

مدل سازی و بررسی تاثیر متغیرهای تفجوشی فاز مایع سوپرسالیدوس بر خواص فیزیکی و

مکانیکی آلیاژ Cu28Zn

احمد محمدزاده^{۱*} و مازیار آزادبه^۲

چکیده

در این پژوهش، پودر از پیش آلیاژی برنج با ترکیب Cu28Zn به روش اتمیزاسیون آبی تولید، سپس زیر فشار ۶۰۰MPa متراکم شد. از روش رویه پاسخ^۳ براساس طرح آزمایش مرکب مرکزی^۴ جهت بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر تفجوشی استفاده شد. همچنین، دما، زمان و اتمسفر تفجوشی به عنوان متغیر در نظر گرفته شدند. هر کدام از متغیرها در ۵ سطح برای انجام آزمایشها به وسیله نرم افزار طراحی گردیدند. چگالی تفجوشی و استحکام ضربه برای بدست آوردن روابط ریاضی بین متغیرهای تفجوشی اندازه گیری و محاسبه شدند. برای ارزیابی روابط ریاضی از آنالیز واریانس^۵ در سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده شد. در نهایت، حالت بهینه در شرایط بیشترین چگالش و استحکام ضربه پیش بینی شد. پس از تجزیه و تحلیل دادهها مشاهده شد که مدل های ریاضی ارایه شده مطابقت بسیار خوبی با نتایج تجربی و بررسی های ریزساختاری دارند. بطور کلی، نتایج ناشی از آزمایشها تایید کننده صحت مدل های ریاضی ارایه شده و امکان بکارگیری این مدلها برای پیش بینی چگالش حین تفجوشی آلیاژ Cu28Zn می باشد.

واژه های کلیدی: آلیاژ Cu28Zn، تفجوشی فاز مایع سوپرسالیدوس، روش رویه پاسخ، مدل سازی.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

۲- دانشیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

*- نویسنده مسئول مقاله: amzadeh@ymail.com

^۳-Response Surface Methodology (RSM)

^۴-Central Composite Rotational Design (CCRD)

^۵-Analysis of Variance (ANOVA)

پیشگفتار

تفجوشی فاز مایع سوپر سالییدوس^۱ SLPS یکی از مکانیزمهای تفجوشی فاز مایع است، که به خوبی شناخته شده نیست [۱]. تفجوشی سوپرسالیدوس برای تفجوشی سوپر آلیاژهای پایه نیکل، آلیاژهای برنزی [۶-۲]، آلیاژهای برنجی [۱۰-۷]، فولادهای زنگ نزن، آلیاژهای آلومینیوم [۱۳-۱۱] و فولادهای ابزار با موفقیت بکار گرفته شده است.

پودرهای آلیاژی به گونه گسترده با استفاده از فناوری اتمیزاسیون تولید می‌شوند. چگالش پودرهای حاصل به دلیل درشت بودن اندازه ذرات از راه فرآیند SLPS در محدوده دمایی بین سالییدوس و لیکوئیدوس انجام می‌شود. در این نوع تفجوشی، فاز مایع در مرز بین ذرات پودری و مرز دانه‌ها تشکیل می‌شود، فیلم مایع در مرزدانه‌ها باعث نرم شدن ذرات شده و شرایط را برای چگالش فراهم می‌کنند. چگالش در اثر نیروی موئینگی که ناشی از فاز مایع تشکیل شده در مرز بین ذرات است، رخ می‌دهد [۱۹ تا ۱۴]. راندال جرمن [۱] رابطه (۱) را برای پیش بینی فشار حاصل از نیروی موئینگی معرفی کرده است.

$$\sigma_{cap} = \frac{5.2\gamma_{LV} \cos(\theta)}{D(\Delta L/L_0)} \quad (1)$$

در رابطه بالا D قطر ذره، γ_{LV} انرژی فصل مشترک مایع-بخار، θ زاویه ترشوندگی و $\Delta L/L_0$ انقباض ناشی از تفجوشی می‌باشد.

مطابق رابطه ۱ با کمتر شدن تغییرات ابعادی میزان نیروی موئینگی افزایش می‌یابد که باعث افزایش چگالش می‌شود. با افزایش فاز مایع تشکیل شده چگالش تسریع می‌شود ولی قطعه صلبیت خود را از دست داده و دقت ابعادی کاهش می‌یابد [۲۰] و سرانجام پس از حد معینی بین نیروی موئینگی و نیروی جاذبه زمین تقابل بوجود می‌آید که در کسرهای حجمی زیاد فاز مایع، در اثر نیروی جاذبه زمین قطعه شکل اولیه خود را از دست می‌دهد و به شکلی که به نام پاشنه فیل^۲ معروف است در می‌آید. به طور کلی، در SLPS، چگالش و تغییر شکل با هم رخ

در SLPS، چگالش و تغییر شکل با هم رخ می‌دهند. لیو و همکارانش [۱۵] در سال ۱۹۹۹ برای نخستین بار به بررسی چگالش و تغییر شکل در حین SLPS پرداخته‌اند و در نهایت، با معرفی پارامتر نرم‌شوندگی^۳ بر اساس رابطه ۲، شرایط بهینه را جهت کنترل تغییر شکل پیش‌بینی و مدل پیشنهادی را در سیستم آلیاژی Cu-Sn بررسی کردند.

$$\zeta = \frac{G^{1/3} V_L}{3 V_S} \quad (2)$$

در رابطه بالا G اندازه دانه، V_L کسر حجمی فاز مایع تشکیل شده و V_S کسر حجمی فاز جامد می‌باشد. حالتی که پارامتر نرم‌شوندگی در محدوده تغییر شکل $\zeta < \zeta_c$ چگالش می‌باشد، وضعیت بهینه است. بنابراین، مشاهده می‌شود که با تغییر اندازه دانه‌ها و کسر حجمی فاز مایع، پارامتر نرم‌شوندگی نیز تغییر خواهد کرد.

برای بدست آوردن خواص مطلوب همان گونه که در بالا اشاره شد، نیاز است تا متغیرهایی که روی فاز مایع و اندازه دانه تاثیرگذار هستند، شناسایی و کنترل شوند. روش رویه پاسخ^۴ از روش‌های آماری و ریاضی است که برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی پارامترها بکار می‌رود [۲۱]. همچنین، به صورت کمی رابطه‌ای بین پارامترهای ورودی کنترل‌پذیر و متغیر پاسخ بدست‌آمده ایجاد می‌کند. مراحل این روش را می‌توان به این ترتیب بیان کرد [۲۲-۲۴]:

- طراحی آزمایش‌ها برای بدست آوردن مقدار واقعی و دقیق متغیر پاسخ مورد نظر؛
- بدست آوردن مدل ریاضی چند جمله‌ای مناسب بین متغیرها برای پیش‌بینی متغیر پاسخ؛
- تعیین شرایط بهینه متغیرهای آزمایش جهت بیشینه یا کمینه کردن مقدار متغیر پاسخ؛
- تجزیه و تحلیل اثرات مستقیم و تداخل بین پارامترها از راه نمودارهای دو بعدی و سه بعدی.

³-Softening Parameter

⁴-Response Surface Methodology (RSM)

¹-Supersolidus Liquid Phase Sintering (SLPS)

²-Elephant foot

تصاویر مقاطع متالوگرافیکی گرفته شده به وسیله میکروسکوپ نوری استفاده شد.

برای طراحی آزمایش‌ها، مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم افزار Design Expert version 8 [۲۵] استفاده شد.

روش رویه پاسخ

طراحی و پیاده‌سازی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها از روش‌های آماری و تحلیلی برای تعیین پارامترهای تاثیرگذاری که بیش‌ترین اثر را بر متغیر پاسخ (خواص مورد نظر) دارند، است. روش رویه پاسخ از روش‌های پیشرفته برای تحلیل و مدل‌سازی داده‌هاست که دارای روش‌های گوناگون برای طراحی آزمایش‌ها می‌باشد. روش طراحی مرکب مرکزی چرخش‌پذیر^۲ (CCRD) روشی معروف و پرکاربرد در طراحی آزمایش‌ها به روش رویه پاسخ است. CCRD برای نخستین بار به وسیله باکس و ویلسون^۳ در سال ۱۹۵۱ معرفی شده است [۲۱]. در این پژوهش نیز برای مدل‌سازی و بهینه‌کردن فرآیند SLPS آزمایش‌ها با استفاده از روش CCRD طراحی شدند. پارامترهایی نظیر دمای تف‌جوشی، زمان و اتمسفر کوره به عنوان متغیرهای مستقل برای طراحی آزمایش‌ها در نظر گرفته شدند. مقادیر مربوط به متغیرها و چگونگی تغییر آن‌ها در جدول ۱ به صورت مقادیر واقعی و کدگذاری شده ارائه شده است. دما و زمان به عنوان پارامترهای عددی و هر کدام در پنج سطح و اتمسفر کوره نیز به عنوان پارامتر نوعی در دو سطح در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، ماتریس آزمایش‌های طراحی شده در جدول ۲ آورده شده است. مشاهده می‌شود تعداد آزمایش‌های پیشنهادی ۲۶ آزمایش می‌باشد که به صورت تصادفی باید انجام شوند.

پس از انجام آزمایش‌های پیشنهادی مقادیر مربوط به خواص فیزیکی و مکانیکی (چگالی تف‌جوشی و استحکام ضربه) اندازه‌گیری و محاسبه شدند. که نتایج بدست آمده از داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

در این پژوهش به وسیله روش رویه پاسخ بر اساس آزمایش‌های روش مرکب چرخش‌پذیر^۱ خواص فیزیکی و مکانیکی در حین تف‌جوشی پودر آلیاژی برنجی با ترکیب Cu28Zn بررسی شده است. همچنین، شرایط بهینه جهت کنترل متغیرهای فرآیند تعیین گردید.

مواد و روش پژوهش

ساخت نمونه‌ها و آزمایش‌های بررسی خواص

پودر آلیاژی برنجی با ترکیب شیمیایی Cu28Zn به روش اتمیزاسیون آبی در شرکت متالورژی پودر تبریز تولید شد. ترکیب شیمیایی پودر با آنالیز XRF و اندازه ذرات آن با استفاده از آزمون الک بر اساس استاندارد ASTM E11 تعیین گردید. جهت تعیین محدوده دمایی تف‌جوشی نیز از آنالیز حرارتی DSC استفاده شد. سپس پودر برنجی با ۰/۷۵ درصد وزنی استئارات لیتیم به مدت ۲۰ دقیقه در هم‌زنی با سرعت ۶۵ دور در دقیقه مخلوط شد. نمونه‌های مکعبی به ابعاد $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$ به وسیله پرس هیدرولیکی تک محوره با قالب متحرک تحت فشار ۶۰۰ MPa ساخته شدند. پس از اندازه‌گیری جرم و ابعاد نمونه‌های خام در کوره کوچک آزمایشگاهی نوع TFS/25-1250 که شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده است، ابتدا در دمای 540°C به مدت ۳۰ دقیقه روان‌ساز زدایی و سپس ۶۰-۱۵ دقیقه در منطقه گرم کوره در محدوده دمایی 900°C -۸۵۰ در اتمسفرهای گاز خنثی با دبی ۲ لیتر در دقیقه تف‌جوشی و در قسمت انتهایی کوره (منطقه سوم) سرد شدند. سپس جرم نمونه‌های تف‌جوشی شده اندازه‌گیری شد.

چگالی خام نمونه‌ها به روش هندسی و چگالی تف‌جوشی نیز با استفاده از روش ارشمیدس و بر اساس استاندارد DIN ISO 3369 تعیین شد.

آزمون استحکام ضربه با استفاده از دستگاه آزمون چارپی مدل Roell Amsler RKP 300. بر اساس استاندارد ASTM E23 انجام شد. بمنظور بررسی ریخت‌شناسی حفرات، رشد دانه و آرایش دوباره ذرات از

² -Central Composite Rotatable Design (CCRD)

³ -Box and Wilson

¹ -Central Composite Rotational Design (CCRD)

نتایج و بحث

خواص پودر مصرفی

آنالیز شیمیایی و مشخصات پودر برنجی در جدول ۳ گزارش شده است. مشاهده می شود که اندازه ذرات زیر ۱۸۰ میکرون بوده که با شکل ۲ نیز انطباق مناسبی دارد. همچنین، ریخت شناسی ذرات به دلیل این که پودر به روش اتمیزاسیون آبی تولید شده است، بی شکل هستند. شکل ۳ منحنی DSC پودر مصرفی می باشد که در محدوده دمایی 700°C تا 1100°C دو واکنش گرماگیر رخ داده است. با مقایسه شدت پیکها نتیجه می شود که پیک نخست مربوط به واکنش تبدیل جامد به مایع می باشد که در دمایی بالاتر از 850°C رخ داده است. پیک دوم در منحنی DSC به دلیل این که دارای شدت بیشتری است، واکنش تبدیل فاز مایع به بخار را نشان می دهد که با توجه به دمای تبخیر روی (907°C) و دمای شروع واکنش دوم (918°C) می توان نتیجه گرفت که تبخیر روی رخ داده است. بنابراین، پنجره دمایی 850°C تا 900°C محدوده ای مناسب برای طراحی آزمایش هاست.

مدل سازی چگالی تفجوشی و استحکام ضربه

مدل های ریاضی درجه دوم^۴ پیشنهادی به وسیله نرم افزار Design Expert-8 برای متغیرهای پاسخ در روابط ۶ و ۷ آورده شده است.

$$\text{Sintered density [g.cm}^{-3}\text{]} = 7.44 + 0.6A + 0.15B - 1.02C - 0.052AB - 0.068AC$$

$$+ 0.026BC - 0.21A^2 - 0.15B^2$$

$$\text{Impact energy [J/cm}^2\text{]} = 71.38 - 4.23A +$$

$$3.93B + 0.12C - 6.57AB - 1.34AC$$

$$- 1.18BC - 22.12A^2 - 18.86B^2$$

مدل های ارایه شده برای مقادیر کدگذاری شده متغیرها می باشند. نماد A نشان دهنده دمای تفجوشی، نماد B نشان دهنده زمان تفجوشی و نماد C نشان دهنده اتمسفر تفجوشی است.

در این پژوهش برای طراحی آزمایش ها، تحلیل داده ها، مدل سازی و بهینه کردن پارامترها از نرم افزار Design Expert-8 استفاده شده است.

ارایه مدل ریاضی

روش رویه پاسخ با استفاده از داده های تجربی، روابط ریاضی را براساس مدل رگرسیون از نوع چندجمله ای درجه دوم^۱ ارایه می کند. متغیرهای پاسخ (خواص) در این بررسی تابعی از دما (A)، زمان (B) و اتمسفر تفجوشی (C) هستند که به صورت زیر قابل بیان می باشند:

$$Y = f(A, B, C) \quad (3)$$

در رابطه بالا Y مقدار پاسخ مورد نظر می باشد. معادله رگرسیون چند جمله ای درجه دوم^۲ استفاده شده در این پژوهش به صورت زیر برای رویه پاسخ شامل k فاکتور در رابطه ۴ ارایه شده است:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i k_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} a_{ij} X_i X_j \quad (4)$$

در رابطه بالا X_i و X_j به ترتیب مقادیر مستقل و کدگذاری شده پارامترها و α_i ، α_{ii} و α_{ij} به ترتیب ثوابت خطی، درجه دوم و برهمکنش بین پارامترها می باشند [۲۴، ۲۶، ۲۷]. چند جمله ای حاصل برای طراحی انجام شده در رابطه ۵ ارایه شده است:

$$Y = a_0 + a_1A + a_2B + a_3C + a_{12}AB +$$

$$a_{13}AC + a_{23}BC + a_{11}A^2 + a_{22}B^2 + a_{33}C^2$$

در رابطه بالا حروف A، B و C معرف فاکتورها و ترکیب بین حروف (مانند AB) مبین برهمکنش بین فاکتورهای مستقل در مدل ارایه شده می باشد. مقادیر ثوابت در رابطه ۵ به روش رگرسیون با استفاده از نرم افزار Design Expert 8 در سطح اطمینان ۹۵٪ محاسبه شدند. برای بررسی اعتبار مدل های پیش بینی شده آنالیز واریانس^۳ (ANOVA) بکار گرفته شد.

¹ - A second order polynomial regression model

² - second order regression equation

³ - Analysis of variance (ANOVA)

⁴ - Quadratic model

بررسی دقت و اعتبار مدل‌ها

جهت بررسی دقت و اعتبار روابط پیشنهادی از آنالیز واریانس و نمودار نرمالیتته مانده‌ها استفاده شده است. جدول ۴ آنالیز واریانس را برای متغیرهای پاسخ در سطح اطمینان ۹۵٪ را نشان می‌دهد. با توجه مقادیر F-value و R^2 می‌توان نتیجه گیری کرد که معادله‌های ۳ و ۴ دارای اعتبار بالایی هستند و برای پیش‌بینی و تخمین نتایج می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

مقادیر R^2 برای چگالی تفجوشی برابر ۹۲/۷۸٪ و برای استحکام ضربه برابر ۹۵/۸۱٪ می‌باشد که نشان‌دهنده دقت بالای تخمین داده‌ها (پیش‌بینی شده) در مقایسه با مقادیر تجربی است. برای نشان دادن مقادیر پیش‌بینی شده و تجربی می‌توان از نمودارهای شکل ۴ برای پاسخ‌ها استفاده کرد که شیب این نمودار برابر با ضریب R^2 می‌باشد و هر چقدر به یک نزدیک باشد نشان‌دهنده دقت و اعتبار مدل‌هاست.

نمودار نرمالیتته مانده‌ها (شکل ۵) نیز نشان‌دهنده پیروی نقاط از یک رفتار تقریباً خطی است. توزیع یکنواخت و خطی بودن نشان‌دهنده توزیع خطاها به صورت نرمال است، که حاکی از کمتر بودن خطا و اعتبار مدل‌هاست.

بررسی چگونگی تاثیر متغیرهای SLPS بر چگالی تفجوشی و استحکام ضربه بررسی تاثیر پارامترها بدون در نظر گرفتن برهمکنش

برای نشان دادن چگونگی تاثیر هر یک از پارامترهای دما، زمان و اتمسفر تفجوشی به صورت مجزا (بدون در نظر گرفتن برهمکنش بین متغیرها) بر خواص فیزیکی و مکانیکی از نمودارهای Perturbation استفاده شده است.

در شکل ۶ الف و ب نحوه تاثیر دما، زمان و اتمسفر بر چگالی تفجوشی نشان داده شده است. با فرض ثابت بودن زمان (۳۷/۵ دقیقه)، چگالی رفتاری سهمی‌وار نسبت به دما دارد و تقریباً در اطراف نقطه مرکزی (۸۷۵°C) و (۳۷/۵ دقیقه) بیشینه مقدار را نشان می‌دهد (منحنی‌های A). می‌توان با فرض این‌که دما در نقطه مرکز ثابت باشد،

تاثیر تغییرات زمان را بر چگالی مشاهده کرد (منحنی‌های B). چگونگی تاثیر زمان بر چگالی نیز تقریباً شبیه دما می‌باشد. شکل ۶ ج و د نمودار مربوط به استحکام ضربه را در دو اتمسفر گوناگون در نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که در اطراف نقطه مرکزی بیشینه مقدار استحکام ضربه بدست می‌آید که این نتیجه با بیشینه بودن چگالی در این ناحیه انطباق خوبی دارد. همچنین، رفتار سهمی‌وار استحکام ضربه با دما و زمان تفجوشی نیز مشهود است.

بررسی تاثیر پارامترها با در نظر گرفتن برهمکنش

برای بررسی نحوه تاثیر پارامترهای تفجوشی با در نظر گرفتن برهمکنش بین پارامترها می‌توان از منحنی‌های دو بعدی کانتور چگالی تفجوشی و استحکام ضربه بهره گرفت. بر اساس شکل ۷ با استفاده از نمودارهای کانتور دو بعدی مشاهده می‌شود که بیشینه چگالی و استحکام ضربه در نقطه‌ای نزدیک به نقطه مرکزی (۸۷۵°C , $۳۷/۵\text{min}$) بدست می‌آید. همچنین، منحنی‌ها نیز بیانگر رفتار سهمی‌وار چگالی تفجوشی و استحکام ضربه با دما و زمان هستند. بنابراین، استفاده از محدوده سرخ رنگ نمودارهای کانتور برای دستیابی به خواص فیزیکی و مکانیکی بیشینه توصیه می‌شود.

با بررسی چشمی نواحی سرخ رنگ در شکل ۷ مشاهده می‌شود که بیشینه مقدار چگالی و استحکام ضربه در اتمسفر نیتروژن و در دما و زمانی بالاتر از اتمسفر آرگون بدست آمده است.

بهینه‌سازی فرآیند SLPS

یکی از مزایای مهم و کاربردی روش رویه پاسخ امکان بهینه‌سازی سیستم مورد مطالعه می‌باشد. برای بدست آوردن شرایط بهینه با استفاده از نرم افزار Design Expert مقادیر مربوط به متغیرهای پاسخ بر اساس نتایج جدول ANOVA و نمودارهای کانتور دو بعدی بدست آمد. شرایط پیشنهادی با فرض بیشینه بودن مقادیر چگالی تفجوشی و استحکام ضربه به صورت زیر می‌باشد:

دمای تفجوشی: ۸۷۶°C

زمان تفجوشی: ۴۶ دقیقه

اتم‌سفر تفجوشی: نیتروژن

هم‌چنین، مقادیر پیش‌بینی شده در شرایط بهینه برای چگالی تفجوشی برابر $7/49 \text{ g/cm}^3$ و برای استحکام ضربه برابر $70/14 \text{ J/cm}^2$ بدست آمد.

بررسی‌های ریزساختاری

شکل ۸ تصاویر مربوط به رشد دانه‌ها و حفرات در شرایطی که دما و زمان با هم تغییر می‌کنند، ارائه شده است که تابعیت رشد دانه و حفرات با دما و زمان تفجوشی با هم نمایش داده شده است.

با توجه به ریزساختار نمونه‌های تفجوشی شده به نظر می‌رسد در دمای 85°C با شروع فرآیند تفجوشی پیوندهای اولیه بین ذرات در طول گرمایش، در نتیجه نفوذ ذرات در یک‌دیگر تشکیل شده و این فرآیند موجب چگالش نسبی نمونه‌ها شده است. با افزایش دما و آغاز فرآیند SLPS، فاز مذاب در داخل دانه‌ها و مرزدانه‌ها تشکیل شده و در اثر نیروی موئینگی ناشی از فاز مایع، ذرات به‌صورت منظم در کنار یک‌دیگر قرار گرفته‌اند و مذاب تشکیل شده باعث خرد شدن ذرات و شکل‌گیری دانه‌های کوچک‌تری شده است. با بالاتر رفتن دما تا 875°C ، دانه‌ها در کنار یک‌دیگر آرایش دوباره یافته و چگالش افزایش چشم‌گیری داشته است. در دماهای بالاتر از 875°C ، دانه‌ها رشد کرده و به دنبال آن یک‌سری حفرات بین دانه‌ها باقی مانده‌اند که این افزایش در اندازه دانه‌ها می‌تواند دلیل مناسبی برای کاهش چگالی تفجوشی و مقاومت به ضربه باشد [۱، ۲۸، ۲۹].

نتیجه‌گیری

۱. با استفاده از روش رویه پاسخ (RSM) بر پایه طراحی آزمایش مرکب مرکزی (CCRD) مدل‌های ریاضی در سطح اطمینان ۹۵٪ برای چگالی تفجوشی، پارامتر چگالش، درصد تخلخل، درصد انقباض حجمی و استحکام ضربه در حین تفجوشی فاز مایع سوپرسالیدوس آلیاژ Cu28Zn بدست آمد و نتایج بدست آمده از آنالیز واریانس تأییدکننده صحت روابط پیشنهادی بود.

۲. نمودارهای دو بعدی و رویه سه بعدی نشان دهنده رفتار سهمی‌وار برای چگالی تفجوشی، پارامتر چگالش، درصد تخلخل، درصد انقباض حجمی و استحکام ضربه با دما و زمان تفجوشی در حین پدیده SLPS بودند.

۳. می‌توان با انجام آزمایش‌های کم‌تر شرایط بهینه را برای رسیدن به بیشینه چگالش آلیاژ Cu28Zn حین فرآیند SLPS در دمای 876°C ، زمان ۴۶ دقیقه و اتم‌سفر نیتروژن را پیش‌بینی کرد.

۴. تصاویر متالوگرافی مبین وقوع پدیده‌های رشد دانه و درشت شدن حفرات با افزایش بیش‌تر دما و زمان تفجوشی است که این روند باعث افت خواص فیزیکی و مکانیکی شده است.

References

- 1- R. M. German, "Liquid phase sintering", Springer, 1985.
- 2- P. Murley and R. M. German, "Supersolidus sintering of coarse powders and its application to powder injection molding", *Advances in powder metallurgy*, pp. 103-120, 1989.
- 3- R. Tandon, Y. Liu and R. M. German, "Role of initial powder characteristics in supersolidus liquid phase sintering", *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, 3: pp. 251-266, 1994.
- 4- R. Tandon, Y. Liu and R. M. German, "Application of supersolidus liquid phase sintering to high density processing of prealloyed powders", *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*, 2: pp. 5, 1995.
- 5- Y. Liu, R. Tandon and R. M. German, "Advanced sintering technology for prealloyed powders", *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, 1: pp. 4, 1995.
- ۶- م. قارونی جعفری، م. آزادبه، ش. شادپور، ا. محمدزاده، "مطالعه تغییر آرایش ذرات با بررسی جدایش سرب در تفجوشی سوپرسالییدوس آلیاژ Cu-10Sn-10Pb"، همایش ملی مهندسی مواد، دانشگاه ملایر، ۱۳۹۱.
- 7- A. Sabahi, M. Azadbeh and S. Shadpour, "Study on the Dependence of Physical and Mechanical Properties of Prealloyed Cu-20Zn Compacts to Sintering Temperature". *Majlesi Journal of Materials Engineering*, 4(2), 2010.
- ۸- ا. محمدزاده، م. آزادبه، م. قارونی جعفری، ع. بهور، م. دخانچی، "مدل سازی چگالش و تغییرات ابعادی قطعات متالورژی پودر برنجی در حین پدیده فاز مایع سوپرسالییدوس"، همایش ملی تفجوشی مهندسی مواد، دانشگاه ملایر، ۱۳۹۱.
- 9- A. Sabahi and M. Azadbeh, "Microstructural Changes and Densification Behavior during Sintering of Cu-20Zn Prepared from Prealloyed Powder", *Tabriz University Journal of Mechanical Engineering*, 7: pp. 1-5, 2010.
- 10- M. Azadbeh, H. Danninger and C. Gierl, "Evaluation of properties and graded densification during sintering of Cu-20Zn prepared from prealloyed powder", *Proceedings of PM2011, Spain, Barcelon*, 2011.
- 11- A. Ziani and S. Pelletier, "Supersolidus liquid-phase sintering behavior of degassed 6061 Al powder", *International journal of powder metallurgy*, 35(8): pp. 49-58, 1999.
- 12- A. Ziani and S. Pelletier, "Sintered 6061 Al prealloyed powder: processing and mechanical behavior", *International journal of powder metallurgy*, 35(8): pp. 59-66, 1999.
- 13- C. Padmavathi, A. Upadhyaya and D. Agrawal, "Effect of microwave and conventional heating on sintering behavior and properties of Al-Mg-Si-Cu alloy", *Materials chemistry and physics*, 130: pp. 449-457, 2011.
- 14- Y. Liu, R. Tandon and R.M. German, "Modeling of supersolidus liquid phase sintering: I. Capillary force". *Metallurgical and Materials Transactions A*, 26(9): pp. 2415-2422, 1995.
- 15- J. Liu, A. Lal and R. M. German, "Densification and shape retention in supersolidus liquid phase sintering". *Acta materialia*, 47(18): pp. 4615-4626, 1999.
- 16- D. C. Blaine, R. Bollina, S. J. Park and R. M. German, "Critical use of video-imaging to rationalize computer sintering simulation models". *Computers in industry*, 56(8): pp. 867-875, 2005.
- 17- R. M. German, "Supersolidus liquid-phase sintering of prealloyed powders". *Metallurgical and Materials Transactions A*, 28(7): pp. 1553-1567, 1997.
- 18- Y. Liu, R. Tandon and R. M. German, "Modeling of supersolidus liquid phase sintering: II. Densification", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 26(9): pp. 2423-2430, 1995.
- 19- R. M. German, "An Update on the Theory of Supersolidus Liquid Phase Sintering", *Proceedings Sintering 2003, Materials Research Institute, Pennsylvania State University, University Park, PA*, 2003.
- 20- Z. S. Nikolic, "Computer Simulation of Liquid Phase Sintering: Gravity Induced Skeletal Structure Evolution: A Review", *Mater Sci Forum, Trans Tech Publ*, 624: 19-42, 2009.
- 21- G. E. P. Box and K.B. Wilson, "On the experimental attainment of optimum conditions". *Journal of the Royal Statistical Society*, 13(1): pp. 1-45, 1951.
- ۲۱- ر. معمارزاده، س. جوادپور، ف. پناهی، "بهبود سازی عوامل موثر بر اندازه نانو ذرات اکسید قلع به روش تاگوچی"، *مجله*

مواد نوین، دانشگاه آزاد مرودشت، دوره دوم، شماره هفتم، بهار ۱۳۹۱.

23- P. K. Bardhan, R. Behera, S. Patra and G. Sutradhar, "Analysis of Surface Roughness of Machined Surface of Powder Metallurgy Components", IJSER, 2: 1-10, 2011.

24- R. H. Myers, D. C. Montgomery and C. M. Anderson-Cook, "Response surface methodology", Allyn and Bacon Boston, 1971.

25- Cited Available from: www.statease.com.

26- R. M. German, P. Suri and S. J. Park, "Review: liquid phase sintering". Journal of Materials Science, 44(1): pp. 1-39, 2009.

27- A. Heidarzadeh and H. Khodaverdizadeh, A. Mahmoudi, E. Nazari, "Tensile behavior of friction stir welded AA 6061-T4 aluminum alloy joints", Materials & Design, 37: pp. 166-173, 2012.

28- R. M. German, P. Suri and S. J. Park, "Review: liquid phase sintering", Journal of Materials Science, 44(1): pp. 1-39, 2009.

29. S. J. L. Kang, "Sintering", Wiley Online Library, 2005.

پیوستها

جدول ۱- پارامترهای طراحی شده برای انجام آزمایشها و مقادیر واقعی و کدگذاری شده پارامترها در فرآیند SLPS

Symbols	SLPS variables	Coded values of variables				
		-1.41	-1	0	1	1.41
A	Temperature (°C)	840	850	875	900	910
B	Time (min)	6	15	38	60	70
C	Atmosphere	-	N ₂	-	Ar	-

جدول ۲- ماتریس آزمایش‌های طراحی شده (مقادیر تجربی بدست آمده از آزمایش‌ها و پیش بینی شده به وسیله مدل‌ها برای چگالی تفجوشی و استحکام ضربه)

Standard order ¹	Runs ²	Sintered density [g.cm ⁻³]		Impact energy (J/cm ²)	
		Actual values	Predicted values	Actual values	Predicted values
1	3	6.87	6.78	27.46	21.48
2	10	7.30	7.15	29.94	28.84
3	1	7.18	7.14	47.80	44.84
4	4	7.29	7.29	24.13	25.93
5	15	6.79	6.87	22.76	32.25
6	16	7.13	7.22	21.14	23.75
7	11	6.90	6.98	23.95	27.13
8	20	7.39	7.32	40.39	39.29
9	18	7.46	7.46	70.00	71.36
10	23	7.42	7.46	74.87	71.36
11	22	7.40	7.46	76.00	71.36
12	21	7.45	7.46	74.00	71.36
13	2	7.46	7.46	67.88	71.36
14	13	6.84	6.84	30.18	26.77
15	6	6.80	6.93	25.85	28.78
16	17	7.26	7.30	45.42	45.40
17	7	7.12	7.18	14.18	21.13
18	5	7.05	7.03	37.05	36.20
19	14	7.13	7.00	30.55	20.20
20	8	6.88	6.88	28.58	30.69
21	19	7.35	7.37	39.13	36.12
22	12	7.47	7.43	66.28	71.56
23	26	7.45	7.43	74.79	71.56
24	25	7.48	7.43	70.43	71.56
25	24	7.42	7.43	65.46	71.56
26	9	7.43	7.43	75.18	71.56

۱- ترتیب آزمایش‌ها

۲- ترتیب انجام آزمایش‌ها (انجام تصادفی آزمایش‌ها)

جدول ۳- مشخصات پودر آلیاژی برنجی

آنالیز شیمیایی پودر آلیاژی برنجی (wt%)	
Cu	Balance
Zn	28.6
Al	0.14
Fe	0.085
S	0.062
Si	0.054
P	0.0084

خواص پودر برنجی

سیالیت	21 sec/50g
چگالی ظاهری	3.2 g.cm ⁻³
شکل ذرات	نامنظم

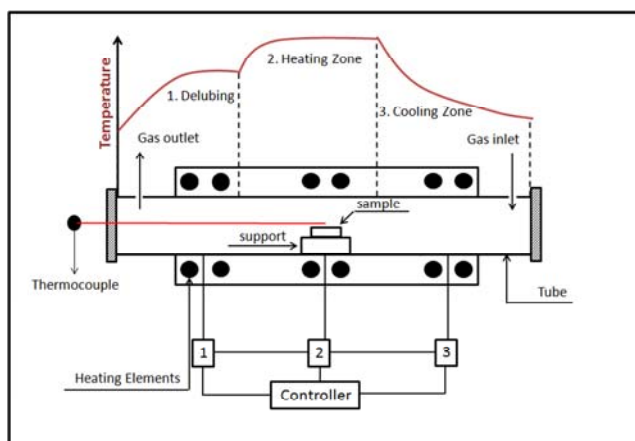
نتایج تست الک

<180 μm	9.75 %wt
<125 μm	24.63 %wt
<90 μm	23.53 %wt
<63 μm	39.77 %wt

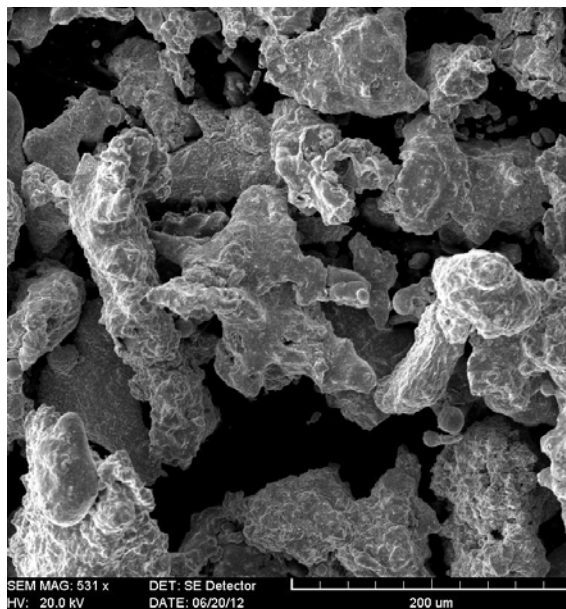
جدول ۴- آنالیز واریانس (ANOVA)

.(R₁: Sintered density [g.cm⁻³], R₂: Impact energy [J/cm²])

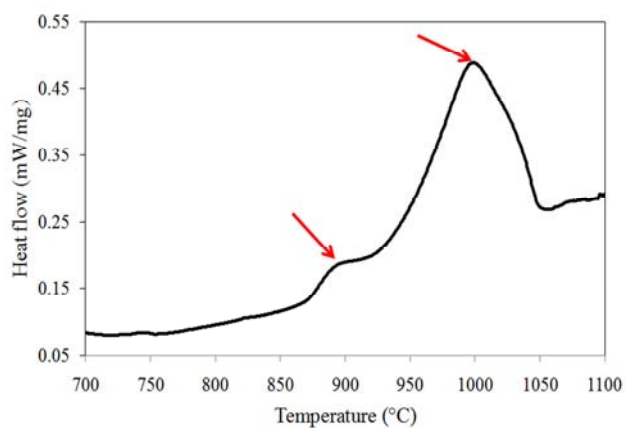
	Sum of squares		Mean squares		F-value	R ²	Adj. R ²
	Regression	Residual	Regression	Residual			
R ₁	1.36	0.11	7.17	6.24×10 ⁻³	27.3	0.9278	0.8938
R ₂	11243.1	491.76	1405.39	28.93	48.58	0.9581	0.9384



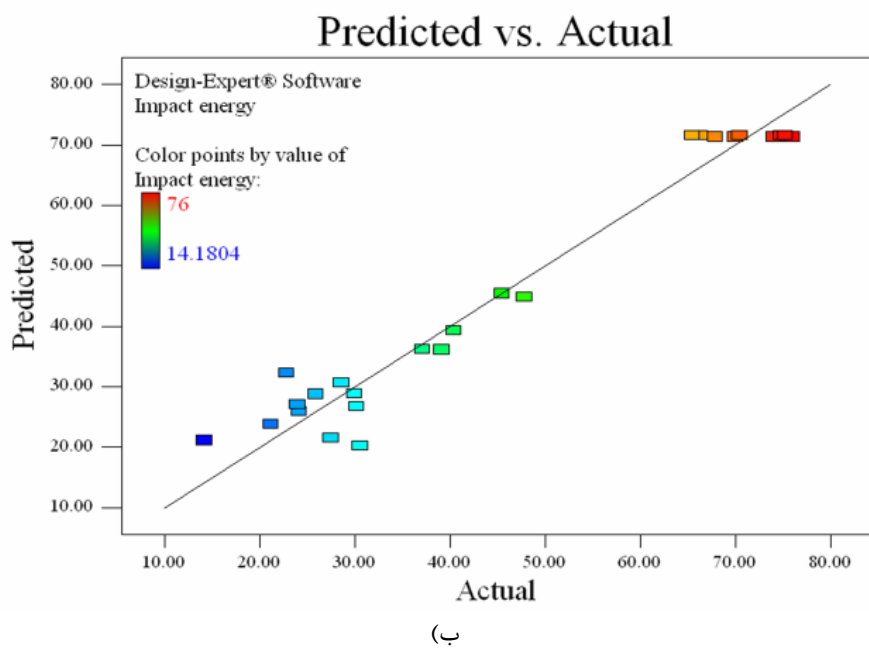
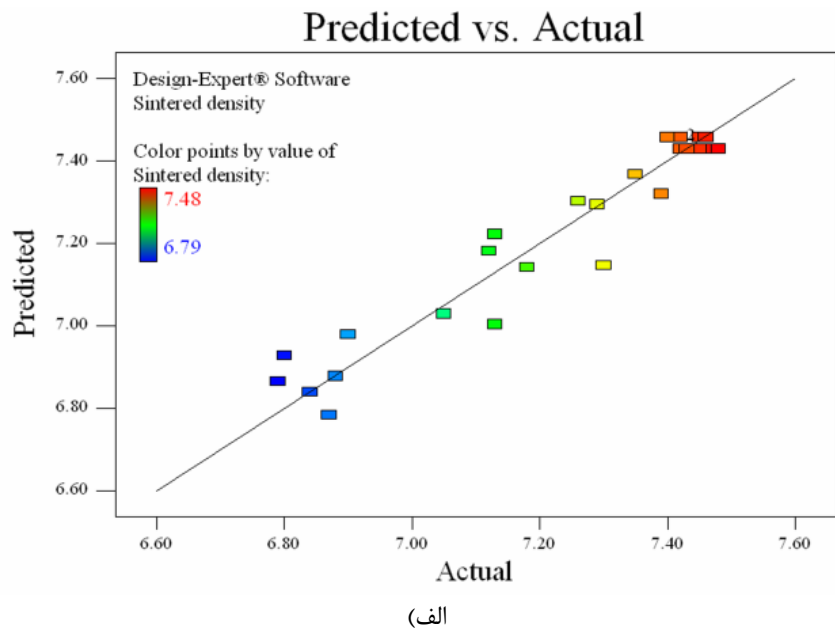
شکل ۱- شماتیک کوره تیوبی، کنترل دما و فرآیند تفجوشی.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر برنج

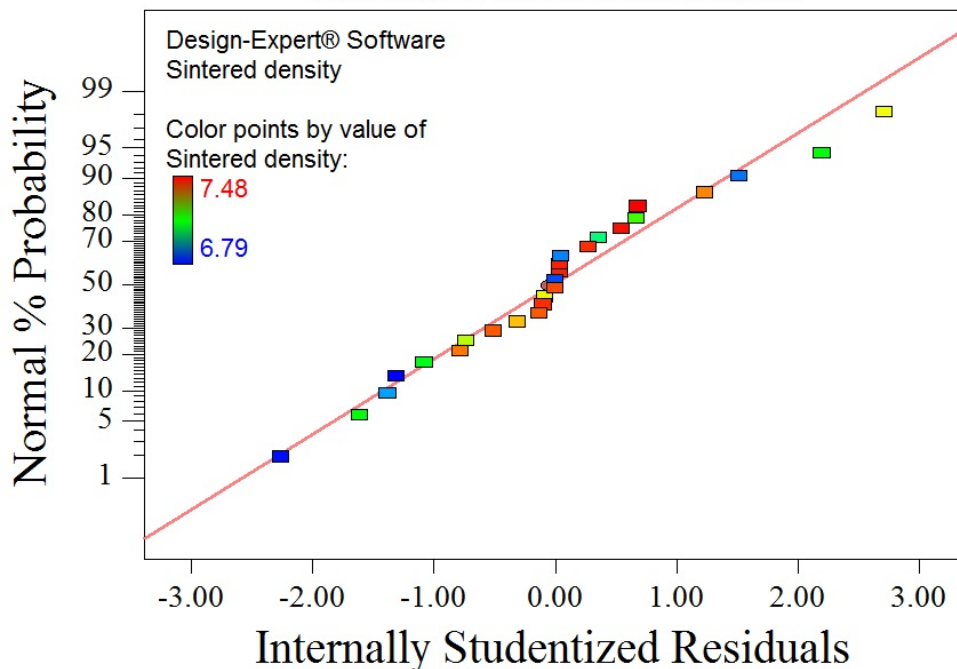


شکل ۳- منحنی آنالیز حرارتی DSC پودر Cu-28Zn



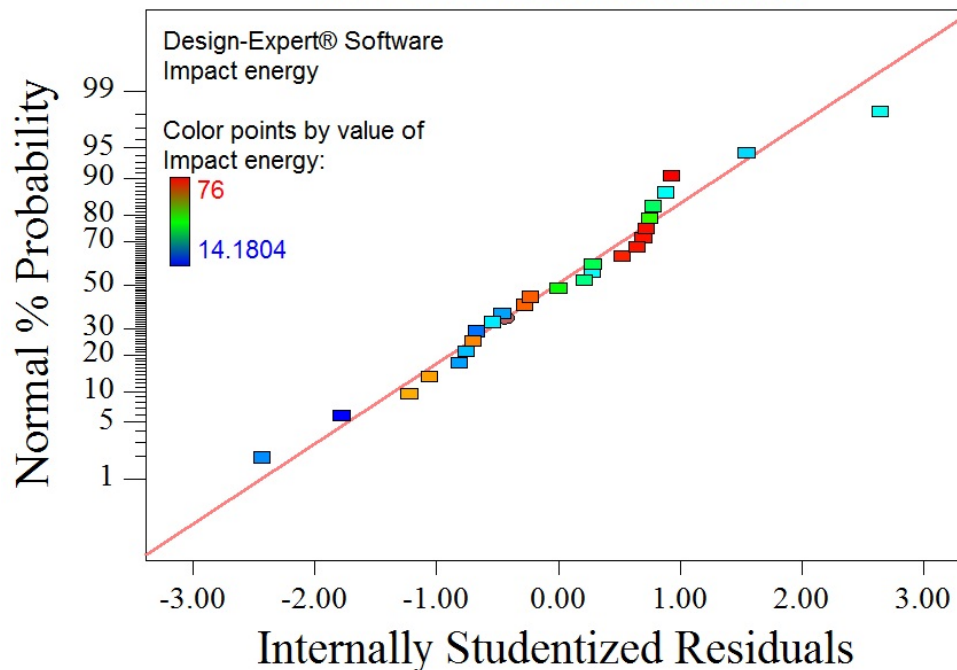
شکل ۴- نمودار مقادیر پیش بینی شده در برابر مقادیر واقعی، الف) چگالی تفجوشی (g/cm^3) ب) استحکام ضربه (J/cm^2).

Normal Plot of Residuals



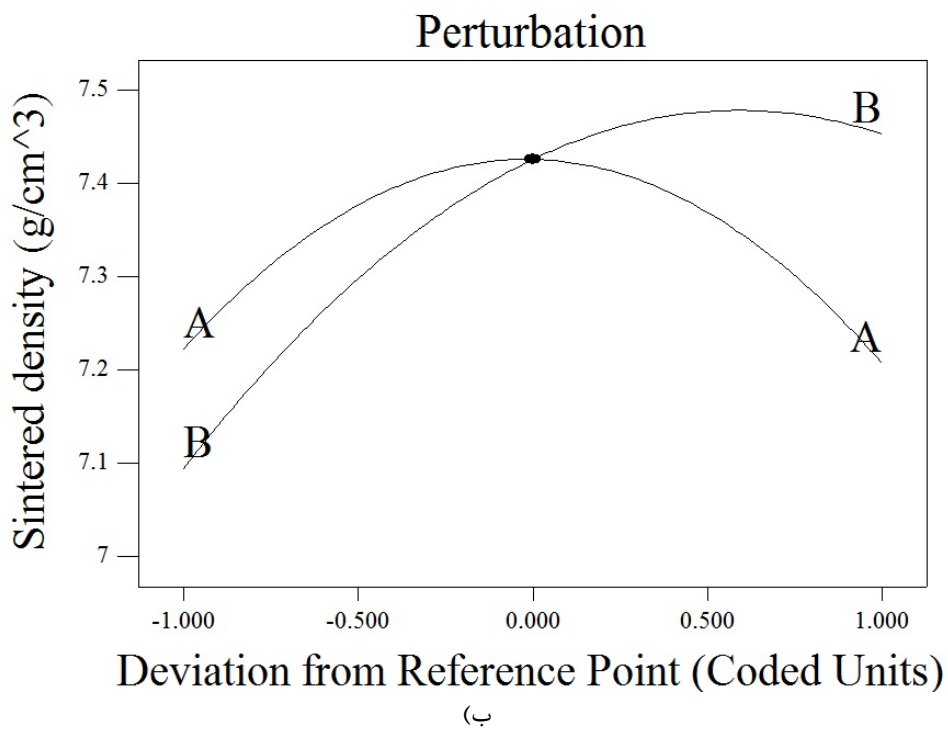
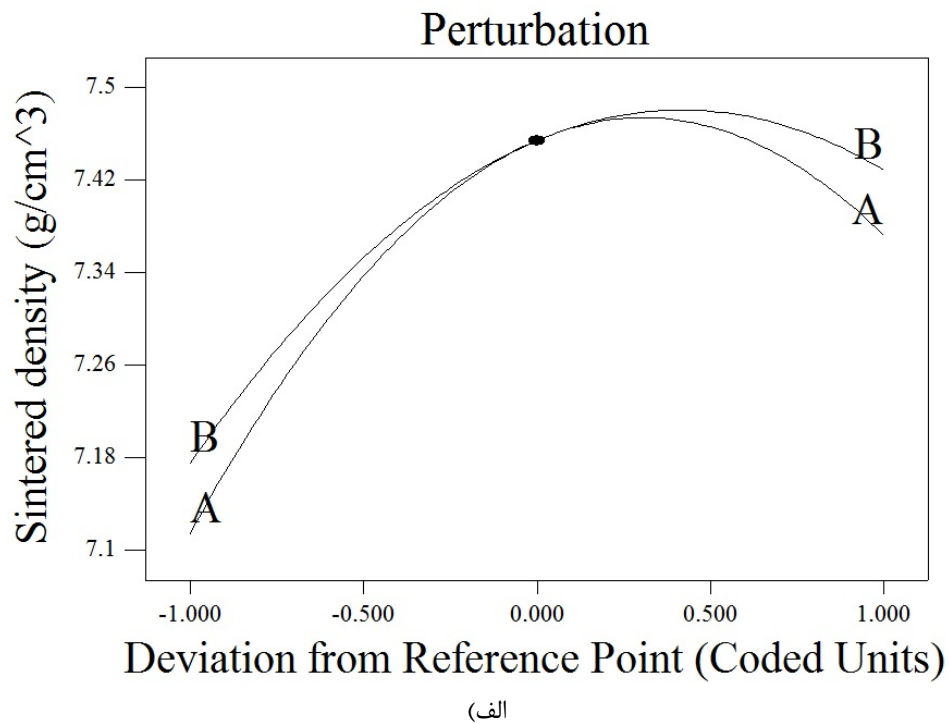
(الف)

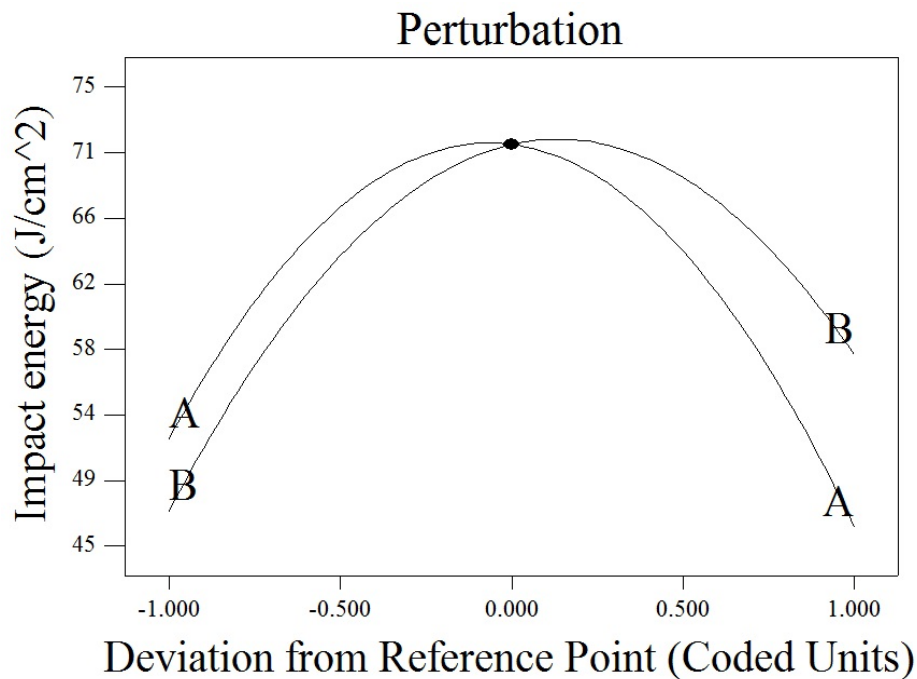
Normal Plot of Residuals



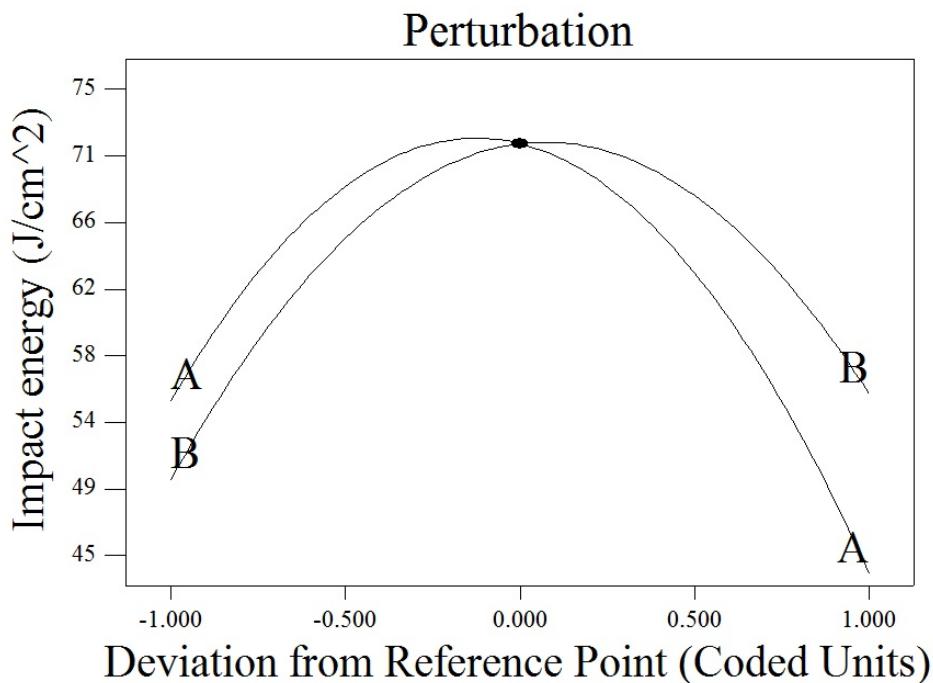
(ب)

شکل ۵- نمودار نرمالینه مانده‌ها. الف) چگالی تفجوشی ب) استحکام ضربه.



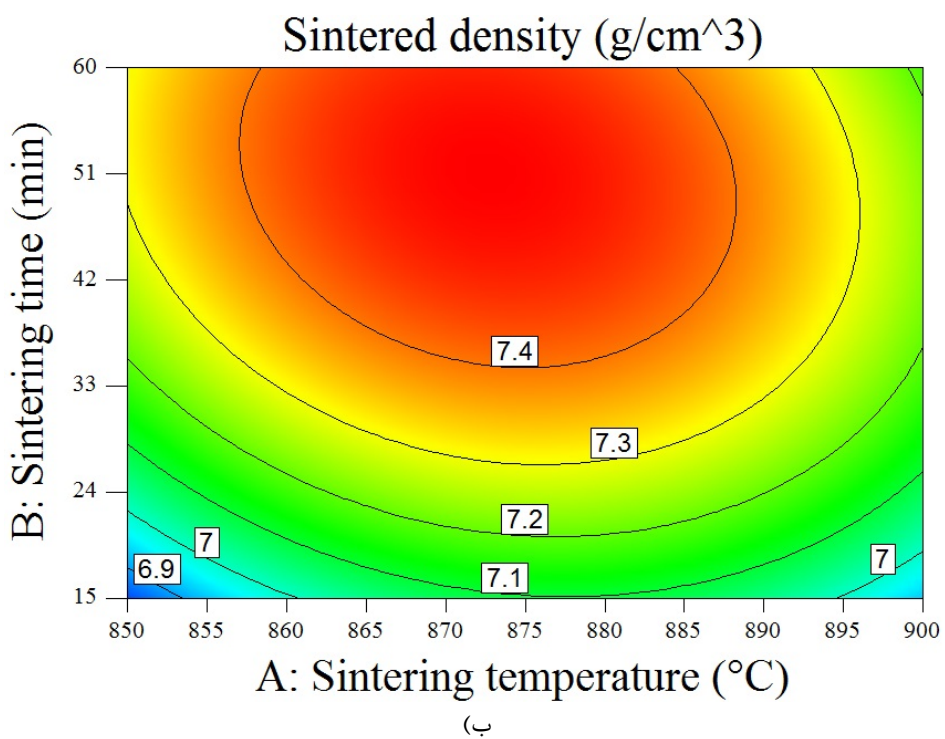
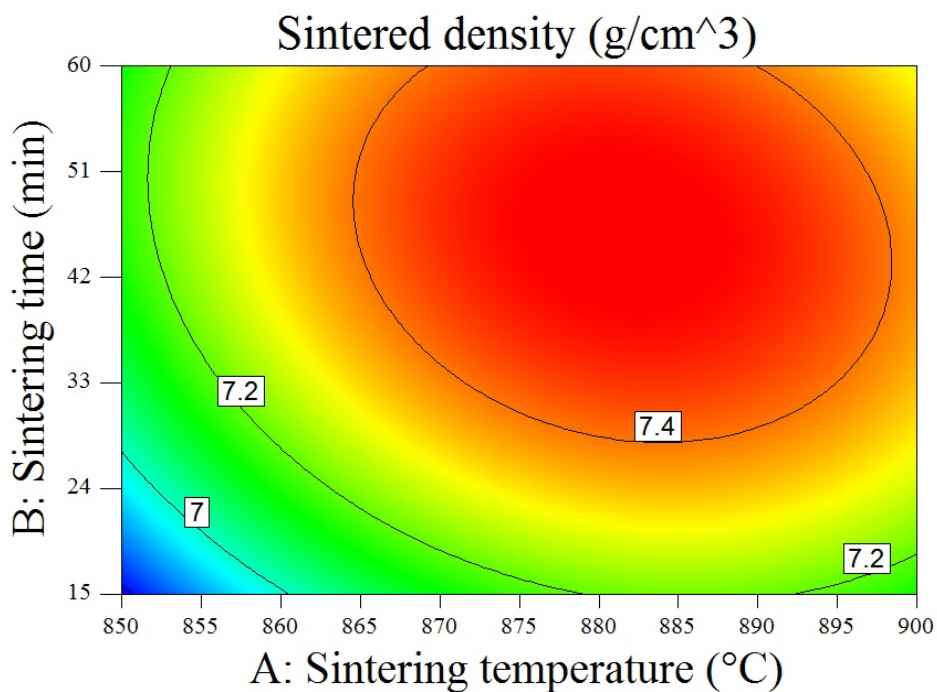


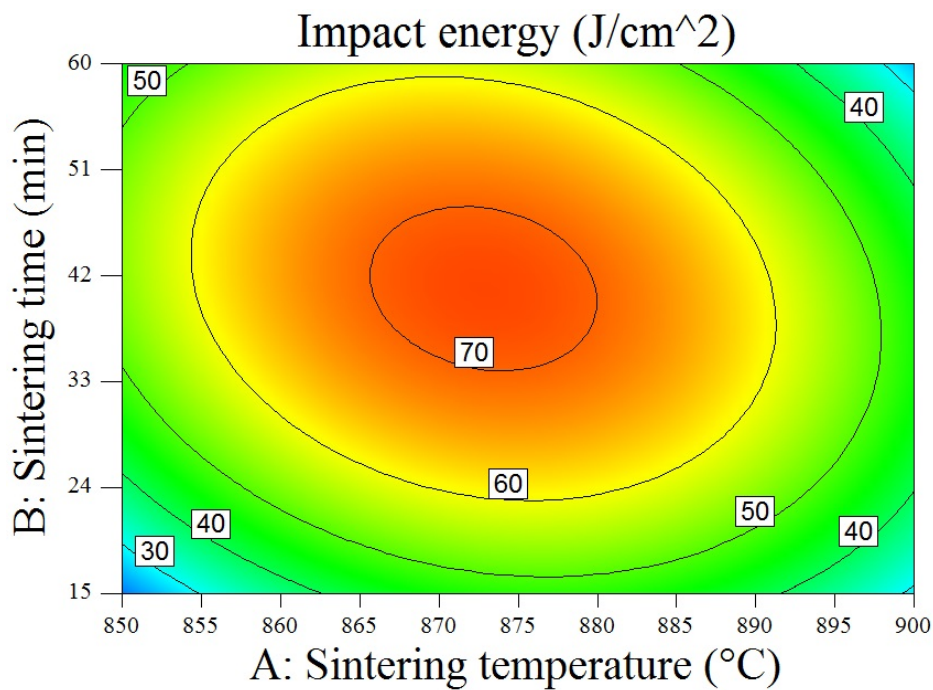
(ج)



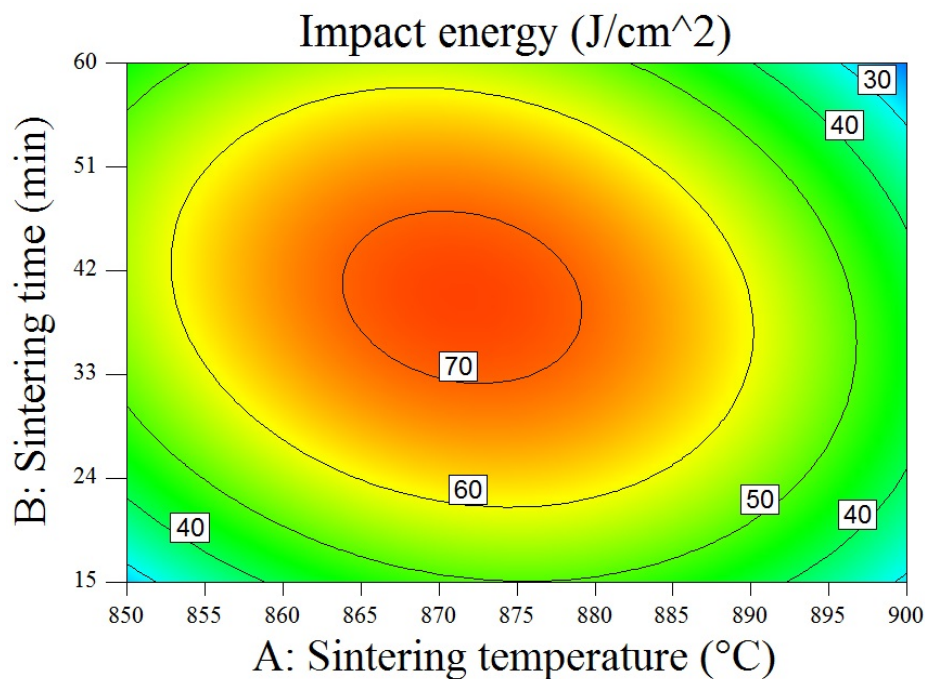
(د)

شکل ۶- نمودارهای نحوه تاثیر متغیرها بر چگالی تفجوشی و استحکام ضربه. الف) چگالی تفجوشی، اتمسفر نیتروژن (ب) چگالی تفجوشی، اتمسفر آرگون (ج) استحکام ضربه، اتمسفر نیتروژن (د) استحکام ضربه، اتمسفر آرگون



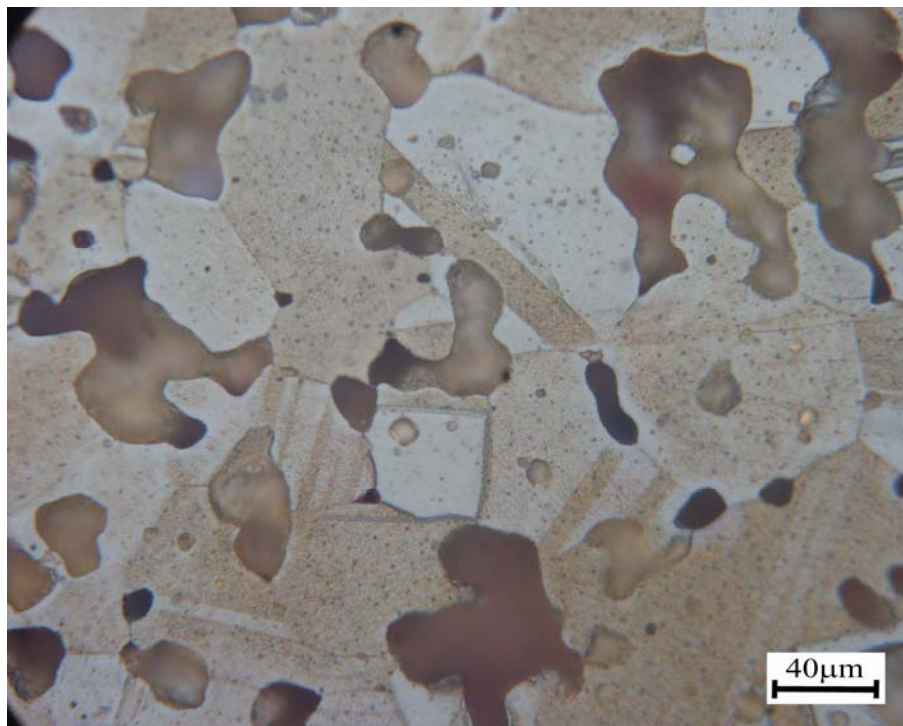


(ج)

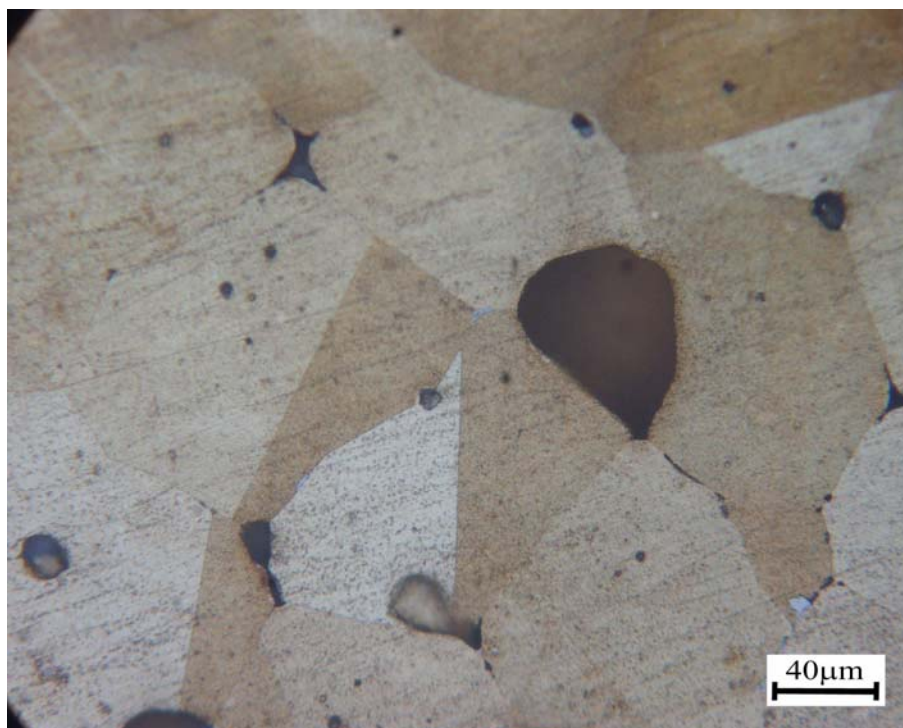


(د)

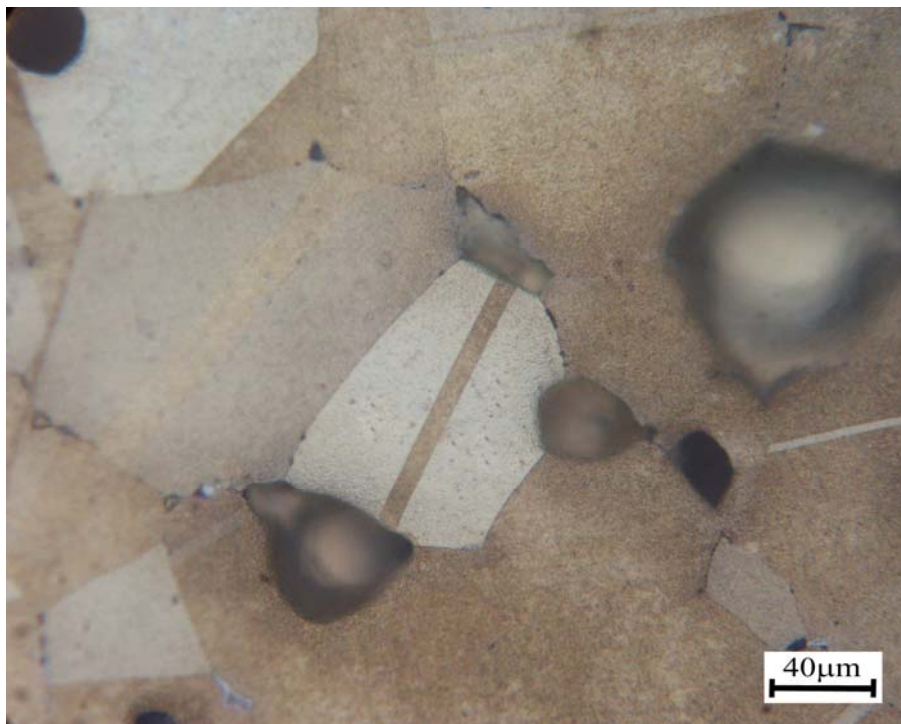
شکل ۷- گراف‌های کانتور دو بعدی تاثیر همزمان دما و زمان تف‌جوشی بر خواص فیزیکی و مکانیکی در اتمسفرهای گوناگون تف‌جوشی. الف) نمودار کانتور چگالی تف‌جوشی، اتمسفر N_2 ب) نمودار کانتور چگالی تف‌جوشی، اتمسفر Ar ج) نمودار کانتور استحکام ضربه، اتمسفر N_2 د) نمودار کانتور استحکام ضربه، اتمسفر Ar



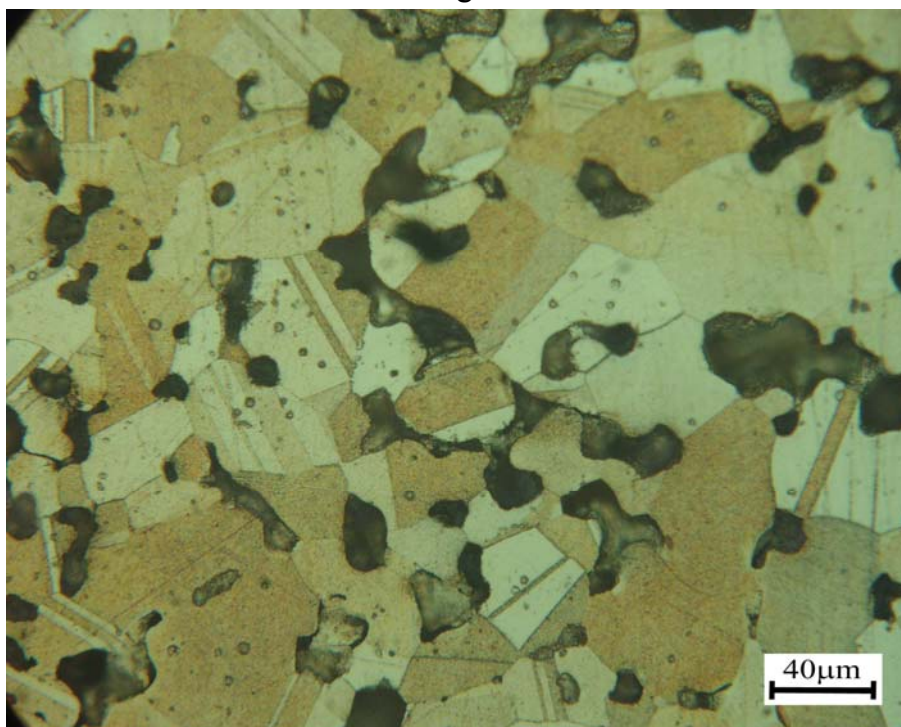
(الف)



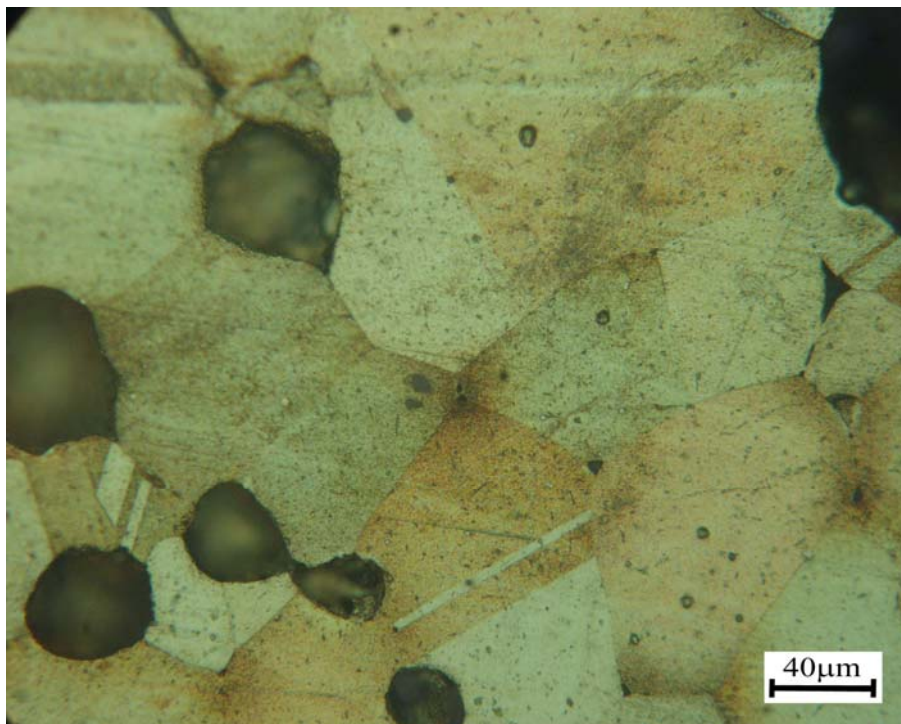
(ب)



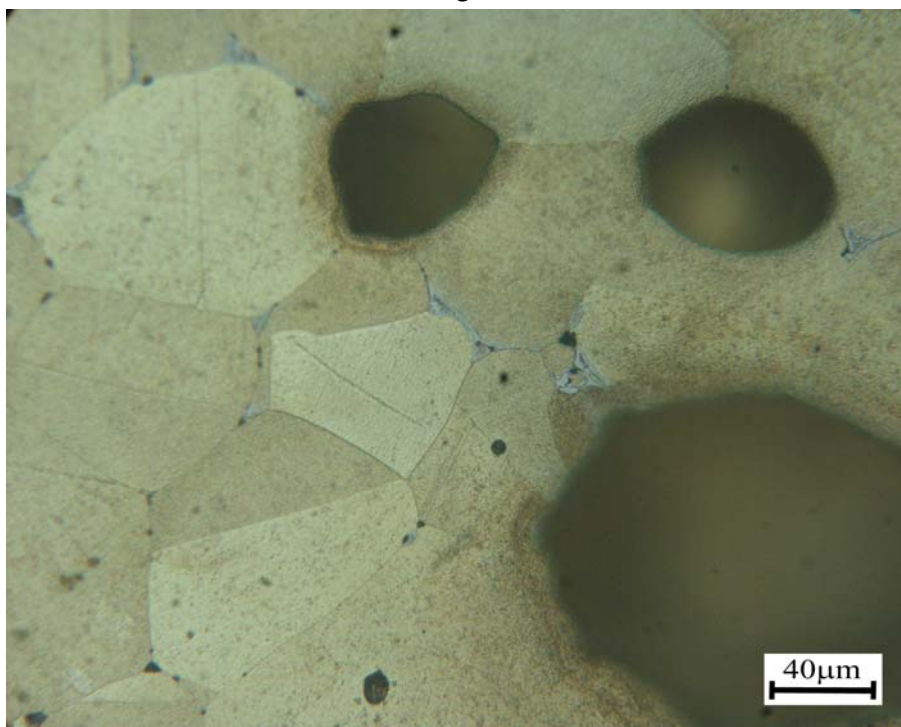
ج



د



(ن)



(و)

شکل ۸- ریزساختار نمونه‌های تفجوشی شده در دما، زمان و اتمسفر تفجوشی گوناگون. الف) 850°C و ۱۵ دقیقه، اتمسفر N_2 ب) 875°C و ۳۸ دقیقه، اتمسفر N_2 ج) 900°C و ۶۰ دقیقه، اتمسفر N_2 د) 850°C و ۱۵ دقیقه، اتمسفر Ar ن) 875°C و ۳۸ دقیقه، اتمسفر Ar و) 900°C و ۶۰ دقیقه، اتمسفر Ar