



## بررسی نقشه تغییر شکل گرم نانوکامپوزیت مس-آلومینا با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

علیرضا پوست فروشان<sup>۱</sup>، پدram زمانی<sup>۲\*</sup>، رضا مسعودی نژاد<sup>۲</sup> و مهران کدخدایان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده‌ی مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده‌ی مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

<sup>۳</sup> استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده‌ی مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۱/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۱۸

### چکیده

در این تحقیق، تولید نانوکامپوزیت‌های مس-آلومینا به روش متالورژی پودر و تغییر شکل گرم آن، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای این منظور، نانوکامپوزیت‌های Cu-XAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با سه ترکیب مختلف پس از فرایندهای آسیاکاری مکانیکی و تف جوشی در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد تولید شده‌اند. متعاقباً نمونه‌های استوانه‌ای شکل از هر نانوکامپوزیت، تحت آزمایش فشار گرم قرار گرفته‌اند. جهت بررسی پارامترهای موثر بر تغییر شکل گرم این نانوکامپوزیت‌ها، دماهای تغییر شکل گرم ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش‌های ۰/۰۳، ۰/۰۳ و ۰/۳ بر ثانیه انتخاب شده است. بررسی تغییر شکل گرم این نانوکامپوزیت‌ها نشان می‌دهد که شرایط مناسب برای انجام تغییر شکل در دماهای پایین و در نرخ کرنش‌های پایین و نیز در دماهای بالا در نرخ کرنش‌های متوسط است. انجام تغییر شکل این نانوکامپوزیت در دماهای بالا و نرخ کرنش‌های بالا، باعث تشکیل ترک‌های ریز در مرز دانه‌های نمونه می‌شود؛ همچنین، در نمونه‌های تغییر فرم یافته در دماهای پایین، باند برشی آدیاباتیک مشاهده می‌شود.

**کلمات کلیدی:** نانوکامپوزیت؛ آلومینا؛ تغییر شکل گرم؛ نقشه فرایند؛ شبکه عصبی مصنوعی.

## A Survey on Processing Map for the Hot Deformation of Copper - Alumina Nanocomposites Using Artificial Neural Network

A.R. Pustforushan<sup>1</sup>, P. Zamani<sup>2,\*</sup>, R. Masoudi Nejad<sup>2</sup>, M. Kadkhodayan<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Mech. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>2</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>3</sup> Prof., Mech. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

### Abstract

In the present research, an investigation is carried out on hot process deformation of Cu-Alumina nanocomposites. Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites are manufactured at 750 centigrade degrees using powder metallurgy technique and consequently hot compression test performed on cylindrical alumina nano particle samples. Three weight fractions for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1%, 2% and 3%), four different temperatures (350, 400, 450 and 500), three strain rates (0.003, 0.03 and 0.3 s<sup>-1</sup>) and three strains (0.4, 0.5 and 0.6) were chosen to perform the experiments. Stress-strain curves are determined for 48 experiments and to optimize the process parameters in hot deformation, processing map is obtained for different strains. The results of modeling the hot deformation behavior of Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites using artificial neural network (ANN) and the experimental results revealed the most optimal conditions for hot deformation of nanocomposite materials.

**Keywords:** Nanocomposite; Alumina; Hot Deformation Process; Process Map; Artificial Neural Network.

## ۱- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه مس تقویت شده با نانوذرات  $Al_2O_3$  دارای خواص مکانیکی قابل توجهی همچون، نسبت استحکام به وزن بالا، شکل‌پذیری خوب، استحکام و ضریب ارتجاعی بالا، ضریب انبساط حرارتی پایین، مقاومت سایشی عالی، مقاومت خزشی مناسب در دمای بالا و استحکام خستگی مناسب می‌باشند [۱، ۲].

با وجود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های مس-آلومینا، بررسی رفتار تغییر شکل گرم این مواد برای شکل‌دهی ثانویه، از اهمیت زیادی برخوردار است [۳]. تغییر شکل گرم در دماها و نرخ کرنش‌های نامناسب، باعث شکست ماده می‌شود که این خود لزوم تحقیق برای بدست آوردن شرایط بهینه (دما و درصد وزنی ذرات تقویت کننده و نرخ کرنش) برای بررسی رفتار تغییر شکل گرم این مواد را نشان می‌دهد [۴].

به منظور بهینه‌سازی پارامترهای تغییر شکل و کنترل ریز ساختار در فرایندهای شکل‌دهی گرم از نقشه فرآیندی استفاده می‌شود. این نقشه بر اساس مدل دینامیک ماده<sup>۱</sup> رسم می‌شود. به عبارت دیگر، یک نقشه فرآیندی ارائه کننده پاسخ مواد در برابر تغییر شکل مکانیکی با توجه به تحولات ریزساختاری است که از قرارگیری دو نقشه اتلاف توان و ناپایداری روی یکدیگر بدست می‌آید [۵]. چاندراکهار و همکارانش [۶]، نانو کامپوزیت‌های مس-نانوآلومینا را با روش‌های مختلف باهم ساختند و اثر روش ساخت را بر ریزساختار این نانوکامپوزیت‌ها بررسی کردند. یکی از کاربردهای مطالعه روی تغییر شکل گرم در رفتار و عملکرد لوله‌های انتقال گاز پرفشار تحت درجه حرارت‌های بالا و در شرایطی است که ایمنی آن‌ها مطابق نمودارهای ارزیابی ایمنی باید تامین شود [۷]. در این پژوهش، نانوکامپوزیت‌های مس-آلومینا ( $Cu-Al_2O_3$ ) به وسیله روش متالورژی پودر ساخته می‌شوند. پارامترهای درصد وزنی نانوآلومینا، نرخ کرنش و دما، به صورت متغیر تعریف گردیده‌اند و تاثیر این پارامترها بر استحکام، تنش، کرنش و تغییر شکل ماده، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با اطلاعات به دست آمده از نقشه‌های فرآیندی تهیه شده در این

پژوهش، شرایط کاری مطلوب (دما، نرخ کرنش و درصد آلومینا) جهت تغییر شکل مطلوب این نانوکامپوزیت بررسی می‌شود.

## ۲- روش انجام آزمایشات

مواد مورد استفاده در این تحقیق، پودرهای نانو آلومینا (nm ۵۰) و مس (۵  $\mu m$ ) می‌باشند. جهت انجام آزمایش‌های فشار گرم، سه نوع نمونه با درصدهای وزنی ۱ و ۲ و ۳ درصد آلومینا در نظر گرفته شده‌اند. در ابتدا باید با توجه به درصد وزنی آلومینای مورد نظر، اقدام به محاسبه وزن مورد نیاز از پودر کرده که بر اساس محاسبه حجم قطعات مورد نیاز (استوانه به قطر ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵ میلی‌متر) و چگالی پودرها و بر اساس روابط محاسبه می‌شود که در ادامه ذکر شده‌اند. این روابط برای نمونه با ۱ درصد وزنی پودر آلومینا عبارتند از:

$$V = \pi r^2 h \quad (۱)$$

$$\rho = \rho_{Cu} x_{Cu} + \rho_{Al_2O_3} x_{Al_2O_3} \quad (۲)$$

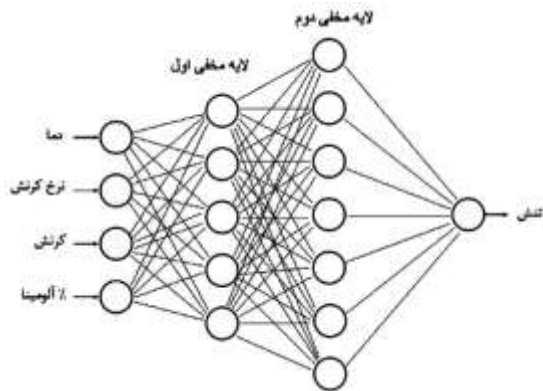
$$M = \rho V \quad (۳)$$

پودرها بعد از ترکیب شدن در ظرف بالمیل (آسیاب گلوله‌ای) قرار داده می‌شوند. نسبت وزنی گلوله به پودر به اندازه ۱۰ به ۱ در نظر گرفته شده است. سپس برای جلوگیری از چسبیدن پودرها به ظرف مقدار ۰/۵ ml اتانول را به محفظه اضافه شده، سپس محفظه را در دستگاه بالمیل قرار داده می‌شود. سرعت چرخش در هم‌زدن دستگاه rpm ۲۵۰ به مدت زمان یک ساعت صورت می‌پذیرد. پودر آماده شده در مرحله قبل توسط قالب استوانه‌ای شکل با قطر ۱۰ میلی‌متر و تحت فشار ۱۵ bar توسط دستگاه پرس تبدیل به قرص خام<sup>۲</sup> می‌شود. نمونه مورد نظر پس از پرس در کوره با دمای  $750^\circ C$  و به مدت یک ساعت تحت اتمسفر محافظ پخت می‌شود.

به منظور انجام آزمون فشار گرم، ۳۶ قطعه نانوکامپوزیت مس-آلومینا با درصدهای مختلف تهیه شده است. تعداد ۳۶ آزمایش شامل، حاصل ضرب ۳ سطح درصد وزنی آلومینا (۱، ۲، ۳)، ۴ سطح دمای مختلف شرایط آزمایش

<sup>2</sup> Green Bulk

<sup>1</sup> Dynamic Material Model (DMM)



شکل ۱- پارامترهای ورودی و خروجی در مدل سازی شبکه‌ی عصبی

در این مقاله، از شبکه چند لایه پرسپترون<sup>۱</sup> استفاده شده است. در شبکه‌های چند لایه پرسپترون، هر نرون دارای یک تابع تحریک غیر خطی است که از ویژگی مشتق‌پذیری برخوردار است. در این حالت، ارتباط بین پارامترهای شبکه و سیگنال خطا، کاملاً پیچیده و غیرخطی است، بنابراین مشتقات جزئی نسبت به پارامترهای شبکه به راحتی قابل محاسبه نیستند [۹]. تعداد آزمایشات همان طور که ذکر شد، ۳۶ آزمایش بوده و خروجی مدل نیز تنش معادل با هر آزمون است. مدل اولیه این طرح، در شکل ۱ نشان داده شده است. در واقع هدف از این مدل‌سازی عددی، بدست آوردن یک مدل صحیح و با دقت بالا برای ارزیابی خواص مکانیکی نانو- کامپوزیت‌های مس - آلومینا و در نهایت مقایسه نمودن و صحت سنجی آزمایش‌های انجام شده است.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- نقشه‌های تغییر شکل گرم نانو کامپوزیت مس-

##### آلومینا

پس از انجام آزمون فشار گرم روی ۳۶ نمونه آماده شده، نتایج حاصل شد که نمودارهای تنش-کرنش بر اساس آن‌ها در شکل ۴ ترسیم شده‌اند. برای ترسیم نقشه‌های فرآیندی، ابتدا تنش‌های معادل کرنش ۰/۶ از اطلاعات کرنش بدست آمده توسط منحنی‌های تنش-کرنش بدست می‌آیند (جدول ۱).

(۰/۰۳، ۰/۳) و سه نرخ کرنش متفاوت (۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰) و ۳/۰۰۳ طراحی شده است:

(تعداد نمونه‌ها) = ۳۶ = (نرخ کرنش) × ۳ × (دما) × ۴ × (درصد وزنی) ۳

هر یک از این قطعه‌ها با طول ۱۵ mm و قطر ۱۰ mm بر اساس استاندارد ASTM E9 [۸] ماشین‌کاری و آماده‌سازی شده است. این آزمایش توسط دستگاه Santam STM150 مجهز به کوره الکتریکی با دقت  $\pm 5$  درجه سانتی‌گراد و در محدوده دمایی ۳۵۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، با نرخ کرنش-های ۰/۰۳، ۰/۳ و ۰/۰۳ بر ثانیه انجام شده است. زمان لازم برای آماده‌سازی دستگاه و رسیدن به دماهای مورد نظر ۹۰ تا ۱۲۰ دقیقه در نظر گرفته شده و به منظور هم‌دما شدن، نمونه‌ها به مدت ۳ دقیقه در دمای آزمایش نگهداری و سپس تا محدوده کرنش ۰/۶ تحت آزمون فشار گرم قرار گرفته‌اند.

#### ۳- مفهوم شبکه‌ی عصبی

سیستم‌های یادگیری، سیستم‌هایی هستند که رفتار خود را جهت دستیابی به هدف و مقصودی خاص صرفاً برای مشاهده عملکردشان می‌توانند بهبود بخشند. اگر مقاصد و اهداف به‌طور کامل تعریف شده باشند، آن‌ها دیگر نیازی به فرآیند یادگیری نخواهند داشت. در مرحله پردازش که مرحله اصلی کار شبکه‌های عصبی است، با استفاده از داده‌های واقعی، خروجی شبکه عصبی مصنوعی به خروجی هدف تعیین شده نزدیک می‌شود و اصطلاحاً شبکه عصبی مصنوعی آموزش می‌بیند. خطای شبکه‌ها، بر اساس مقایسه بین خروجی شبکه و خروجی اصلی تعدیل می‌شود، تا هنگامی که خروجی با هدف مطابقت قابل قبولی پیدا کند. در فرآیند آموزش شبکه، پارامترهای شبکه طوری تنظیم می‌شوند که پاسخ محاسبه شده توسط شبکه هر چه بیشتر به سمت پاسخ مطلوب نزدیکتر شود. یکی از روش‌های پرکاربرد و موثر در مدل سازی‌های چند متغیره و پیچیده، روش پس انتشار است. در این روش، حداقل سازی خطای یک روش سیستماتیک برای آموزش شبکه‌های چند لایه است.

<sup>1</sup> Multi Layer Perceptron

جدول ۱- نتایج اندازه‌گیری تنش (مگا پاسکال) در دماها و

نانونکامپوزیت	نرخ کرنش (1/s)	دما (°C)			
		۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	۵۰۰
Cu-1wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۰۰۳	۳۴۲/۶۶	۲۲۵/۱۵	۲۱۰/۸۷	۱۷۵/۶۷
	۰/۰۳	۴۴۱/۰۹	۳۵۲/۸۷	۲۷۷/۱۷	۲۲۱/۱۸
	۰/۳	۴۷۷/۳۹	۳۵۴/۲۵	۲۶۵/۴۶	۲۲۸/۳۳
Cu-2wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۰۰۳	۳۹۳/۴۴	۲۶۶/۶۲	۲۳۹/۱۲	۱۸۷/۴۳
	۰/۰۳	۴۸۴/۶۴	۳۶۱/۵۹	۲۹۵/۲۶	۲۳۳/۵۹
	۰/۳	۵۱۷/۳۰	۳۸۵/۰۵	۳۰۹/۷۹	۳۰۱/۹۱
Cu-3wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۰۰۳	۴۲۴/۸۶	۲۸۲/۸۱	۲۹۰/۰۶	۲۰۳/۳۱
	۰/۰۳	۵۱۸/۳۹	۳۷۵/۸۲	۳۰۹/۸۵	۲۵۶/۳۹
	۰/۳	۵۶۳/۱۸	۴۲۲/۲۷	۳۷۵/۶۶	۳۱۸/۵۳

T در این رابطه بیانگر دما، ds/dt نرخ تولید آنتروپی و علامت نابرابری برگشت ناپذیری تغییر شکل را بیان می‌کند. مالورن نشان داد که کل آنتروپی تولیدی شامل، دو قسمت مجزا است، بخش اول آنتروپی داخلی و قسمت دوم مربوط به آنتروپی حرارتی است و باعث تغییرات متالورژیکی و هدایت حرارتی می‌شوند. واضح است که اتلاف انرژی در سیستم باعث افزایش دما شده، تنها مقدار اندکی از انرژی توسط تغییرات متالورژیکی مصرف می‌شود [۱۲]. تقسیم انرژی میان J و G توسط رفتار جریان مواد کنترل شده، توسط حساسیت نرخ کرنش (m) به صورت رابطه (۷) قابل ذکر است [۱۰]:

$$\frac{dJ}{dG} = \frac{\dot{\bar{\epsilon}} d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma} d\dot{\bar{\epsilon}}} = \frac{\dot{\bar{\sigma}} d\ln\bar{\sigma}}{\bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} d\ln\dot{\bar{\epsilon}}} \approx \frac{\Delta \log \bar{\sigma}}{\Delta \log \dot{\bar{\epsilon}}} = m \quad (7)$$

برای ترسیم نقشه اتلاف توان، نرخ حساسیت به کرنش (m) با توجه به معادله ۹ از نتایج فوق در دما و نرخ کرنش-های مختلف محاسبه می‌شود. هرچه تعداد نقاط بدست آمده بیشتر باشد، منحنی‌ها نیز با دقت بیشتری ترسیم می‌گردند؛ بنابراین جهت افزایش دقت محاسبات، از اسپلاین مکعبی<sup>۱</sup> استفاده شده است. در مرحله اول برای بدست آوردن مقادیر قابل اطمینان، ارتباط لگاریتم تنش با مقدار ۱/T توسط توابع اسپلاین مکعبی، میان‌یابی شده، در ادامه مقادیر تنش در دماهای دیگر مشخص می‌شوند.

پس از محاسبات ذکر شده توسط اسپلاین مکعبی، تنش در نرخ کرنش‌های مورد آزمون و کرنش‌های انتخاب شده برای تمامی دماهایی بدست می‌آید که مورد آزمون قرار نگرفته است. حال برای ترسیم دقیق نقشه‌های فرایندی مانند محاسبه تمامی دماها، لازم است که تنش در تمامی نرخ کرنش‌ها محاسبه شود. در شکل‌های ۱ الی ۳، منحنی‌های مربوط به تنش و نرخ کرنش برای دماهای مختلف در کرنش-های انتخاب شده نشان داده شده است.

مقادیر نرخ کرنش برای تنش‌های موجود در دماهای بدست آمده از مرحله قبل، همانند محاسبه دما، با استفاده از اسپلاین بدست می‌آیند. برای بررسی تغییرات لحظه‌ای J در هر نرخ کرنش و دما رابطه انتگرالی (۸) بیان می‌شود:

$$J = \int_0^{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} d\bar{\sigma} = \int_0^{\sigma} K' \bar{\sigma}^{(1/m)} d\bar{\sigma} \quad (8)$$

نقشه اتلاف توان، یکی از قسمت‌های اصلی در سیستم فرایند قطعه کار است. پاسخ ناگهانی مواد ( $\bar{\sigma}$ ) در نرخ کرنش مواد به کاربرده شده ( $\dot{\bar{\epsilon}}$ ) و در دمای ثابت (T) و بیشینه (M) به صورت رابطه دینامیکی (۴) داده شده است [۱۰]:

$$\bar{\sigma} = K \dot{\bar{\epsilon}}^m |_{T,M} \quad (4)$$

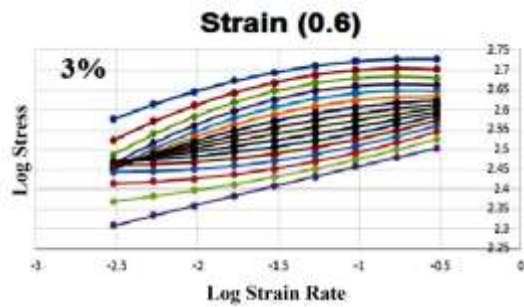
K و m در رابطه‌ی فوق به ترتیب بیانگر، ثابت ماده و حساسیت به نرخ کرنش هستند. توان کل سیستم (P)، از دو تابع J و G تشکیل شده است که در رابطه (۵) بیان شده است [۱۱]:

$$P \cong G + J = \bar{\sigma} \cdot \dot{\bar{\epsilon}} \quad (5)$$

P در رابطه‌ی (۵) بیانگر؛ اتلاف توانی است که در ماده رخ می‌دهد. این اتلاف توان از دو قسمت اتلاف توان مربوط به افزایش دما (G) و اتلاف مربوط به ریزساختار ماده (J) تشکیل شده است. برای پیدا کردن مقدار لحظه‌ای (دینامیک) J و G تغییر شکل در دما و نرخ کرنش مشخص، m ثابتی است که برای نرخ کرنش‌های مختلف توسط سیستم انتخاب می‌شود و می‌تواند به نرخ کرنش وابسته باشد. تفسیر فیزیکی J و G، توسط قوانین ترمودینامیک و توسط مالورن بیان شده است. توان کل تلف شده مرتبط با نرخ آنتروپی تولیدی در سیستم است [۱۰]:

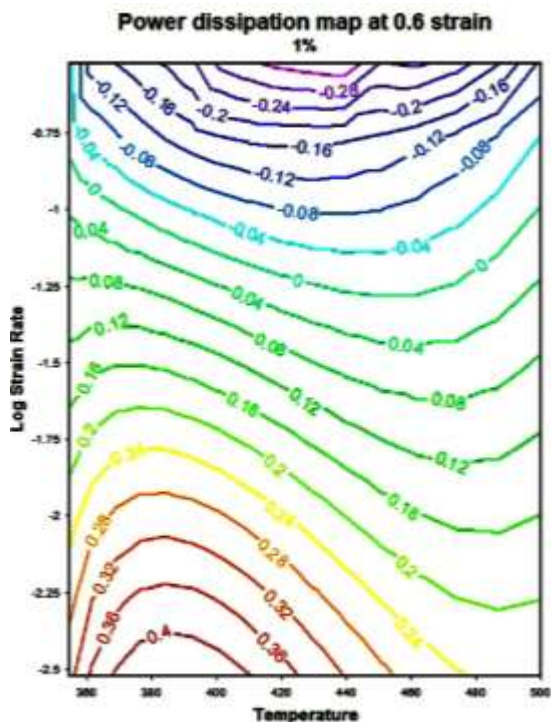
$$P = \bar{\sigma} \cdot \dot{\bar{\epsilon}} = \frac{d^i s}{dt} T \geq 0 \quad (6)$$

<sup>1</sup> Cubic Spline



شکل ۴- منحنی‌های اسپیلاین مکعبی لگاریتم تنش و لگاریتم نرخ کرنش برای نانوکامپوزیت با ۳٪ وزنی آلومینا

در نتیجه نقشه اتلاف توان بر حسب دما، لگاریتم نرخ کرنش و بازده تلفات توان با استفاده از نرم‌افزار متلب رسم شده، نتایج آن در شکل‌های ۵ الی ۷ نشان داده شده‌اند. در نقشه‌های ترسیم شده، نقاطی که عدد بالاتری دارند، نشان دهنده قله و اعداد خیلی کوچک، نشان دهنده دره می‌باشند. دره‌ها مانند شکافی، قله‌ها را از یکدیگر جدا می‌کنند.



شکل ۵- نقشه‌ی اتلاف توان نانوکامپوزیت با ۱٪ وزنی آلومینا

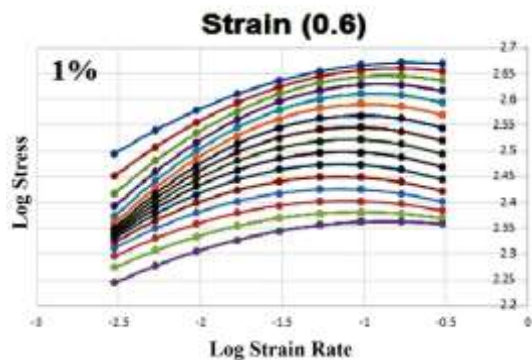
در رابطه (۸)، مقدار  $m$  ثابت و برابر  $(1/K)$  است؛ بنابراین رابطه (۹) برای  $J$  قابل ارائه است:

$$J = \frac{m \bar{\sigma} \dot{\epsilon}}{m + 1} \quad (9)$$

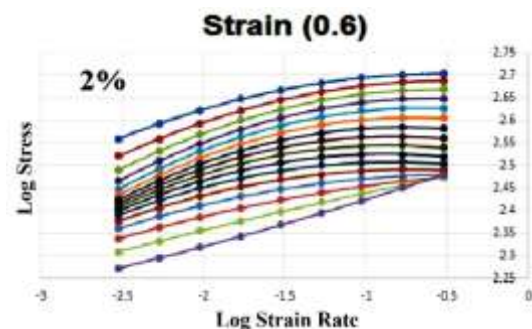
همچنین زمانی که اتلاف‌کننده رابطه خطی دارد ( $m=1$ )، در این حالت حداکثر اتلاف ممکن رخ خواهد داد و نهایتاً پارامتر بدون بعد به نام بازده اتلاف توان بیان می‌شود [۱۰]:

$$J = \frac{J}{J_{max}} = \frac{2m}{m + 1} \quad (10)$$

این پارامتر می‌تواند به عنوان تابعی از دما و نرخ کرنش رسم شده، بدین ترتیب نقشه اتلاف توان حاصل شود. بازده اتلاف توان متناسب با نرخ آنتروپی تولیدی در طول فرایند کارگرم است و متناسب با تغییرات ریزساختاری ناشی از اتلاف انرژی در دما و نرخ کرنش تغییر می‌کند. با جایگذاری مقادیر حساسیت به نرخ کرنش در رابطه ۱۲، بازده تلفات توان ( $\eta$ ) ناشی از تغییر میکروساختار محاسبه می‌شود.



شکل ۲- منحنی‌های اسپیلاین مکعبی لگاریتم تنش و لگاریتم نرخ کرنش برای نانوکامپوزیت با ۱٪ وزنی آلومینا



شکل ۳- منحنی‌های اسپیلاین مکعبی لگاریتم تنش و لگاریتم نرخ کرنش برای نانوکامپوزیت با ۲٪ وزنی آلومینا

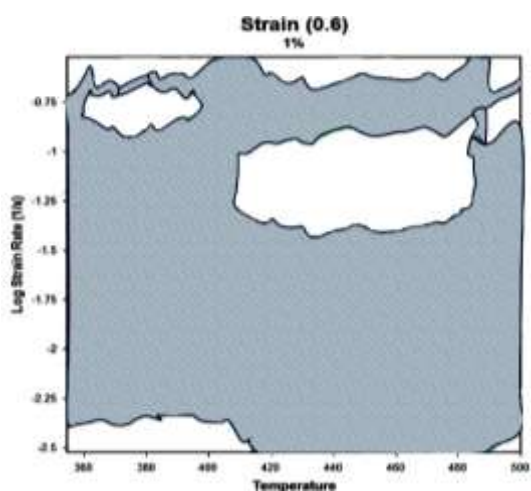
شرایط پایداری در مدل دینامیکی مواد توسط زیگلر<sup>۱</sup> شرح داده شده است. زیگلر بیان کرد که جریان پایدار زمانی اتفاق می‌افتد که رابطه (۱۱) برقرار باشد:

$$\frac{dD}{d\dot{R}} > \frac{D}{\dot{R}} \quad (11)$$

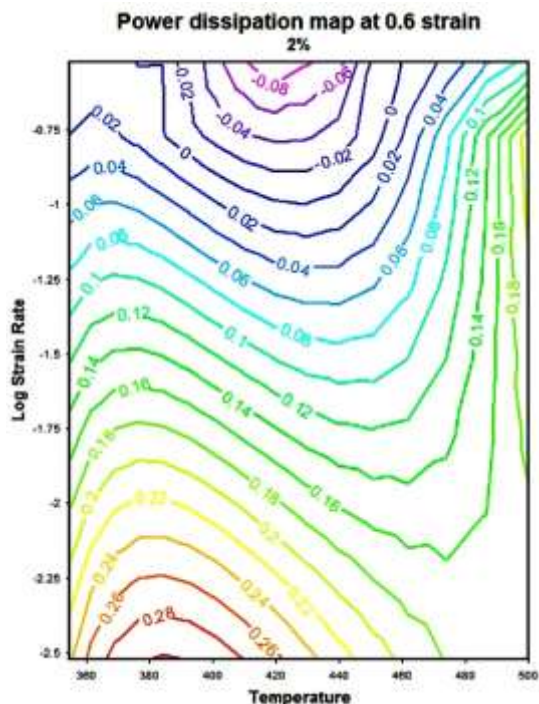
در رابطه بالا  $\dot{R} = \sqrt{\dot{\epsilon} \cdot \ddot{\epsilon}}$  و  $D$  تابع اتلاف است که معرف یک رفتار ترکیبی از مواد هستند. زمانی که  $J$  به عنوان پارامتر اصلی اتلاف و مرتبط با تغییرات متالورژیکی در طول فرایند باشد، با قرار دادن  $J$  به جای  $D$  در رابطه ۱۱ پارامتر بدون بعد (۱۲) تعریف خواهد شد:

$$\xi\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\ddot{\epsilon}}\right) = \frac{\partial \ln\left(\frac{m}{m+1}\right)}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m \quad (12)$$

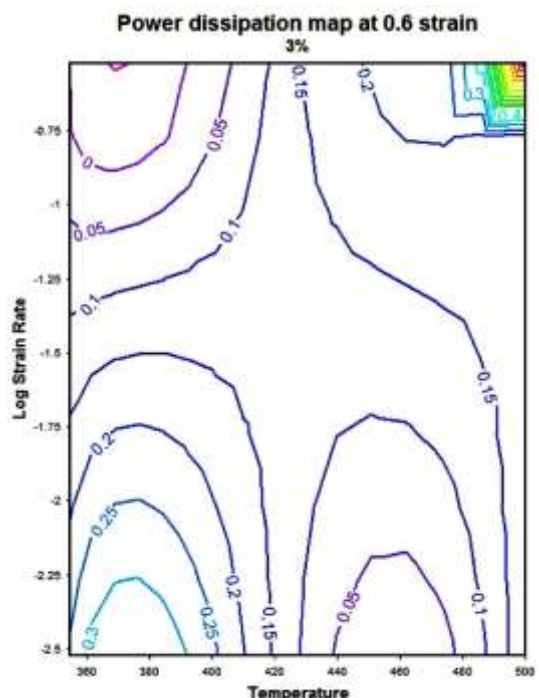
این پارامتر تابعی از دما و نرخ کرنش است و نقشه‌های ناپایداری را تشکیل می‌دهد؛ بنابراین ناپایداری زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار این پارامتر منفی باشد. نقشه ناپایداری فرایند گرم برای تعیین منطقه مطلوب فرآیند و منطقه ناپایداری فلز، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابتدا مقدار کرنش‌ها و دماهای مورد آزمایش محاسبه می‌شود. سپس منحنی  $\log[m/m+1]$  با  $\log \dot{\epsilon}$  توسط روابط اسپیلاین مکعبی رسم می‌شوند. مقادیر پارامتر ناپایداری توسط رابطه ۱۲ محاسبه شده است. نقشه ناپایداری نانوکامپوزیت‌های مختلف، در شکل‌های ۸ الی ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۸- نقشه ناپایداری نانوکامپوزیت با ۱٪ وزنی آلومینا



شکل ۶- نقشه‌ی اتلاف توان نانوکامپوزیت با ۲٪ وزنی آلومینا

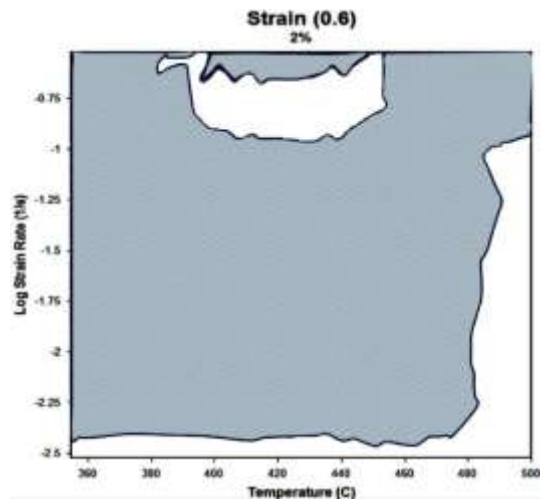


شکل ۷- نقشه‌ی اتلاف توان نانوکامپوزیت با ۳٪ وزنی آلومینا

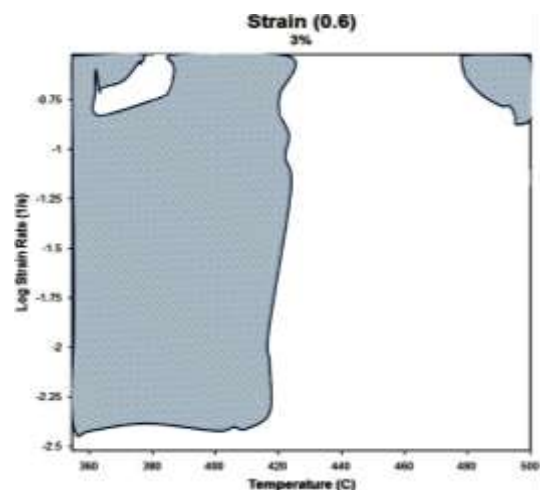
<sup>۱</sup> Ziegler

احتمالی است. دامنه مکانیزم‌هایی که از نقشه‌های اتلاف توان قابل تشخیص هستند شامل: تبلور مجدد دینامیکی<sup>۱</sup> بازبایی دینامیکی<sup>۲</sup> و تبلور مجدد همراه با رشد دانه آست؛ در صورتی که بازبایی دینامیکی برای کار گرم ترجیح داده شده است، مکانیزم‌های تبلور مجدد دینامیکی و تغییر شکل سوپر پلاستیک نشان دهنده، منطقه مطلوب برای کار گرم می باشند. مهم‌ترین برداشتی که از نقشه‌های ناپایداری می‌توان داشت، تشخیص باند برشی آدیاباتیک<sup>۴</sup> است که معمولا در نرخ کرنش‌های بالا اتفاق می‌افتد. این باند موجب رخدادهایی همچون، ترک، تبلور مجدد یا تغییر فاز در امتداد صفحات برشی شده، علائمی وابسته به تنش موضعی از خود نشان می‌دهد. ترک بین دانه‌ای<sup>۵</sup> که معمولا در دماهای بالا رخ می‌دهد نیز، از نقشه‌های ناپایداری قابل تشخیص است [۸-۱۰].

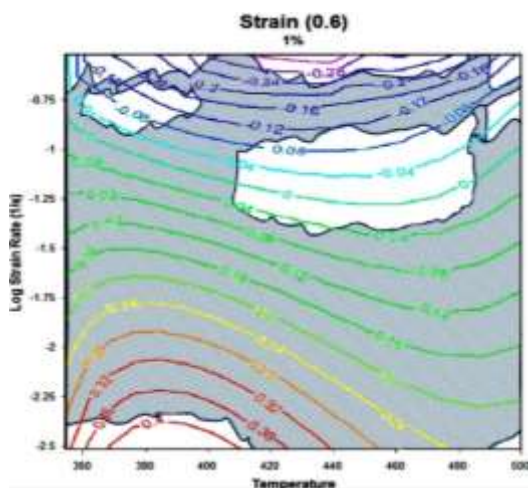
با توجه به نقشه‌های فرآیندی، مشاهده می‌شود افزایش میزان آلومینا، باعث بزرگ‌تر شدن ناحیه‌ی پایدار در نقشه‌ها شده است. منطقه پایدار در تمامی این نقشه‌ها در پایین‌ترین مقدار نرخ کرنش در بیشتر دماها قابل مشاهده است؛ همچنین در دماهای بالا و در نرخ کرنش‌های بالا نیز منطقه پایدار برای این کامپوزیت پدیدار می‌شود. بیشترین ناپایداری در دماهای پایین تا متوسط و در تمام نرخ کرنش‌ها رخ می‌دهد.



شکل ۹- نقشه ناپایداری نانوکامپوزیت با ۲٪ وزنی آلومینا



شکل ۱۰- نقشه ناپایداری نانوکامپوزیت با ۳٪ وزنی آلومینا



شکل ۱۱- نقشه تغییرشکل گرم نانوکامپوزیت با ۱٪ وزنی آلومینا

از تطبیق دو نقشه ناپایداری و اتلاف توان، نقشه فرآیندی حاصل می‌شود. این نقشه‌ها در شکل‌های ۸ الی ۱۰ نشان داده شده‌اند. قسمت هاشور خورده، نشانگر منطقه ناپایدار است. هر کدام از بازه‌های نقشه فرآیندی، نشان‌دهنده یک مکانیزم ریز ساختار که باعث اتلاف توان شده است. تحت شرایط فرآیندی، کنترل ریزساختار و تکرارپذیری آن در کل بازه تضمین شده است. به عبارت دیگر، فرآیند در همسایگی دره‌ها شامل ترکیبی از ریزساختارها است. در محل برخورد دره‌ها تابع پیشینه فلز و ترکیب‌های ریزساختار در آنجا

<sup>1</sup> Dynamic Recrystallization

<sup>2</sup> Dynamic Recovery

<sup>3</sup> Dynamic Recrystallization Accompanied with Grain Growth

<sup>4</sup> Adiabatic Shear Band (ASB)

<sup>5</sup> Intergranular Cracking

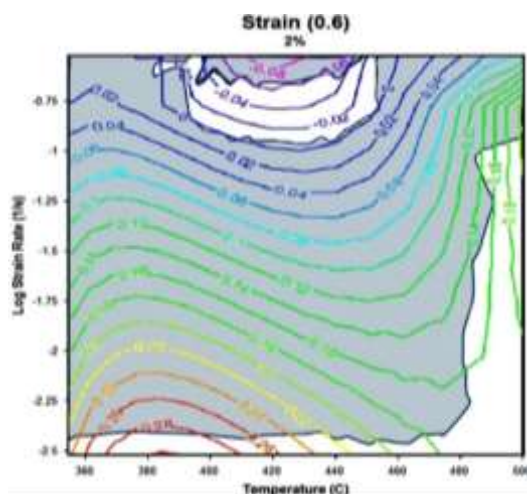
دماها مشاهده می‌شود؛ همچنین در دماهای بالا و در نرخ کرنش‌های بالا منطقه پایدار برای این کامپوزیت پدیدار می‌شود. بیشترین ناپایداری در دماهای پایین تا متوسط و در تمام نرخ کرنش‌ها رخ می‌دهد.

### ۶- مراجع

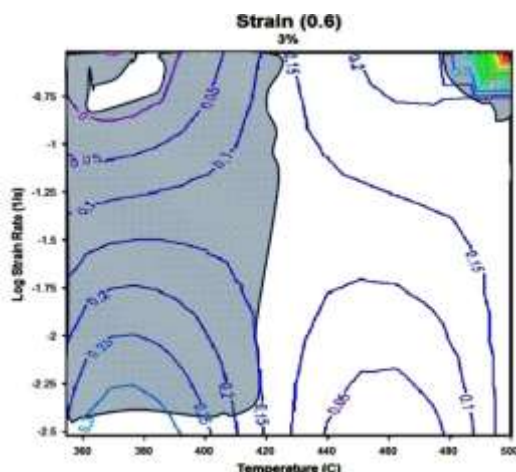
- [1] Kok M (2005) Production and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites. J Mater Process Technol 161: 381-387.
- [2] Mazahery A, Abdizadeh H, Baharvandi H (2009) Development of high-performance A356/nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites. Mater Sci Eng A 518: 61-64.
- [3] Nadkarni K (1976) Indian materia medica with Ayurvedic, unani products and home remedies. Popular Prakashan, Mumbai.
- [4] Prasad Y, Rao K, Gupta M (2009) Hot workability and deformation mechanisms in Mg/nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite. Compos Sci Technol 69: 1070-1076.
- [5] Ezatpour H, Torabi-Parizi M, Sajjadi SA (2013) Microstructure and mechanical properties of extruded Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites fabricated by stir-casting process. Trans Nonferrous Met Soc China 23: 1262-1268.
- [6] Chandrasekhar S, Sarma SS, Ramakrishna M, Babu PS, Rao TN, Kashyap B (2014) Microstructure and properties of hot extruded Cu-1wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-composites synthesized by various techniques. Mater Sci Eng A 591: 46-53.
- [7] Zamani P, Jaamialahmadi A, Shariati M (2016) Ductile Failure and safety optimization of gas pipeline. Journal of Solid Mechanics 8: 744-755.
- [8] Standard A (1990) Standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature. 1990 Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA, 98-105.

[۹] رستاقی م، نوری خاجوی م (۲۰۱۴) تشخیص سایز و موقعیت نسبی ترک در لوله های حاوی سیال با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. مهندسی مکانیک مدرس ۴۲-۳۵: ۱۴.

- [10] Lin Y, Li LT, Xia YC, Jiang YQ (2013) Hot deformation and processing map of a typical Al-Zn-Mg-Cu alloy. J Alloys Compd 550: 438-445.
- [11] Zhang X, Kang F, Li H, Wang Z, Zhao J, Guo E (2012) Study on hot processing maps and deformation mechanisms of TC11 titanium alloy. In: Strategic Technology (IFOST), 2012 7th International Forum on I-4.
- [12] Malvern LE (1969) Introduction to the mechanics of a continuous medium.



شکل ۱۲- نقشه تغییر شکل گرم نانوکامپوزیت با ۲٪ وزنی آلومینا



شکل ۱۳- نقشه تغییر شکل گرم نانوکامپوزیت با ۳٪ وزنی آلومینا

### ۵- نتیجه گیری

نانو کامپوزیت‌های Cu-XAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با ترکیب‌های مختلف پس از فرایندهای آسیاکاری مکانیکی و تف جوشی در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد تولید شده‌اند و تغییر شکل گرم آن‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است. دماهای تغییر شکل گرم ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش‌های ۰/۰۰۳، ۰/۰۰۳ و ۰/۳ بر ثانیه انتخاب شده‌اند. با توجه به نقشه‌های فرآیندی مشاهده می‌شود، افزایش میزان آلومینا باعث بزرگ‌تر شدن ناحیه پایدار در نقشه‌ها شده است. منطقه پایدار در تمامی این نقشه‌ها، در پایین‌ترین مقدار نرخ کرنش در اکثر