنش در هر مرحله ثابت در نظر گرفته شد و مرحله با سرعت کرنش ثابت تا کرنشی که در آن کرنش و سرعت کرنش این مرحله آزمایش مقدارm حداکثر شود ادامه یافت. سپس مرحله بعدی با سرعت کرنش ثابت اما متفاوت با مرحله قبلی انجام گرفت. آزمایش به همین ترتیب تا مرحله شکست نمونه ادامه یافت. درنهایت نتایج حاصل از آزمایش‌های فرآیند سوپرپلاستیک که در آن سرعت کرنش تغییر شکل ثابت نگه‌داشته شد با فرآیند حداکثر m سوپرپلاستیک مقایسه و بررسی شد.

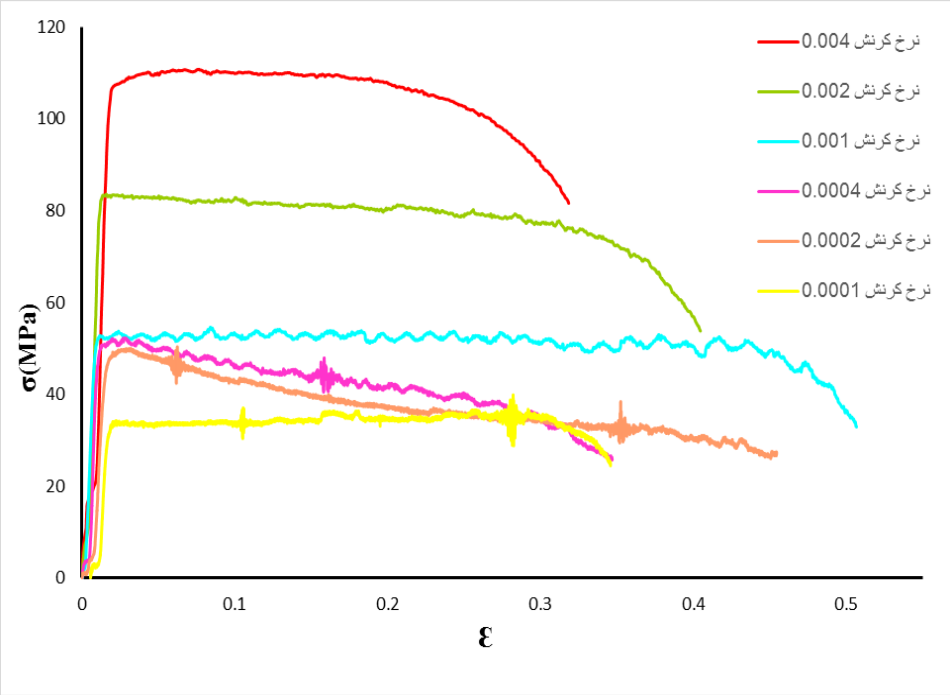
۳- نتایج و بحث

شکل(۴) ریزساختار اولیه نمونه آزمایش را نشان می‌دهد. پردازش اندازه دانه با نرم افزار MIP انجام شد، متوسط اندازه دانه ٦,۴٦ میکرومتر به‌دست آمد. در تغییر شکل سوپرپلاستیک چون مکانیزم غالب لغزش مرزدانه و وابسته به اندازه دانه است اگر دانه ها از ابتدا هم‌محور باشند در نهایت نیز هم‌محور باقی می‌مانند که این سبب یکنواختی ساختار می‌شود.



شکل ٤. ریزساختار اولیه نمونه آزمایش،آلیاژ آلومینیوم ٥٠٨٦.

به‌منظور بررسی خاصیت سوپرپلاستیک آزمایش‌کشش دردمای ثابت ۴۲۰°C و نرخ کرنش‌های s^{-1} (۱×۱۰$^{-۳}$، ۲×۱۰$^{-۳}$، ۴×۱۰$^{-۳}$، ۱×۱۰$^{-۴}$، ۲×۱۰$^{-۴}$، ۴×۱۰$^{-۴}$) انجام گرفت. منحنی‌های نیرو-جابجایی ثبت شده توسط دستگاه به منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی تبدیل شدند. باتوجه به شکل (۵) می‌توان مشاهده کرد که در یک محدوده خاص با کاهش نرخ کرنش میزان ازدیادطول افزایش یافت و می‌توان دریافت که نرخ کرنش بهینه و مطلوب که در آن بیشترین ازدیاد طول دیده شد s^{-1} ۱×۱۰$^{-۳}$ است، که در شکل (٦) این موضوع به طور واضح قابل مشاهده است.



شکل ۵. منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی در دمای۴۲۰°C و نرخ کرنش‌های مختلف.

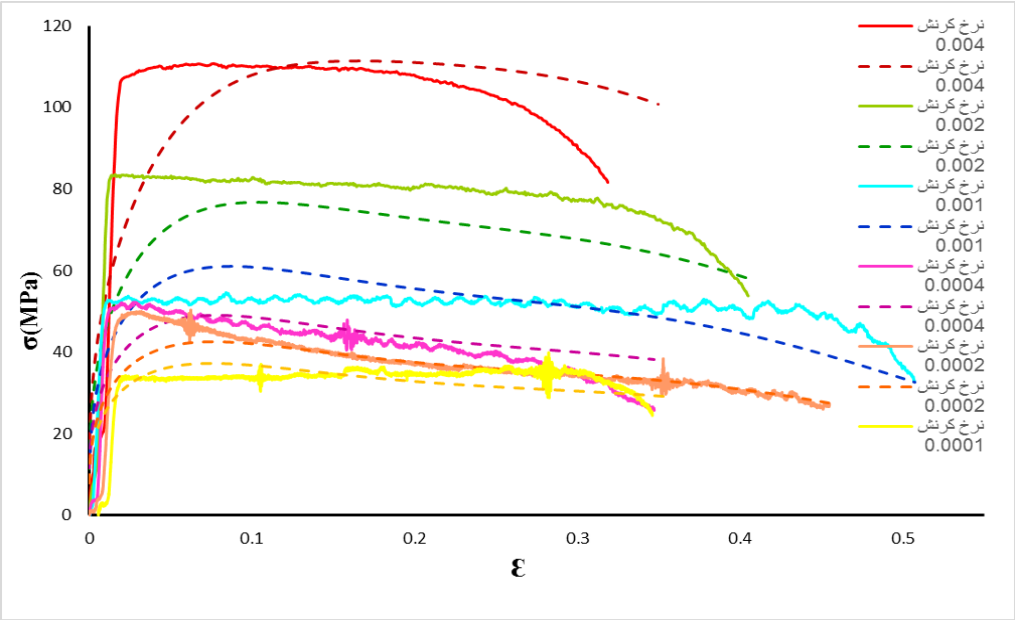
شکل ٦. نمونه‌های حاصل از آزمایش کشش گرم در نرخ کرنش‌های مختلف.

با استفاده از تابعsolver در اکسل بهینه‌سازی انجام گرفت و ثوابت معادله (۷) به دست آمد که در جدول (۲) این مقادیر قابل مشاهده است.

جدول ۲. ثوابت معادله (۳-۵) در آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۶ در دمای ۴۲۰°C

K	g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6
548.81034	0.181153	0.02356	-0.00994	0.23227	-4.58012	-0.19391	-2.36892
h_0	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7
0.30291	0.03647	0.24305	-469.7793	-0.38773	18.70187	-55.3111	76.89230

با مقایسه نمودارهای تجربی و تئوری(مطابق شکل (۷))می‌توان دریافت که m علاوه بر نرخ کرنش به کرنش تغییر شکل هم وابسته است.



شکل ۷.مقایسه بین نمودارهای حاصل از آزمایش و نمودارهای حاصل از بهینه سازی.

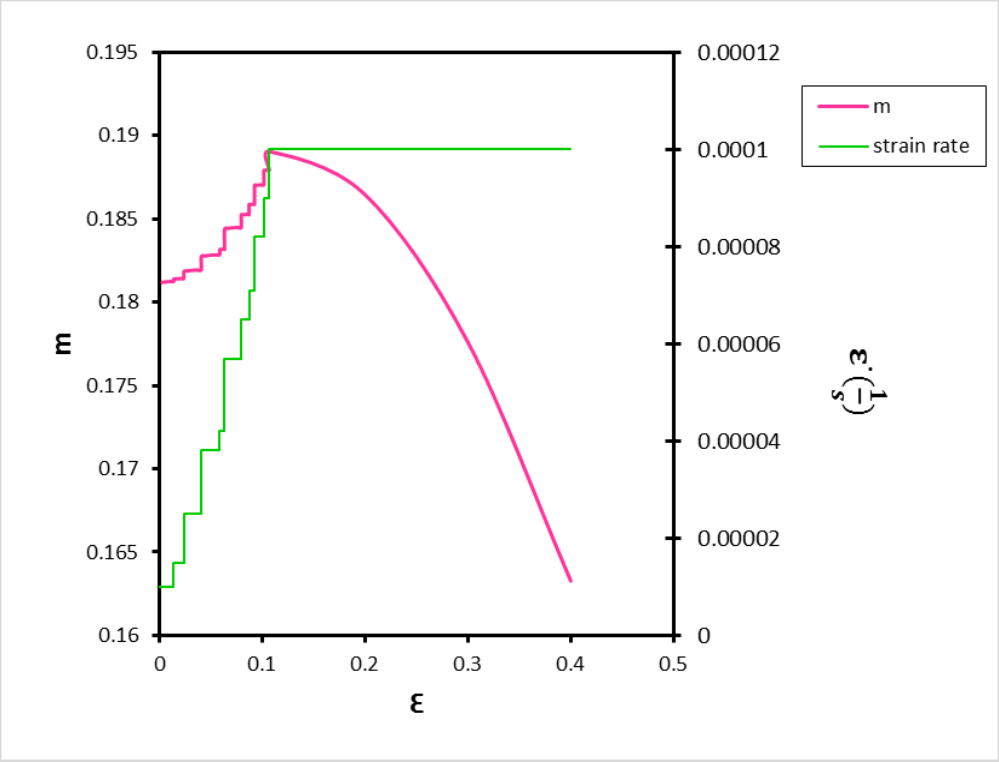
برای محاسبه مقدار m حداکثر از معادله (۷) در کرنش ثابت مشتق گرفته شد و عبارت حاصل مساوی صفر قرار داده شد.

$$\left(\frac{\partial ln\sigma}{\partial ln\dot{\varepsilon}}\right)_{\varepsilon} = 0 \qquad (۸)$$

$$\left(g_0 + g_1\dot{\varepsilon} + g_2\varepsilon + g_3\dot{\varepsilon}\varepsilon + g_4\dot{\varepsilon}^2 + g_5\varepsilon^2 + g_6\dot{\varepsilon}^3\right) + \qquad (۹)$$

$$ln\dot{\varepsilon} \times \left(g_1\dot{\varepsilon} + g_3\dot{\varepsilon}\varepsilon + 2g_4\dot{\varepsilon}^2 + 3g_6\dot{\varepsilon}^3\right) + ln\varepsilon \times \left(h_1\dot{\varepsilon} + h_3\dot{\varepsilon}\varepsilon + 2h_4\dot{\varepsilon}^2\right) = 0$$

با توجه به اینکه ثوابت رابطه (۷) در محدوده سرعت‌های کرنش $۱\times۱۰^{-۳}s^{-1}$ و $۴\times۱۰^{-۴}\ s^{-1}$ به دست آمده است؛ برای انجام آزمایش کشش چند مرحله ای، سرعت کرنش هر مرحله مقداری در محدوده بالا در نظر گرفته شد و با استفاده از تابع solver در اکسل و مقادیر ثوابت به دست آمده(جدول(۲))، کرنشی که منجر به m حداکثرمی‌شد؛ محاسبه گردید. آزمایش کشش با سرعت کرنش ثابت در نظر گرفته شده تا کرنشی که به طریق بالا محاسبه شده بود انجام شد و در این کرنش سرعت کرنش به مقدار بعدی در محدوده ذکر شده ($۱\times۱۰^{-۳}s^{-1}$ و $۴\times۱۰^{-۴}\ s^{-1}$) تغییر کرد. آزمایش کشش چند مرحله‌ای به ترتیب بیان شده تا شکست نمونه انجام شد. با پیروی از روش آزمایش پیشنهادی می‌توان انتظار داشت که مقدار m در طول آزمایش در حال افزایش باشد و درنتیجه ازدیاد طول بیشتری در کشش تك محوری حاصل گردد. تغییرات سرعت کرنش همراه با مقدار پارامتر m بر حسب کرنش در شکل (۸) نشان داده شد.



شکل۸.منحنی ضریب حساسیت به نرخ کرنش و سرعت کرنش بر حسب کرنش.

با مقایسه شکل(۷) و شکل(۸) می‌توان دریافت که میزان ازدیاد طول در روش m حداکثری بیشتر از حالت کرنش ثابت است به عبارتی درصد ازدیاد طول در روش m حداکثری ۹٤,۷۰% و در روش کرنش ثابت ٦۲,۲۸% است در نتیجه به اندازه ۳۲,٤۲% میزان ازدیاد طول نسبت به حالت کرنش ثابت افزایش یافت. که در شکل(۹) به طور واضحی قابل مشاهده است.

شکل ۹.مقایسه روش m حداکثر با روش سرعت کرنش ثابت سوپرپلاستیک.

۴- نتیجه‌گیری

به منظور بررسی تغییر شکل سوپرپلاستیک آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۶ با ضریب حساسیت به نرخ کرنش mآزمایش کشش در دمای ثابت و نرخ کرنش‌های مختلف انجام گرفت. نرخ کرنش بهینه برای این تحقیق $۱\times۱۰^{-۳}\ s^{-1}$است. مشاهده شد که m علاوه بر نرخ کرنش به کرنش تغییر شکل هم وابسته است. مقدار m رابطه مستقیمی با درصد ازدیاد طول نهایی دارد به این صورت که اگر m افزایش درصد ازدیادطول نهایی نیز زیاد می‌شود. از دو روش نرخ کرنش ثابت و روش m حداکثری برای مقایسه درصد ازدیاد طول استفاده شد. میزان ازدیاد طول در روش m حداکثری بیشتر از حالت کرنش ثابت است به عبارتی درصد ازدیاد طول در روش m حداکثری ۹۴٫۷۰% و در روش کرنش ثابت ۶۲٫۲۸% است درنتیجه‌به اندازه ۳۲٫۴۲% میزان ازدیاد طول نسبت به حالت کرنش ثابت افزایش یافت. بدون نیاز به اصلاح ریزساختار به این میزان از ازدیادطول می‌توان دست یافت، بنابراین یافته‌ها، توسعه فرآیند m حداکثری نه‌تنها نیاز به اصلاح دانه را در فرآیند تغییر شکل سوپرپلاستیک کم می‌کند، بلکه سبب کاهش هزینه‌های مصرفی و صرفه‌جویی در زمان تولید می‌شود.

مراجع

[1] K. A. Padmanabhan, R. A. Vasin, and F. U. Enrikeev, Superplastic Flow. Phenomenology and Mechanics. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.

[2] T. G. Langdon, “The mechanical properties of superplastic materials,” Metall. Trans. A, vol. 13, pp. 689–701, 1982.

[3] H. V. Divya, L. Laxmana Naik, H. M. Niranjan, M. G. Vasundhara, and Y. B., “Superplasticity and Superplastic Tensile Behaviour of AA5083,” Int. J. Adv. Eng. Technol., vol. 902, pp. 24–28, Feb. 2014.

[4] Z. Guan, M. Ren, P. Zhao, P. Ma, and Q. Wang, “Constitutive equations with varying parameters for superplastic flow behavior of Al–Zn–Mg–Zr alloy,” Mater. Des., vol. 54, pp. 906–913, Feb. 2014.

[5] G. Wang, M. Fu, J. Li, Q. Sun, H. Dong, and X. Xu, “Study of the High-Efficiency Superplastic Deformation of Ti-6Al-2.5Mo-1.5Cr-0.5Fe-0.3Si Alloy Based on the Strain Rate Sensitivity Index m,” Adv. Eng. Mater., vol. 16, no. 1, pp. 21–25, Jan. 2014.

[6] M. E. Kassner, Fundamentals of Creep in Metals and Alloys. Elsevier, 2004.

[7] D. A. Pereira1, M. H. F. Batalha1, A. F. Carunchio1, and H. B. Resende, “Analysis of Superplastic Forming Process Appled to Aerospace Industry: Case Study of Al 5083 Alloy,” Aerosp. Technol. Congr. New Mater. Process., 2016.

[8] T. G. Langdon, “The Relationship Between Strain Rate Sensitivity and Ductility in Superplastic Materials,” Scr. Metall., pp. 56–75, 1977.

[9] Y. Song, Z. Guan, Z. Li, and M. Wang, “Theoretical and metrical standardization of strain rate sensitivity index,” Sci. China Ser. E Technol. Sci., vol. 50, pp. 714–735, 2007.

[10] G. C. Wang, M. W. Fu, C. X. Cao, and H. B. Dong, “Study on the maximum m superplasticity deformation of Ti–6.5Al–3.5Mo–1.5Zr–0.3Si alloy,” Mater. Sci. Eng. A, vol. 513–514, pp. 32–41, Jul. 2009.

[11] H. P. Yang, M. W. Fu, S. To, and G. C. Wang, “Investigation on the maximum strain rate sensitivity (m) superplastic deformation of Mg-Li based alloy,” Mater. Des., vol. 112, pp. 151–159, Dec. 2016.

[12] G. C. Wang, M. W. Fu, H. B. Dong, J. Lu, Q. J. Sun, and C. X. Cao, “Superplasticity deformation of Ti–6Al–2Zr–1Mo–1V induced by the cyclic change of strain-rate and MaxmSPD,” J. Alloys Compd., vol. 491, no. 1–2, pp. 213–217, Feb. 2010.

[13] X. F. Xu, J. G. Zhang, C. F. Liu, G. C. Wang, and Z. H. Yun, “Superplastic Behaviour and Microstructural Evolution in Stepped Tensile Deformation of Titanium Alloy,” J. Mater. Eng. Perform., vol. 23, no. 1, pp. 187–192, Jan. 2014.

[14] Q. J. Sun, G. C. Wang, and M. Q. Li, “The superplasticity and microstructure evolution of TC11 titanium alloy,” Mater. Des., vol. 32, pp. 3893–3899, Aug. 2011.

[15] G. F. Vander Voort, Ed., Metallography and Microstructures. ASM International, 2018.