E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 9, Number 1, 2023



Modeling of stir zone grain size variation in the friction stir processed Al-2024 according to the FSP parameters

A. Lalpour[1], M. Mosallaee[1*], A. Ashrafi[2]

1- Material Science group, Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.
2- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Received 29 January 2023 ; Accepted 12 April 2023

Abstract

In the present study, friction stir processing (FSP) technique was carried out on the AA2024 sheet at different traverse speed (63 to 250 mm/min) and rotation speed (315 to 800 rpm). The temperature and grain size of stirred zone (SZ) were measured and their relationship was analyzed and effect of FSP parameters on the grain size of SZ was determined. Experiment and analytical investigations revealed that SZ grain size complies the exponential temperature-dependent relationship and can be defined the mathematical equation. Calculations indicate that a change in operational variables (rotation and traverse speeds) makes no variation in strain rate, and it is constant.

Keywords: Friction Stir Processing (FSP), Zener-Hollomon, Aluminum Alloy 2024, grain size.

*Corresponding Author: mosal@yazd.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.05]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال نهم، شماره1، بهار و تابستان 1402



مدل‌سازی تغییرات اندازه دانه منطقه اغتشاشی در آلیاژ آلومینیم 2024 برحسب پارامترهای اجرایی فرایند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی

عبدالله لعل‌پور[1]، مسعود مصلایی‌پور[*1]، علی اشرفی[2]

1- دانشکده مهندسی مواد و معدن، پردیس فنی، دانشگاه یزد.

2- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

دریافت مقاله: 1401/11/09 ؛ پذیرش مقاله: 1402/01/23

چکیده

فرایند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی بر صفحات آلومینیوم آلیاژی 2024 در گستره نسبتا وسیعی از سرعت پیشروی(25 الی 63 میلی‌متر بر دقیقه) و سرعت چرخش(315 الی 800 دور بر دقیقه) انجام شد. تغیرات دمایی و اندازه دانه در منطقه اغتشاشی اندازه‌گیری و تعیین گردید و ارتباط بین اندازه دانه و دمای منطقه اغتشاشی مورد تحلیل و بررسی واقع شد. بررسی‌های انجام شده آشکار نمود که پارامترهای فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر میزان حرارت ایجاد در منطقه اغتشاشی تاثیر و موجب تغییرات اندازه دانه در این ناحیه مطابق با رابطه زنر- هالومن می‌شود. بررسی‌های انجام شده نشان داد که تغییرات اندازه دانه به متغیرهای اجرایی فرایند اصطکاکی اغتشاشی مرتبط می‌باشد و می‌توان این وابستگی را به صورت رابطه ریاضی نشان داد. همچنین بررسی‌های محاسباتی انجام شده نشان داد که نرخ کرنش اعمال شده حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی مستقل از متغیرهای اجرایی این فرایند است و میزان آن در کل فرایند ثابت است.

کلمات کلیدی: فرایند اصطکاکی اغتشاشی، زنر-هالومن، آلومینیوم آلیاژی 2024 و اندازه دانه.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: mosal@yazd.ac.ir

1- مقدمه

فرایند اصطکاکی اغتشاشی را می‌توان شاخه‌ای از تغییر شکل شدید در نظر گرفت. حین فرایند، مقدار زیادی تغییر شکل ناشی از چرخش نوک و شانه ابزار در منطقه تحت عملیات اصطکاکی اغتشاشی ایجاد می‌شود. اعمال کرنش بیش از 4000 درصد و نرخ کرنش حدود 100 درصد بر ثانیه موجب تغییرات ساختاری شدید و توزیع مجدد اندازه دانه در منطقه اغتشاشی می‌شود [1-3]. ریزساختار منطقه اغتشاشی شامل دانه‌های ریز و هم‌محوری است که در نتیجه استحاله تبلور مجدد دینامیکی ایجاد شده است [3و4]. دانه‌بندی منطقه اغتشاشی به مراتب ریزتر از فلزپایه است. ایجاد اغتشاش همراه با اصطکاک بین شانه ابزار و زیرلایه موجب ایجاد گرمای زیادی در ناحیه عبور ابزار می‌شود. گرما ایجاد شده می‌تواند باعث فعال شدن تبلور مجدد و در ادامه درشت شدن دانه از طریق مکانیزم رشد دانه‌ها

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.05]

شود [5و6]. از این رو تعیین شرایط بهینه برای ایجاد تبلور مجدد و جلوگیری از رشد دانه‌ها بسیار اهمیت دارد. با کنترل متغیرهای اثرگذار مانند سرعت چرخش، سرعت پیشروی و شکل ابزار گرمای ورودی به ناحیه اغتشاشی حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی تغییر می‌کند. با کاهش گرمای ورودی می‌توان مکانیزم رشد دانه ها را کاهش و یا متوقف نمود[7]. تحقیقات زیادی در زمینه تاثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر دمای ایجاد شده در منطقه اغتشاشی آلیاژهای گروه 2000 انجام شده است[8-14]. در مناطقی نظیر منطقه اغتشاشی که سیلان و جابجایی فلز در نتیجه حرکت نوک ابزار اتفاق می‌افتد، اندازه‌گیری مستقیم دما با ترموکوپل ممکن نیست. بنابراین اندازه‌گیری‌های انجام شده دمای اطراف منطقه اغتشاشی ثبت و گزارش می‌شود که قاعدتا دمای در ناحیه درگیری نوک ابزار با قطعه کار بالاتر مقادیر اندازه‌گیری شده است[8]. اربگاست و همکاران [15] اثر متغیرهای فرایند و تاثیر آن بر دمای منطقه اغتشاشی را بررسی کرده و رابطه‌ای را معرفی می‌کنند که هندسه ابزار و سرعت پیشروی و سرعت چرخش ابزار بر دمای تولیدی ارتباط داده شده است (رابطه1).

$$T/T_m = K(\omega^2/v \times 10^4)^{\alpha} \quad (1)$$

در این رابطه، α برابر 0/04 تا 0/06 بوده و مقدار ثابت K بین 0/65 و 0/75 است. Tm دمای ذوب آلیاژ بر حسب درجه سانتی‌گراد ، ω سرعت چرخش ابزار برحسب دور بر دقیقه و v سرعت پیشروی برحسب اینچ بر دقیقه است. با افزایش سرعت پیشروی، چگالی انرژی منتقل شده به سطح کاهش می‌یابد. ثابت بودن توان ورودی با افزایش سرعت پیشروی موجب می‌گردد که چگالی انرژی انتقال یافته به منطقه اغتشاشی با افزایش سرعت پیشروی کاهش یابد[16]. لذا با تغییر سرعت پیشروی ابزار می توان سیلان ایجاد شده را کنترل نمود [17]. با افزایش سرعت چرخش ابزار تا حد بحرانی، دمای منطقه اغتشاشی افزایش می‌یابد. افزایش بیشتر سرعت چرخش ابزار تاثیری بر افزایش دمای منطقه اغتشاشی ندارد [16]. فرایند اصطکاکی اغتشاشی را می‌توان در اتصال غیر همجنس آلیاژهای مختلف و همچنین کامپوزیت‌سازی سطحی به خدمت گرفت [18-20].

نظر به اهمیت تاثیر متغیرهای اجرایی فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر اندازه دانه و ریزساختار نهایی منطقه فرآوری؛ در این تحقیق سعی بر آن است که با تغیر متغیرهای اجرایی (سرعت پیشروی و سرعت چرخش ابزار) تغییرات ایجاد شده در ریزساختار بررسی و تحلیل شود. همچنین با استفاده از رابطه‌های ریاضی معرفی شده توسط محققان دیگر، رابطه ریاضی جهت پیش بینی اندازه دانه ارائه گردد.

2- مواد و روش پژوهش

در این پژوهش از صفحات آلیاژ آلومینیم 2024 با مشخصه فنی ASM QQ-A-250/4 و ضخامت3 میلی‌متر به عنوان زیرلایه استفاده شد. صفحات در ابعاد 15×30 سانتی متر برش و برای از بین بردن اثر آلودگی‌های سطحی و بخصوص چربی، ابتدا با محلول متیل اتیل کتون شستشو و آلودگی‌های سطحی حذف گردید.

ابزار مورد نظر برای انجام عملیات اصطکاکی اغتشاشی از جنس فولاد سردکار استحکام بالا با مشخصه فنی D5 به قطر 25 میلی‌متر انتخاب شد. شکل پین استوانه ساده با قطر 4 میلی‌متر و ارتفاع پین 2 میلی‌متر است. عملیات اصطکاکی اغتشاشی توسط دستگاه فرز سه محور انجام شد. در هر مرحله انجام فرایند سرعت پیشروی، سرعت چرخش ابزار و دمای منطقه اغتشاشی ثبت گردید. به منظور اندازه‌گیری دما، در زیر منطقه اغتشاشی ترموکوپل‌هایی نصب شد و سیکل حرارتی ایجاد شده در منطقه اغتشاشی ثبت گردید. بیشترین دمای ثبت شده به عنوان دمای منطقه اغتشاشی لحاظ گردید. از آنجایی که ضخامت ورق 3 میلی‌متر است؛ می‌توان فرض نمود که از اختلاف دمای مابین سطح فوقانی و تحتانی صفحات زیر لایه چندان نمی‌باشد. حداکثر اختلاف دما بین سطح فوقانی و تحتانی صفحات آلومینیوم گروه 2000 را کمتر از 10 درجه سانتی‌گراد گزارش شده است [21]. لذا برای گزارش دمای منطقه اغتشاشی، به دماهای ثبت شده مقدار 10 درجه سانتی‌گراد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.05]

اضافه و به عنوان دمای منطقه اغتشاشی گزارش گردید. بعد از انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی، سطح مقطع نمونه‌ها برای بررسی ریزساختار برش و آماده سازی شدند. سمباده‌زنی تا سمباده 2400 انجام شد. جهت انجام پولیش و حکاکی شیمیایی دو روش پولیش مکانیکی و اچ شیمیایی و روش الکتروپولیش و الکترواچ انجام شد.

در روش پولیش مکانیکی سطح با آلومینای 0/02 میکرون پرداخت شد. سپس نمونه‌ها با محلول کلر حکاکی شیمیایی گردید. در روش الکتروپولیش و الکترواچ از محلول 30% اسید نیتریک رقیق شده با متانول استفاده شد. ولتاژ اعمالی 5 ولت و زمان 120 ثانیه اجرا شد. دمای محلول حین فرایند بین 15- الی 20- درجه سانتی‌گراد است. بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری Epiphot-300 Nikon صورت پذیرفت.

3-نتایج و بحث

شکل(1) ریزساختار منطقه اغتشاشی برحسب پارامترهای مختلف را نشان می‌دهد. در جدول(1) متغیرهای عملیاتی فرایند و شرایط دمایی و اندازه دانه منطقه اغتشاشی گزارش شده است. همانگونه که از شکل و جدول فوق برداشت می‌شود، افزایش سرعت چرخش ابزار درشت شدن اندازه دانه را به همراه دارد. بعلاوه شکل(1) نشان می‌دهد که با افزایش سرعت پیشروی ابزار اندازه دانه کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. با انتخاب متغیرهای K و $\propto$ در معادله1 به صورت سعی و خطا و برازش بهترین هم پوشانی، معادله 2 بازنویسی شد.

$$T = 446.6\left(\frac{\omega^2}{v \times 10^4}\right)^{0.06} \quad (2)$$

بررسی‌های انجام شده نشان داد که دمای محاسبه شده با دمای اندازه‌گیری شده در اغتشاشی انطباق نسبتا خوبی دارد و می‌توان به کمک رابطه(2) پیش‌بینی بسیار خوبی از دمای منطقه اغتشاشی داشت.

تحقیقات نشان می‌دهد که فرایند اصطکاکی اغتشاشی، گرما و تغییر شکل زیادی در منطقه اغتشاشی ایجاد می‌کند و ریزساختار نهایی وابسته به این تغییرات است. همچنین معادلاتی ارائه شده است که وابستگی نرخ کرنش و دما را با اندازه دانه بیان می‌کنند[22]. بر اساس تئوری تغییر شکل پلاستیکی دمای بالا رابطه بین پارامتر زنر-هالومن، دما و نرخ کرنش به شکل رابطه (3) بیان می شود:

$$Z = \dot{\varepsilon}\exp(Q/RT) \quad (3)$$

که $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش، Q انرژی فعال‌سازی، R ثابت گازها و T دما است. همچنین حیدرزاده و همکاران[23] نشان دادند که پارمتر Z رابطه معکوس با اندازه دانه دارد که می توان به صورت رابطه 4 مشاهده کرد:

$$d = A \times Z^b \quad (4)$$

در این رابطه d اندازه دانه، A و b ثوابت رابطه می باشند. ثابت b منفی است بنابراین کم شدن Z موجب بزرگ‌تر شدن اندازه دانه می‌شود. با جایگذاری رابطه3 در رابطه(4)، رابطه (5) بدست می آید.

$$d = A \times (\dot{\varepsilon}\exp(Q/RT))^b \quad (5)$$

در نهایت رابطه (5) را می‌توان به صورت رابطه6 ساده سازی کرد:

$$d = A \times (\dot{\varepsilon}\exp(Q/RT))^b \quad (6)$$

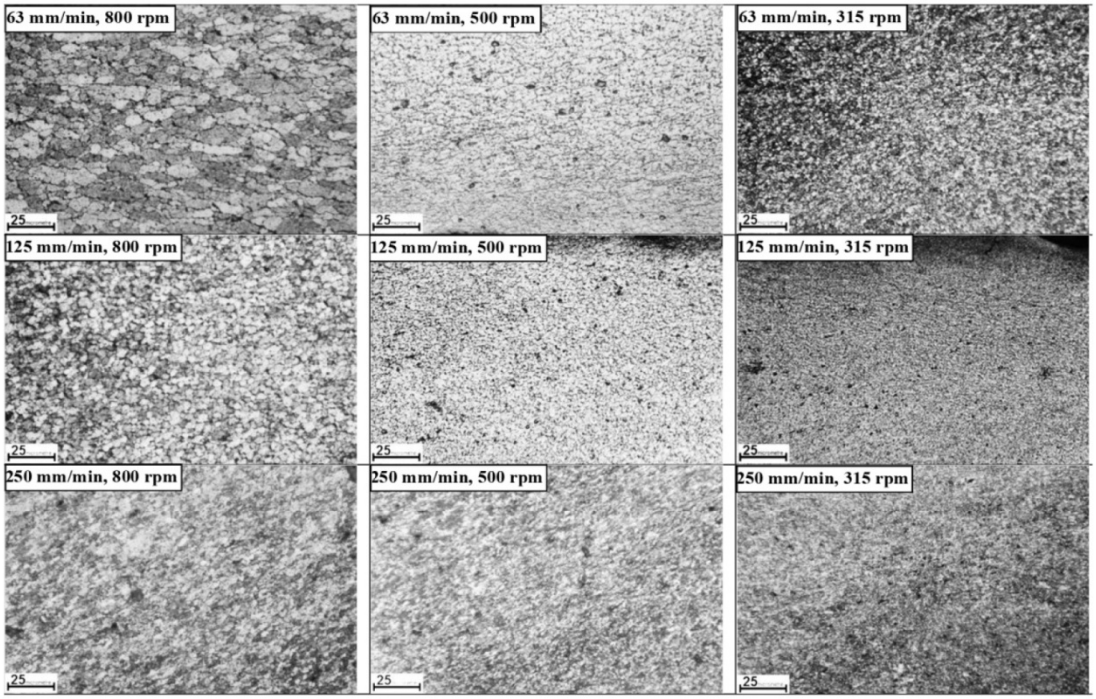
در شکل(2) نمودار Ln d بر حسب 1/T رسم شده است. با برازش نقاط نمودار و تعیین بهترین معادله خط حاصل از نقاط برای تحقیق فوق مشخص است که معادله خط برازش شده با رابطه (6) هم‌خوانی دارد و می‌توان به صورت رابطه (7) بازنویسی کرد.

$$Ln\, d = Ln\, A\dot{\varepsilon}^b + bQ/RT \quad (7)$$

با داشتن اندازه دانه و دمای منطقه اغتشاشی می‌توان انطباق‌پذیری رابطه (6) را برای دیگر آلیاژهای آلومینیوم بررسی کرد. شکل(2) نشان می‌دهد که آلیاژهای آلومینیوم رفتار مشابهی دارند و می‌توان ثوابت رابطه(6) را محاسبه کرد. در تحقیق حاضر عرض از مبدا رابطه (7) برابر عدد ثابت 14/694 است. از آنجایی که ثوابت A و b در رابطه 6 تغییر ناپذیر هستند پس

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.05]



شکل1- ریزساختار منطقه اغتشاشی در متغیرهای اجرایی مختلف فرایند اصطکاکی اغتشاشی.

جدول1-تاثیر پارامترهای فرایند FSP بر حداکثر دمای و اندازه دانه منطقه اغتشاشی.

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
$\omega\ (rpm)$	۳۱۵	۵۰۰	۸۰۰	۳۱۵	۵۰۰	۸۰۰	۳۱۵	۵۰۰	۸۰۰
$v\ (mm/min)$	۶۳	۶۳	۶۳	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰
$T_{measure}$ (°C)	۴۰۵	۴۴۸	۴۷۳	۳۸۰	۴۲۰	۴۵۱	۳۷۴	۳۹۰	۴۲۵
$T_{calculate}$ (°C)	۴۰۰	۴۲۳	۴۴۷	۳۸۳	۴۰۵	۴۲۹	۳۶۸	۳۸۹	۴۱۲
$Grain\ Size\ (\mu m)$	۴/۲	۷/۵	۱۳/۱	۲/۹	۵	۸/۷	۱/۹	۳/۳	۵/۸

می‌توان نتیجه گرفت که نرخ کرنش در متغیرهای اجرایی مختلف ثابت است. بررسی‌های وو و همکاران[22] نیز ثابت بودن نرخ کرنش با تغییر پارامترهای اجرایی را گزارش کردند که با نتیجه حاصل از تحقیق حاضر، همخوانی دارد.

وابستگی اندازه دانه با دمای منطقه اغتشاشی در رابطه (7) نشان داده شد. همچنین رابطه (2) وابستگی دمای منطقه اغتشاشی با متغیرهای اجرایی فرایند در رابطه(2) تعریف شد. با جایگذاری رابطه(2) در رابطه (7) اندازه دانه نهایی بر حسب متغیرهای اجرایی حاصل می‌شود که می‌توان به صورت رابطه 8 بازنویسی کرد.

$$Ln\ d = 14.694 - 20.27\left(\frac{1}{(\omega^2/v \times 10^4)^{0.06} + 0.611}\right) \quad (8)$$

جدول(2) اندازه دانه محاسبه شده از رابطه (8) و اندازه دانه اندازه‌گیری شده گزارش می‌کند.

با توجه به برازش نقاط در شکل(2) برای آلیاژهای مختلف این حقیقت آشکار است که می‌توان به طور کلی تاثیر متغیرهای اجرایی بر اندازه دانه نهایی را به شکل رابطه(9) بیان کرد.

$$Ln\ d = \ln(A\dot{\varepsilon}^b) + \frac{bQ}{KRT_m}\left(\frac{1}{(\omega^2/v \times 10^4)^{\alpha} + \frac{273}{KT_m}}\right) \quad (9)$$

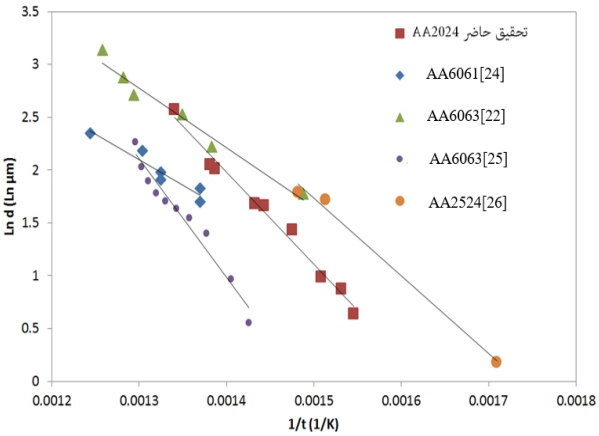
با بررسی اندازه دانه گزارش شده و اندازه دانه محاسبه شده مشخص است که پیش‌بینی خوبی از اندازه دانه منطقه اغتشاشی می‌توان داشت. اما باید توجه نمود که با افزایش سرعت چرخش ابزار، برآورد اندازه دانه محاسبه شده بیشتر از اندازه دانه واقعی است. نمونه شماره 3 در جدول(2) نشان می‌دهد که اندازه دانه محاسبه شده بیشتر از اندازه دانه واقعی است. محاسبات عددی آرورا و همکاران [16] نشان می‌دهد که با افزایش سرعت چرخش ابزار میزان گشتاور اعمال شده به منطقه اغتشاشی با داده‌های اندازه‌گیری شده اختلاف پیدا

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.05]

جدول2- اندازه دانه محاسبه شده از رابطه (8) و اندازه دانه اندازه گیری شده در منطقه اغتشاشی.

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
$\omega\ (rpm)$	۳۱۵	۵۰۰	۸۰۰	۳۱۵	۵۰۰	۸۰۰	۳۱۵	۵۰۰	۸۰۰
$v\ (mm/min)$	۶۳	۶۳	۶۳	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰
$GS_{calculate}\ (\mu m)$	۳/۴۳	۵/۳۴	۸/۳۲	۲/۴۷	۳/۸۵	۶/۰۳	۱/۷۶	۲/۷۶	۴/۳۳
$GS_{measure}\ (\mu m)$	۴/۲	۷/۵	۱۵/۵	۲/۴	۵/۳	۷/۸	۲	۲/۷	۵/۴

می‌کند. یان و همکاران[26] نشان داد که افزایش سرعت چرخش از حد بحرانی پیش بینی اندازه دانه را دچار اشکال می‌کند. این درحالی است که در سرعت‌های چرخش کمتر از حد بحرانی، اندازه دانه را با تخمین خوبی می‌توان محاسبه نمود.



شکل2- نمودار تغییرات نمایی اندازه دانه (Ln d) بر حسب معکوس دما (T/1) بر حسب درجه کلوین.

4- نتیجه‌گیری

- با کنترل پارامترهای اجرایی از قبیل سرعت چرخش و سرعت پیشروی می‌توان اندازه دانه منطقه اغتشاشی را کنترل کرد. تغییرات اندازه دانه و دمای منطقه اغتشاشی همسوی یکدیگر است و پارامتر زنر- هالومان بر آن صادق است.

- اندازه دانه منطقه اغتشاشی وابسته به دمای ایجاد شده است. لذا با کنترل دما، می‌توان مکانیزم رشد دانه را کنترل کرد و اندازه دانه نهایی را تعیین کرد.

- به کمک روابط ریاضی می‌توان اندازه دانه منطقه اغتشاشی را در سرعت پیشروی و سرعت چرخش مختلف تخمین زد. اساس رابطه ارائه شده بر مبنای تئوری تغییر شکل پلاستیکی دمای بالا است.

- محاسبات نشان می‌دهد نرخ کرنش با تغییر پارامترهای اجرایی(سرعت چرخش و پیشروی) تغییر نمی‌کند و ثابت است.

- با افزایش سرعت چرخش ابزار از حالت بحرانی، فرمول ارائه شده برای تخمین اندازه دانه دچار خطا می‌شود. لذا تعیین حد بحرانی سرعت چرخش در تخمین اندازه دانه مهم است.

منابع

1-A. Dutta, I. Charit, L. B. Johannes, R. S. Mishra, Deep cup forming by superplastic punch tretching of friction stir processed 7075 Al alloy, Mate. Sci. Eng. A 395 (2005) 173–179.

2-J.Q.Su, T.W.Nelson and C.J.Sterling, Microstructure evolution during FSW/FSP of highstrength aluminum alloys, Materials Science and Engineering A 405 (2005) 277–286.

3-J.Q. Su, T.W. Nelson, and C.J. Sterling, Friction stir processing of large-area bulk UFG aluminum alloys, Scripta Mater, 52(2005)135–140.

4-T. Srinivasa Rao, G. Madhusudhan Reddy, S. R. Koteswara Rao, Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA7075−T651 aluminum alloy thick plates, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 25 (2015) 1770−1778.

5-R. S. Mishra, M. W. Mahoney, Friction Stir Processing: A New Grain Refinement Technique in Commercial Alloys, Materials Science Forum, 357-359 (2001) 507-514.

6-P. Cavaliere and A. Squillace, High temperature deformation of friction stir processed 7075 aluminium alloy, Materials Characterization 55 (2005) 136– 142.

7-C. B. Smith, R. S. Mishra, Friction Stir Processing for Enhanced Low Temperature Formability, 1st Ed., Elsevier, United Kingdom, (2014) 7-12.

8-R. S. Mishra, Friction Stir Welding of 2XXX Aluminum Alloys Including Al-Li Alloys, Butterworth-Heinemann, 2017.

9-P.A. Colegrove, H.R. Shercliff, R. Zettler, Model for predicting heat generation and temperature in friction stir welding from the material properties, Sci. Technol. Weld. Joining 12 (2007) 284-297.

10-Y. Chen, J. Feng, H. Liu, Precipitate evolution in friction stir welding of 2219-T6 aluminum alloys, Mater. Charact 60 (2009) 476-481.

11-A. Shukla, W. Baeslack, Study of process/structure/property relationships in friction stir welded thin sheet AlCuLi alloy, Sci. Technol. Weld. Joining 14 (2009) 376-387.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.05]

12-A. Shukla, Friction stir welding of thin-sheet, age-hardenable aluminum alloys: a study of process/structure/property relationships, ProQuest Dissertations and Theses (2007).

13-B. Yang, J. Yan, M.A. Sutton, A.P. Reynolds, Banded microstructure in AA2024-T351 and AA2524-T351 aluminum friction stir welds: Part I. Metallurgical studies, Mater. Sci. Eng. A 364 (2004) 55-65.

14-M. Mohammadtaheri, M. Haddad-Sabzevar, M. Mazinani, E.B. Motlagh, The effect of base metal conditions on the final microstructure and hardness of 2024 aluminum alloy friction-stir welds, Metall. Mater. Trans. B 44 (2013) 738-743.

15-W.J.Arbegast and P.J.Hartley, Friction stir weld technology development at lokheed martin michoud space systems-an overview, Proceeding of the fifth international conference on trends in welding research, Pine Mountain GA (1998) 54-60.

16-A. Arora, R. Nandan, A.P. Reynoldsb, T. DebRoy, Torque, power requirement and stir zone geometry in friction stir welding through modeling and experiments, Scripta Materialia 60 (2009) 13–16.

17-رامین دلیر نظرلو، فراز امید بخش، جواد ملایی میلانی، بررسی اثر سرعت دورانی ابزار بر فرایند انتقال مواد در جوشکاری اصطکاکی اغتشای آلومینیوم خالص، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره1، صفحه 9-17.

18-بهزاد صادقیان، مسعود عطاپور، ابوذر طاهری زاده، شبیه سازی سیلان لاستیک و مورفولوژی اتصال در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی غیر مشابه فولاد زنگ نزن به آلیاژ آلومینیوم، علوم و فنون جوشکاری ایران، سال اول، شماره1، صفحه 24-37.

19-مجتبی صادقی گوغری، مسعود شعبانی، ابراهیم میرزاپور، مسعود کثیری، کامران امینی، جوشکاری همزن اصطکاکی اتصال غیرهم‌جنس آلیاژ آلومینیوم 5083 و تیتانیوم خالص تجاری، علوم و فنون جوشکاری ایران، سال دوم، شماره1، صفحه 49-56.

20-مجید بلباسی، مهرداد رضایی، اثر هندسه ابزار بر خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم 6061- آلومینا ایجاد شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، علوم و فنون جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره2، صفحه 77-88.

21-J. Wang, K. Yang, Y. Zhang, Y.L. Lu, Z. Bai, X.C. Li, Investigation on variations of microstructures and mechanical properties along thickness direction of friction stir processed AA2014 aluminum alloy via ultra-rapid cooling, Materials Characterization 179 (2021) 111352.

22-Y. F. Wu, J. Yu, Z. Yang, Y. L. Deng, Study of grain distribution during friction stir welding of Al-Zn-Mg alloys using numerical simulation, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 668 (2019) 012022.

23-A. Heidarzadeh, T. Saeid, Correlation between process parameters, grain size and hardness of friction-stir-welded Cu-Zn alloys, Rare Metals37 (2016) 388-98.

24-W. M. Syafiq, M. Afendi, M. N. Mazlee, Effect of FSW Parameters on Temperature Profile and Grain Size of AA6061-T6 and S275JR Mild Steel FSW Joint, AIP Conf. Proc.: Proceedings of Green Design and Manufacture (2020) 020082.

25-Y. S. Sato, M. Urata, H. Kokawa, Parameters Controlling Microstructure and Hardness during Friction-Stir Welding of Precipitation-Hardenable Aluminum Alloy 6063, Metallur. and Mat. Trans. A 33 (2002) 625-635.

26-J. Yan, M. A. Sutton, and A. P. Reynolds, Process–structure–property relationships for nugget and heat affected zone regions of AA2524–T351 friction stir welds, Sci. Technol. Weld. Join. 10 No. 6 (2005) 725–736.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.05]