



## Processing MMC Tubes Via Friction Stir Backward Extrusion

Roham Broomand<sup>1</sup>, Alireza Babaei<sup>2\*</sup>, Hadi Mazloom Bashiri<sup>3</sup>, Mohammad Hasan Zaheri<sup>4</sup>

<sup>1</sup>MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Sapienza University of Rome, Rome, Italy.

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>3,4</sup>Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

**Received:** 06.12.2021

**Revised:** 09.03.2021

**Accepted:** 09.26.2021

**Keyword:**

MMC tube

Friction stir back extrusion

Powder

Hardness

Tensile test

**\*Corresponding Author:**

Alireza Babaei

**Email:** [alza.babaei@gmail.com](mailto:alza.babaei@gmail.com)

### ABSTRACT

In the present study, the feasibility of processing of MMC tubes via friction stir backward extrusion (FSBE) technique was investigated. In this regard, an aluminum alloy 1100 bar was utilized as initial raw material. In the FSBE method, the initial material is placed inside a chamber and a rotating punch is fed downward penetrating into the material softened due to the generated frictional heat. Consequently, the material is back extruded around the punch and a cylindrical tube is formed. In order to compare the results, first, a tubular specimen was produced by the FSBE method. Then, several through holes with 1.5 mm diameter were drilled by a super drill machine. These holes were filled with SS 316 powder having micrometric dimensions. The prepared specimens were processed via FSBE technique and MMC tubes were successfully produced. The distribution of powder particles was investigated by metallographic observations. Furthermore, the mechanical properties of the processed tubes were documented by Vickers hardness measurements and tensile tests. The comparison of the results demonstrates that the MMC tubes have higher strength and lower ductility. The material deformation behavior during FSBE was simulated by a coupled structural-thermal model via DEFORM finite element software.



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Ultrafine-grained materials demonstrate unique physical and mechanical properties, which has attracted the attention of many researchers for processing these materials with various methods of severe plastic deformation (SPD). The most important challenge of material processing using SPD methods is a significant reduction in the elongation of ultrafine-grained materials. On the other hand, to the best of our knowledge, friction stir processing is the only method of SPD in which dynamic recrystallization in the presence of frictional heat causes the formation of an ultrafine-grained material with good ductility. In this study, for the first time, the feasibility of processing metal matrix composite (MMC) tubes was studied using the friction stir backward extrusion technique as described below. 1100 aluminum tubes were successfully processed and the mechanical properties and hardness of the samples compared with the raw material as well as with the aluminum MMC tubes processed by the friction stir backward extrusion method. The friction stir backward extrusion process was also simulated via a structural-thermal coupled model by DEFORM finite element software.

### Methodology

#### *Principles of friction stir backward extrusion*

In the friction stir backward extrusion process, the raw material is placed inside a cylindrical chamber (mold). Then, a rotating mandrel gradually approaches the surface of the workpiece and the frictional contact between them generates the necessary initial heat and causes softening of the material surface for easier penetration of the mandrel. The metal mandrel then advances into the raw material as it rotates and the heat-softened material is extruded backwardly between the mandrel and the chamber wall (Figure 1). It should be noted that a bush is also often used to properly guide the mandrel into the raw material. Figure 2 (a) shows the experimental setup of the friction stir backward extrusion process.

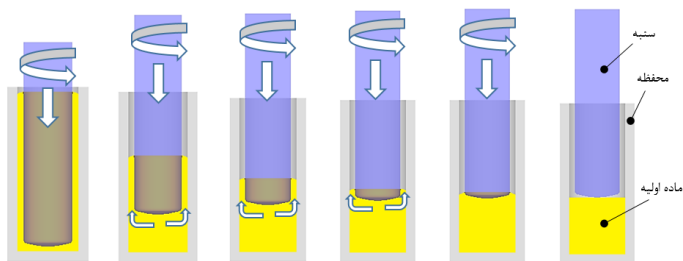


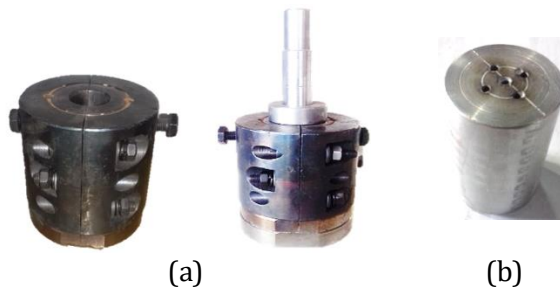
Figure 1. Schematic illustration of friction stir backward extrusion process

In this research, five through holes with a diameter of 1.5 mm were drilled on the aluminum sample by super drilling method as can be seen in Figure 2 (b). These holes were filled with 316 stainless steel metal powder with an average particle size of 3 micrometers. During the friction stir backward extrusion process, the powder inside the holes was in contact with the forehead of the rotating mandrel and mixed with the aluminum base metal

due to the stirring motion of the mandrel and backward extruded to form the MMC tube. Numerous experiments with different parameters of the rotating speed and feed rate of the mandrel were performed as listed in Table 1. Finally, with a rotational speed of 1600 rpm and a feed rate of 3 mm/min, the composite tube was successfully processed (Figure 5 (b)).

**Table 1. Parameters used in the experiments and the obtained results**

Experiments	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
Rotational Speed (RPM)	250	450	800	1200	1200	1600	1600
Feed (mm/min)	2	2	2	3	3	3	3
Powder	x	x	x	x	✓	x	✓
Result	Not successful	Not successful	Not successful	Not successful	Not successful	Successful	Successful



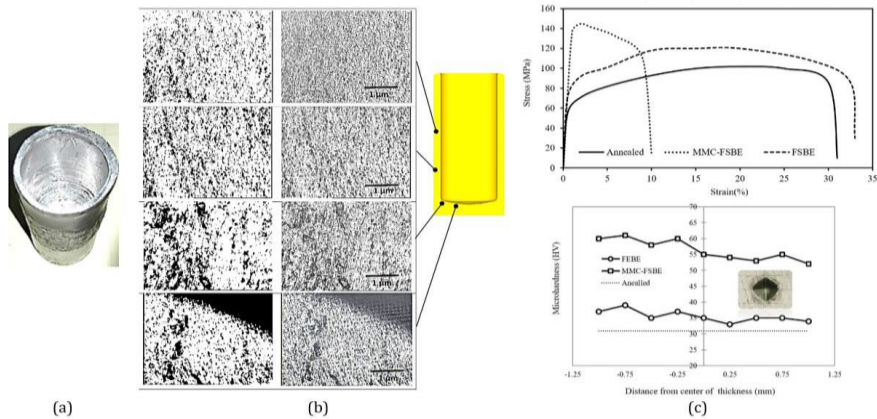
**Figure 2. (a) the experimental setup (b) the processing sample**

### **FEM modeling**

In order to study the deformation behavior of the material in the friction stir backward extrusion method, the process was simulated as an axial symmetry coupled structural-thermal model by DEFORM. In this model, the dimensions of the tools and sample were considered the same as the experimental ones. The mold components including the chamber and the mandrel were considered as rigid bodies and the aluminum sample was considered as a deformable material with viscoplastic properties. Due to the nature of the process, the material flow stress was considered as a function of temperature and strain rate and the thermal properties of the material and mold as a function of temperature which is available in the software library.

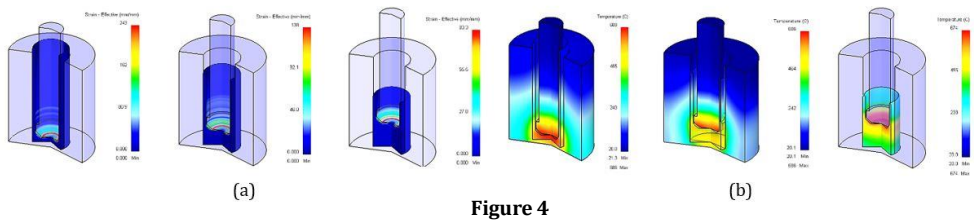
### **Results and discussion**

The processed MMC tube via the friction stir backward extrusion process is depicted in Figure 3 (a). A good dispersion of the powder in the microstructure of the processed tube is documented Figure 3 (b). Figure 3 (c) shows the comparison results of the mechanical properties of the initial, friction stir backward extruded aluminum and MMC tubes. The results demonstrated that although the MMC tube had the lowest ductility, its yield, tensile strengths and hardness were notably increased.



**Figure 3. (a) the processed MMC tube (b) the microstructure of the processed MMC tube (c) mechanical properties of the initial and processed samples**

The plastic strain and temperature distribution counter are respectively shown in Figures 4 (a) and (b).



**Figure 4**

**Conclusion**

In this research, the friction stir backward extrusion method was used for processing metal-based composite tubes. The deformation behavior of the material in the friction stir backward extrusion method was simulated by DEFORM finite element software with a structural-thermal coupled model.

The achievements of the present study can be summarized as follows:

- Samples of aluminum tubes and composite tubes were successfully processed.
- Metallographic images from different areas of the processed MMC tube showed the non-uniform distribution of powder particles in the matrix, but the dispersion of particles in the base metal had an acceptable distribution.
- Tensile test results showed an increase of approximately 22% in the strength of the composite tube compared to the aluminum tube.
- The results of the Vickers microhardness test show a significant increase of approximately 57% in the hardness of the composite tube compared to the aluminum one.
- Numerical simulation results indicate the existence of two important factors of imposing severe plastic strain on the material in the forehead of the mandrel and increase in the temperature of the material to the range of 500-600 °C for mixing the powder in the base metal.



## فراوری لوله‌های کامپوزیتی پایه فلزی با استفاده از روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی

رهام برومند<sup>۱</sup>، علیرضا بابایی<sup>۲\*</sup>، هادی مظلوم بشیری<sup>۳</sup>، محمدحسن ظاهری<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه ساینز ارم، رم، ایتالیا.
- ۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۳ و ۴- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در تحقیق حاضر فراوری لوله‌های کامپوزیتی پایه فلزی با استفاده از روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی امکان‌سنجی گردید. بدین منظور میلگرد از جنس آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ به‌عنوان ماده خام اولیه استفاده شد. در فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی، ماده اولیه درون یک محفظه قرار گرفت و سنبه با حرکت توأمان چرخشی و رو به پایین، به درون ماده نفوذ کرد و حرارت ناشی از اصطکاک باعث نرم شدن قطعه شد؛ در نتیجه ماده به دور سنبه به‌صورت رو به بالا اکستروژد شده (اکستروژن معکوس) و قطعه لوله‌ای شکل گرفت. به‌منظور فراهم کردن امکان مقایسه نتایج، ابتدا یک نمونه لوله‌ای توسط روش مذکور تولید شد. در ادامه روی ماده خام آلومینیومی با استفاده از دستگاه سوپر دریل چند عدد سوراخ راه به در قطر ۱/۵ میلی‌متر ایجاد شد و این سوراخ‌ها با پودر فلز استیل ۳۱۶ با ابعاد میکرون پر شد. نمونه آماده شده تحت عملیات اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفت و نمونه لوله‌ای کامپوزیتی تولید شد. نحوه توزیع پودر در زمینه آلومینیومی توسط تصاویر متالوگرافی بررسی گردید. همچنین، روی نمونه‌های لوله‌ای تولید شده آزمون سختی‌سنجی با روش ویکرز و آزمون کشش ساده به‌عمل آمد و نتایج به‌دست‌آمده مقایسه شدند. نتایج حاصل، گویای افزایش چشمگیر استحکام لوله کامپوزیتی و کاهش انعطاف‌پذیری آن در مقایسه با لوله آلومینیومی است. برای بررسی هرچه بهتر رفتار تغییر شکل ماده در روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی، فرایند مذکور به‌صورت یک مدل کوپل سازه‌ای-حرارتی توسط نرم‌افزار اجزای محدود DEFORM مدل‌سازی شد.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۰۴

### کلید واژگان:

لوله کامپوزیتی پایه فلزی  
اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی  
پودر  
سختی‌سنجی  
آزمون کشش

\*نویسنده مسئول: علیرضا بابایی  
پست الکترونیکی:  
[alza.babaei@gmail.com](mailto:alza.babaei@gmail.com)



## مقدمه

مواد فوق‌ریزدانه<sup>۱</sup> خواص فیزیکی و مکانیکی منحصر به فردی را از خود نشان می‌دهند [۱] که این امر موجب جلب توجه بسیاری از محققان برای فراوری این مواد با روش‌های مختلف تغییر شکل پلاستیکی شدید شده است. مهم‌ترین معضل فراوری مواد با استفاده از روش تغییر شکل پلاستیکی شدید، کاهش قابل توجه انعطاف‌پذیری مواد فوق‌ریزدانه می‌باشد [۲]. از طرف دیگر، تا جایی که نگارندگان اطلاع دارند، فراوری به روش اصطکاکی اغتشاشی<sup>۲</sup> تنها روش تغییر شکل پلاستیکی شدید است که در آن تبلور مجدد دینامیکی [۳] در حضور حرارت حاصل از اصطکاک باعث شکل‌گیری ماده فوق‌ریزدانه با انعطاف‌پذیری خوب و قابل قبول [۴] می‌گردد. با توجه به این ویژگی منحصر به فرد روش اصطکاکی اغتشاشی، ابو فرح [۵] فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی<sup>۳</sup> را به‌عنوان روشی جدید برای فراوری لوله‌های با ریزساختار فوق‌ریزدانه معرفی کرد. در کنار انعطاف‌پذیری خوب ماده فراوری شده، به دلیل حرارت ایجاد شده ناشی از اصطکاک در ناحیه تغییر شکل، فرایند تغییر شکل با نیروی به‌مراتب کمتری در مقایسه با سایر روش‌های تغییر شکل پلاستیکی شدید انجام می‌گیرد. پس از ارائه ایده این نوع فراوری لوله فوق‌ریزدانه، چندین تحقیق در زمینه این فرایند جدید صورت گرفته است. موحدی و خرم [۶] لوله‌های آلومینیومی را با این روش تولید کردند و خواص مکانیکی لوله‌های فراوری شده و همچنین تحول ریزساختاری در آن‌ها را بررسی کردند. متیو و همکارانش [۷] لوله‌های بدون درز از جنس آلومینیوم T6-۶۰۶۱ را با روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی فراوری کردند. خان بیگی و همکارانش [۸] فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی را تغییر دادند و فرایند اکستروژن معکوس لوله اصطکاکی اغتشاشی<sup>۴</sup> را معرفی کردند. بویا و همکارانش [۹] بازیابی آلیاژ منیزیم AZ31 توسط فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی را مطالعه کردند. بافاری و همکارانش [۱۰] اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی براده‌های آلیاژهای منیزیم را به‌صورت عددی و تجربی بررسی کردند. تولید سیم از براده‌های آلومینیوم به‌وسیله فرایند اکستروژن اصطکاکی توسط تانگ و رینولدز [۱۱] مطالعه شد. جعفرزاده و همکارانش [۱۲] فرایند اکستروژن شعاعی- معکوس اصطکاکی اغتشاشی<sup>۵</sup> را بررسی کردند. جمالی و همکارانش [۱۳] میکروساختار و خواص مکانیکی سیم‌های آلیاژ آلومینیوم 6063 تولید شده به روش اکستروژن اصطکاکی را مطالعه کردند. رامش و همکارانش [۱۴] ساخت لوله‌های حرارتی سبک از جنس آلیاژ منیزیم توسط اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی را مطالعه کردند. جراح و همکارانش [۱۵] تولید لوله‌های بدون درز به روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی را به‌صورت عددی و تجربی مورد مطالعه و تحقیق قرار دادند. بهینه‌سازی فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی برای تولید لوله‌های بدون درز از جنس آلیاژ منیزیم AZ31 توسط الهورانی و همکارانش [۱۶] انجام گرفت. شونموگوسامی و همکارانش [۱۷] لوله جدار نازک از جنس آلیاژ منیزیم سازگار با محیط‌زیست را توسط روش اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی فراوری کردند. اکبری و اسدی تولید سیم برنجی توسط روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی را مطالعه کردند [۱۸] و بهینه‌سازی میکروساختار و خواص مکانیکی سیم‌های برنجی تولیدی را توسط روش تاگوچی بررسی کردند [۱۹].

در این تحقیق برای اولین بار فراوری لوله‌های کامپوزیتی پایه فلزی با استفاده از روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی به‌صورتی که در ادامه تشریح شده است مورد مطالعه و امکان‌سنجی قرار گرفت. لوله‌های کامپوزیتی از جنس آلومینیوم خالص ۱۱۰۰ با موفقیت فراوری شده و خواص مکانیکی و سختی این لوله‌ها با ماده خام اولیه و همچنین با لوله آلومینیومی فراوری شده با روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی مقایسه گردید. همچنین فرایند اکستروژن

<sup>1</sup> Ultra-Fine Grained (UFG)

<sup>2</sup> Friction Stir Processing (FSP)

<sup>3</sup> Friction Stir Back Extrusion (FSBE)

<sup>4</sup> Friction Stir Tube Back Extrusion (FSTBE)

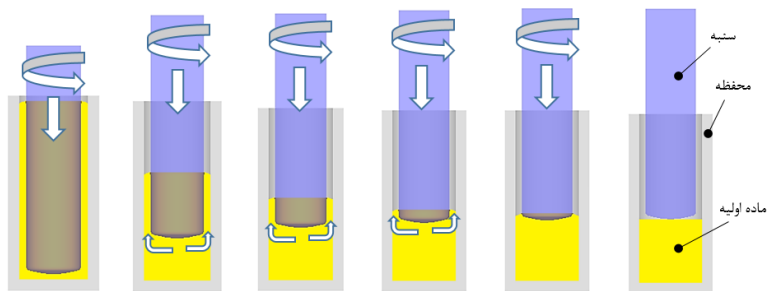
<sup>5</sup> Friction Stir Radial Backward Extrusion (FSRBE)

معکوس اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از یک مدل کوپل سازه‌ای- حرارتی توسط نرم‌افزار اجزای محدود DEFORM شبیه‌سازی شد.

## رویکرد آزمایش‌های تجربی

### اصول روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی

در فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی، ماده خام اولیه درون یک محفظه استوانه‌ای (قالب) قرار می‌گیرد. در ادامه یک سنبه فلزی که با سرعت دورانی مشخصی می‌چرخد به صورت آهسته به سطح قطعه خام اولیه نزدیک می‌شود و با سطح آن تماس پیدا می‌کند. نزدیک شدن آهسته به سطح قطعه کار اولیه و بعضاً نگه‌داشتن سنبه چرخنده در تماس با سطح قطعه کار برای مدتی محدود به منظور ایجاد حرارت اولیه لازم در اثر اصطکاک و نرم شده سطح ماده برای نفوذ راحت‌تر سنبه انجام می‌گیرد. سپس سنبه فلزی در حالی که می‌چرخد به درون ماده خام اولیه پیشروی می‌کند و ماده نرم شده در اثر حرارت به صورت معکوس بین سنبه و جداره قالب به صورت معکوس اکستروژد می‌گردد (شکل ۱). شایان ذکر است که قطر سنبه فلزی برابر با قطر داخلی لوله‌ای مورد نظر در نظر گرفته می‌شود. همچنین اغلب برای هدایت صحیح سنبه به درون ماده خام اولیه از یک بوش هدایت‌کننده استفاده می‌گردد.



شکل ۱. شماتیک فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی

### آزمایش‌های تجربی

در این تحقیق، میلگرد از جنس آلومینیوم خالص ۱۱۰۰ به قطر و طول ۳۰ میلی‌متر به عنوان ماده خام اولیه برای تولید لوله‌های آلومینیومی به کار رفت. برای تولید لوله‌های کامپوزیتی روی میلگرد آلومینیومی فوق توسط دستگاه سوپر دریل پنج عدد سوراخ راه به در به قطر ۱/۵ میلی‌متر مطابق شکل ۲ ایجاد شد. یکی از سوراخ‌ها در مرکز و چهار عدد سوراخ دیگر روی دایره‌ای به قطر ۸ میلی‌متر با فواصل یکسان در نظر گرفته شدند. این سوراخ‌ها به طور کامل با پودر فلزی استیل ۳۱۶ با اندازه ذرات میانگین ۳ میکرومتر پر شد. در هنگام فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی، ماده زیر سنبه در اثر حرارت ناشی از اصطکاک نرم شد و همچنین در اثر نیروی اصطکاک به صورت اغتشاشی با سرعت زیادی هم‌زده می‌شود. پودر داخل سوراخ‌ها نیز در تماس با پیشانی سنبه است؛ در نتیجه این پودرها نیز در اثر حرکت اغتشاشی زیر سنبه با ماده زمینه آلومینیومی مخلوط می‌شود و به همراه آن به صورت معکوس اکستروژد می‌گردد و در نهایت نمونه کامپوزیتی لوله‌ای شکل حاصل می‌شود. قالب‌های فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی، پس از طراحی از جنس فولاد گرم‌کار ۱.۲۳۴۴ ساخته شد. همان‌طوری که در شکل ۳ قابل مشاهده است به دلیل اینکه امکان برداشتن لوله فراوری شده از داخل قالب به سهولت امکان‌پذیر باشد، محفظه اصلی دستگاه به صورت دو تکه ساخته شده

است. ابعاد اجزای قالب به گونه‌ای در نظر گرفته شد که در نهایت لوله تولید شده دارای قطر داخلی (قطر سنبه چرخان) ۲۵ میلی‌متر و قطر خارجی (قطر محفظه قالب) ۳۰ میلی‌متر خواهد بود. آزمایش‌های تجربی متعددی با پارامترهای مختلف دور و میزان پیشروی سنبه به شرح جدول ۱ به عمل آمد. رویکرد مورداستفاده در آزمایش‌های تجربی بدین صورت بود که ابتدا با پارامترهای مشخص دور و پیشروی سنبه امکان فراوری لوله آلومینیومی بررسی شد و سپس در صورت موفق بودن آزمایش، در حضور همان پارامترهای تنظیمی فراوری لوله کامپوزیتی مطالعه شد. عللی که منجر به ارزیابی ناموفق بودن آزمایش‌های تجربی در نظر گرفته شدند شامل عدم حصول قطعه با صافی سطح موردقبول، شکل‌گیری قطعه با شکل نامنظم و بعضاً تخریب شده، عدم نفوذ سنبه به داخل قطعه و چسبیدن قطعه به سنبه می‌باشند. در نهایت با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه و پیشروی ۳ میلی‌متر در دقیقه، لوله کامپوزیتی مطابق شکل ۵ (ب) با موفقیت فراوری گردید.

جدول ۱. پارامترهای مورداستفاده در آزمایش‌های تجربی و نتیجه حاصل

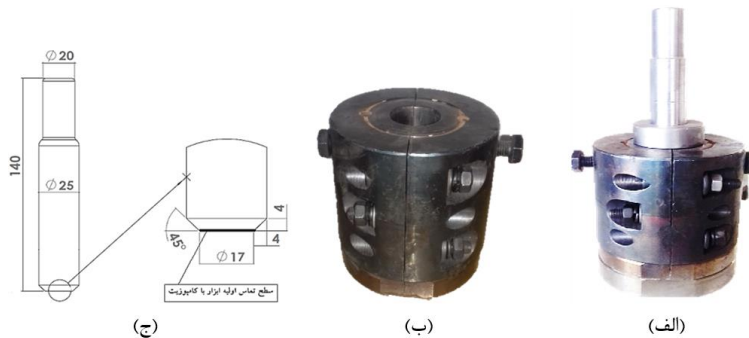
شرایط آزمایش	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵	آزمایش ۶	آزمایش ۷
دور (دور در دقیقه)	۲۵۰	۴۵۰	۸۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۶۰۰	۱۶۰۰
پیشروی (میلی‌متر در دقیقه)	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳
وجود پودر	*	*	*	*	*	*	*
نتیجه آزمایش	ناموفق	ناموفق	ناموفق	ناموفق	ناموفق	موفق	موفق

برای بررسی نحوه توزیع پودر در ماده زمینه آلومینیومی، ریزساختار نمونه کامپوزیتی تولید شده با استفاده از میکروسکوپ نوری تصویربرداری شد. برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های لوله‌ای شکل فراوری شده از آزمون کشش تک‌محوری استفاده شد. نمونه‌های کشش توسط وایرکات از لوله‌های فراوری شده موازی برای اکستروژن استخراج گردید و آزمون‌های کشش تا حد امکان مطابق استاندارد ASTM: E8/E8M روی نمونه‌های آماده شده به عمل آمدند. ابعاد نمونه‌های کشش در شکل ۴ نشان داده شده است. آزمون‌های کشش در دمای اتاق انجام گردید و در هر لحظه اطلاعات مربوط به تغییر طول نمونه و مقدار نیروی وارد شده بر آن ثبت شد و نمودار تنش کرنش نمونه‌ها ترسیم گردید. همچنین نمونه‌های تولید شده پس از آماده‌سازی سطح شامل سنباده‌زنی و پولیش کاری به وسیله دستگاه سختی‌سنجی ویکرز تحت آزمایش میکروسختی‌سنجی قرار گرفتند. آزمایش‌های میکروسختی‌سنجی در راستای ضخامت لوله‌ها در وسط طول نمونه‌های لوله‌ای شکل بدین ترتیب انجام گرفت که در سه نقطه مختلف در سطح مقطع نمونه تحت بار اعمالی  $gt$  ۱۰۰ و مدت‌زمان نگهداری ۱۵ s اندازه‌گیری به عمل آمد و مقدار میانگین آن ثبت شد.

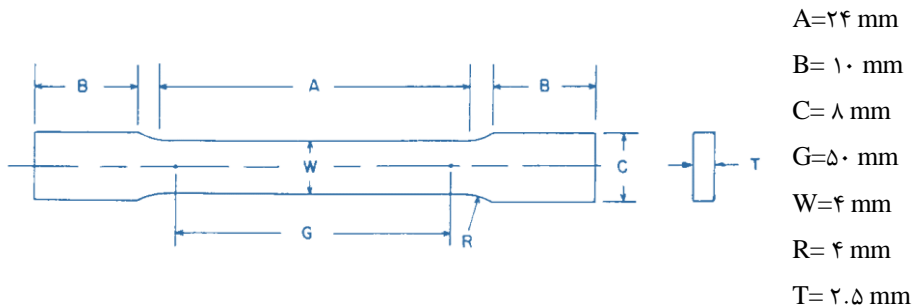




شکل ۲. ماده خام اولیه و سوراخ‌های ایجاد شده روی آن



شکل ۳. (الف) قالب ساخته شده برای فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی (ب) قالب محفظه دو تکه (ج) ابعاد سنبه

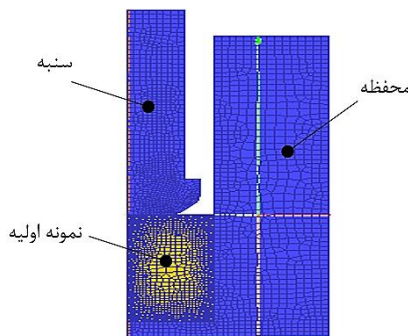


شکل ۴. ابعاد نمونه‌های آزمون کشش

### رویکرد مدل‌سازی عددی

به‌منظور مشاهده و بررسی رفتار تغییر شکل ماده در روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی، فرایند مذکور به‌صورت یک مدل تقارن محوری کوپل‌سازهای- حرارتی توسط نرم‌افزار اجزای محدود DEFORM مدل‌سازی شد. در این مدل، ابعاد نمونه و اجزای قالب دقیقاً مشابه آزمایش‌های تجربی در نظر گرفته شد. اجزای قالب شامل محفظه و سنبه

به صورت اجسام صلب و نمونه آلومینیومی به صورت ماده تغییر شکل پذیر با خاصیت ویسکو پلاستیک در نظر گرفته شدند. به دلیل ماهیت فرایند، تنش سیلان<sup>۱</sup> ماده به صورت تابعی از دما و نرخ کرنش و خواص حرارتی ماده و قالب به صورت تابعی از دما که در کتابخانه نرم افزار موجود است در نظر گرفته شد. ضریب انتقال حرارت بین اجزای قالب و قطعه کار برابر  $11 (N/mms^{\circ}C)$  و ضریب انتقال حرارت همرفتی بین اجزای قالب و قطعه کار با محیط که دمای آن  $20$  درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده برابر  $0.02 (N/mms^{\circ}C)$  در نظر گرفته شد. برای مش بندی محفظه قالب و همچنین سنبه از  $1000$  عدد المان و برای مش بندی قطعه از  $2000$  المان استفاده شد. برای تعریف جنس اجزای قالب و ماده از کتابخانه نرم افزار استفاده شد و برای قالب از جنس  $(1.2344)$  AISI H13 و ماده خام اولیه از جنس Aluminum-1100 استفاده گردید. یک مش یکنواخت با المان‌های چهار وجهی برای شبیه سازی استفاده شد. به دلیل تغییر شکل شدید صورت گرفته در ماده و جلوگیری از خطاهای احتمالی در نتایج شبیه سازی، از خاصیت مش بندی مجدد اتوماتیک استفاده گردید که موجب می شود در ناحیه تغییر شکل اصلی اندازه المان‌ها به مراتب ریزتر از سایر نواحی ماده باشد. صحنه گذاری شبیه سازی عددی، با استفاده از مقایسه نتایج عددی و تجربی نیروی پیشروی سنبه به عمل آمد و با توجه به بهترین تطابق نیروها، برای تماس سنبه چرخنده و ماده، ضریب اصطکاک برشی برابر  $0.4$  اعمال شد. سرعت چرخشی سنبه در شبیه سازی فرایند  $1600$  دور در دقیقه و سرعت پیشروی آن  $3$  میلی متر در دقیقه در نظر گرفته شده است. شکل ۵ مدل دو بعدی شبیه سازی را نشان می دهد.



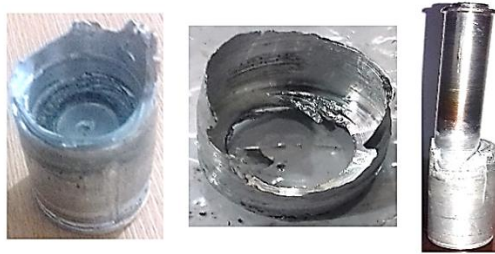
شکل ۵. مدل دو بعدی تقارن محوری فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی

## نتایج و بحث

### نتایج تجربی

به دلیل ماهیت پیچیده فرایند [۲۰]، آزمایش‌های تجربی متعددی با پارامترهای مختلف دور و میزان پیشروی سنبه به عمل آمد. شکل ۶ (الف) چند نمونه از آزمایش‌های تجربی ناموفق و نمونه حاصل از آن را نشان می دهد. عدم حصول قطعه با صافی سطح مورد قبول، شکل گیری قطعه با شکل نامنظم و بعضاً تخریب شده، نفوذ نکردن سنبه به داخل قطعه و چسبیدن قطعه به سنبه، از دلایل ارزیابی ناموفق بودن آزمایش‌های تجربی هستند. در نهایت با سرعت دورانی  $1600$  دور در دقیقه و پیشروی  $3$  میلی متر در دقیقه لوله کامپوزیتی مطابق شکل ۶ (ب) با موفقیت فراوری گردید.

<sup>1</sup> Flow stress



(الف)

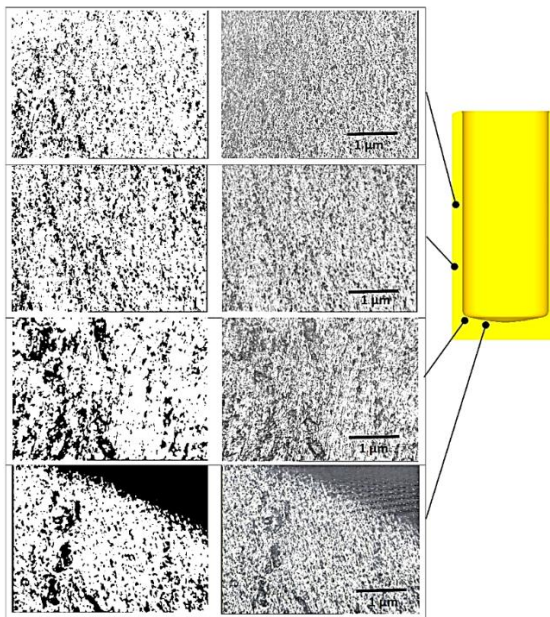


(ب)

شکل ۶. (الف) نمونه‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی ناموفق (ب) نمونه لوله کامپوزیتی فراوری شده

برای بررسی نحوه آمیخته شدن پودر به صورت اغتشاشی با ماده زمینه آلومینیومی، لوله‌های فراوری شده در آزمایش‌های تجربی تحت آزمون متالوگرافی قرار گرفتند و نحوه توزیع پودر استیل در زمینه آلومینیومی مطالعه شد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود رنگ‌های مشکی نشان‌دهنده پودر توزیع شده در ریزساختار زمینه آلومینیومی است. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه توزیع پودر به صورت کاملاً یکنواخت انجام نگرفته (عملاً چنین انتظاری نیز وجود نداشت) و در بعضی نواحی انباشتگی<sup>۱</sup> ذرات پودر به چشم می‌خورد، با این حال توزیع قابل‌قبولی از پودر در زمینه آلومینیومی قابل مشاهده است. انباشتگی ذرات پودر عمدتاً در ناحیه زیر پیشانی سنبه قابل مشاهده است که هنوز تحت تغییر شکل اغتشاشی ناشی از چرخش سنبه قرار نگرفته‌اند.

<sup>۱</sup> Agglomeration



شکل ۷. عکس متالوگرافی نواحی مختلف از لوله کامپوزیتی فراوری شده

شکل ۸ نمودار تنش- کرنش مهندسی نمونه‌های آلومینیوم آنیل شده (ماده خام اولیه)، لوله آلومینیومی و لوله کامپوزیتی فراوری شده توسط فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی حاصل از آزمایش کشش را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست و تحقیقات پیشین نیز نشان داده است [۲۱] استحکام تسلیم، استحکام نهایی و همچنین انعطاف‌پذیری لوله آلومینیومی تولید شده توسط فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی نسبت به ماده آلومینیوم آنیل‌شده، افزایش یافته است. تغییر شکل پلاستیکی شدید معمولاً موجب افزایش استحکام ماده از طریق مکانیزم‌های کرنش سختی از قبیل افزایش چگالی ناهنجاری‌ها، تشکیل ریزدانه‌ها<sup>۱</sup> و در نهایت تحول ریزساختار در نتیجه شکست دانه‌ها<sup>۲</sup> به دانه‌های کوچک‌تر و ریزدانه شدن<sup>۳</sup> می‌شود. این مکانیزم‌ها عموماً انعطاف‌پذیری ماده را کاهش می‌دهند [۲۲]. در فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی تغییر شکل پلاستیکی شدید در حضور حرارت ناشی از اصطکاک صورت می‌پذیرد که این حرارت موجب فعال شدن برخی پدیده‌های کار نرمی<sup>۴</sup> (کرنش نرمی) مانند بازیابی و تبلور دینامیکی و رشد دانه‌ها می‌شود. هر دو پدیده کرنش سختی و کار نرمی به‌طور هم‌زمان در فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی رخ می‌دهند. بدین ترتیب با توجه به افزایش استحکام لوله آلومینیومی فراوری شده نسبت به ماده اولیه می‌توان نتیجه گرفت که پدیده کرنش سختی، اندکی بر پدیده کار نرمی غلبه دارد. همچنین، با افزایش دما حین فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی، پدیده بازیابی دینامیکی که موجب حذف ناهنجاری‌های درون دانه‌ها از طریق جذب آنها به مرز دانه‌ها می‌شود سرعت بیشتری می‌یابد و در نتیجه باعث افزایش انعطاف‌پذیری ماده در اثر شکل‌گیری ریزساختار با

<sup>1</sup> Sub-grain

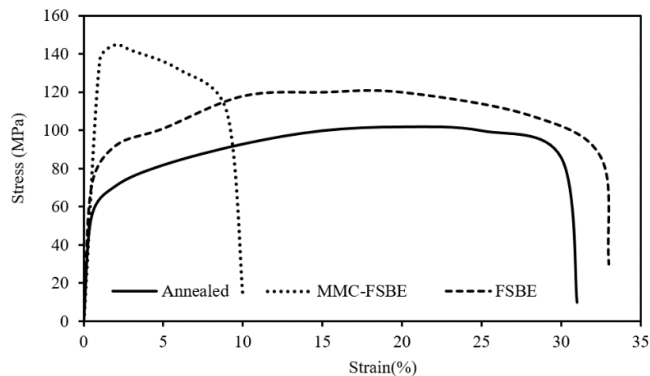
<sup>2</sup> Grain fragmentation

<sup>3</sup> Grain refinement

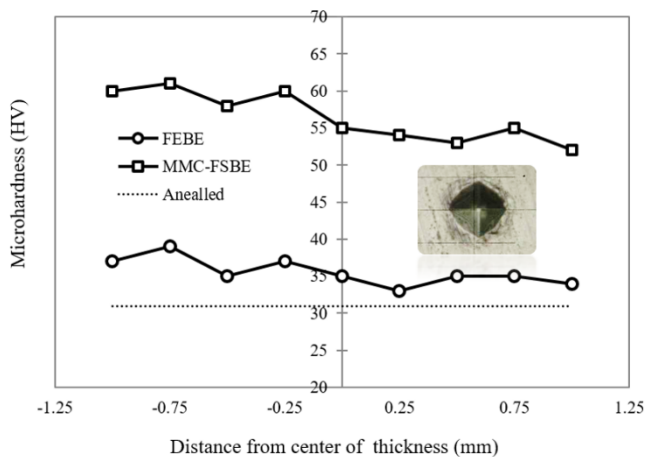
<sup>4</sup> Work softening

دانه‌های عاری از ناهنجاری می‌شود [۱۲]. همچنین در نمودار شکل ۷ می‌توان دید که استحکام تسلیم و استحکام نهایی لوله کامپوزیتی فراوری شده با روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد ولی در عوض انعطاف‌پذیری آن به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و از حدود ۳۳ درصد به ۱۰ درصد کاهش یافته است. افزایش استحکام و کاهش انعطاف‌پذیری را می‌توان به توزیع پودر استیل در زمینه ماده آلومینیومی مرتبط دانست؛ بدین صورت که توزیع ذرات میکرونی فاز تقویت‌کننده در ماده زمینه موجب بروز قیود هندسی در حین تغییر شکل پلاستیکی و ایجاد موانع در مقابل تحرک ناهنجاری‌ها دانست [۲۳].

شکل ۹ نتایج حاصل از میکروسختی‌سنجی نمونه‌های آلومینیوم آنیل شده (ماده خام اولیه)، لوله آلومینیومی و لوله کامپوزیتی فراوری شده توسط فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد. نتایج میکروسختی در شکل ۹ نیز تأییدکننده نتایج آزمون‌های کشش است؛ بدین صورت که میکروسختی لوله آلومینیومی، اندکی بالاتر از سختی آلومینیوم آنیل شده است ولی میکروسختی لوله کامپوزیتی، افزایش چشمگیری را نسبت به ماده اولیه آنیل شده نشان می‌دهد.



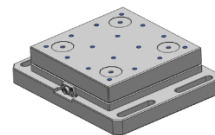
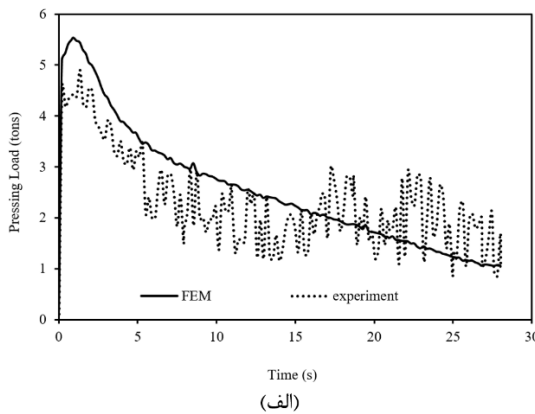
شکل ۸. نمودار تنش و کرنش حاصل از فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی



شکل ۹. نمودار سختی سنجی حاصل از فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی

### نتایج عددی

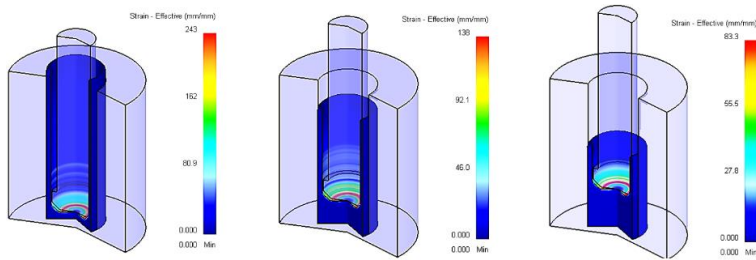
شکل ۱۰ مقایسه نیروی پیشروی سنبه حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی را نشان می‌دهد که گویای تطابق قابل قبول نتایج می‌باشد و صحت مدل‌سازی عددی را اثبات می‌کند. مقدار کرنش پلاستیکی اعمال شده توسط فرایندهای مختلف تغییر شکل پلاستیکی شدید مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار در نتیجه فرایند می‌باشد. خواص مکانیکی مواد شکل‌دهی شده به‌طور مستقیم با مقدار کرنش پلاستیکی اعمال شده در ساختار آنها در ارتباط است؛ از این رو آگاهی از مقدار و نحوه کرنش اعمال شده به نمونه‌های لوله‌ای شکل حین فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی، اهمیت زیادی دارد. شکل ۱۱ توزیع کرنش پلاستیک مؤثر در ماده در مراحل مختلف از فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌توان دید حرکت چرخشی سنبه موجب تغییر شکل پلاستیکی شدید ماده در تماس با سنبه به‌صورت اغتشاشی می‌شود و کرنش پلاستیکی شدید را به‌ویژه در پیشانی سنبه به ماده اعمال می‌کند. در واقع این کرنش پلاستیکی شدید است که باعث آمیخته شدن پودر در داخل زمینه آلومینیومی می‌شود و زمینه فرآوری لوله کامپوزیتی را ایجاد می‌کند. شکل ۱۲ نحوه توزیع دمای ناشی از اصطکاک در حین فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد. می‌توان دید که دمای حدود ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد ناشی از اصطکاک سنبه و ماده از همان ابتدای فرایند ایجاد شده و این دما در انتهای فرایند تا حدود ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. محدوده دمایی ۵۰۰-۶۰۰ درجه سانتی‌گراد موجب خمیری شده ماده تحت تغییر شکل می‌گردد و ضمن کاهش نیروی نفوذ سنبه در ماده باعث امتزاج پودر در آلومینیوم زمینه حین فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی می‌شود.



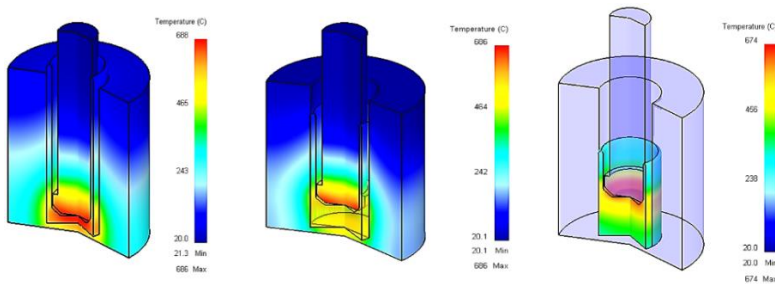
Kistler dynamometer  
(Type 9255C)

(ب)

شکل ۱۰. الف) مقایسه نیروی پیشروی سنبه حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی (ب) دیناموتر مورد استفاده برای اندازه‌گیری نیرو



شکل ۱۱. توزیع کرنش پلاستیکی مؤثر در مراحل مختلف از فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی



شکل ۱۲. توزیع دما در مراحل مختلف از فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی

## نتیجه گیری

در این تحقیق روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی برای فراوری لوله‌های کامپوزیتی پایه‌فلزی مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور روی ماده زمینه از جنس آلومینیوم ۱۱۰۰ پنج عدد سوراخ راه به در به قطر ۱/۵ میلی‌متر با استفاده از دستگاه سوپر دریل ایجاد شد و در ادامه این سوراخ‌ها با پودر فلز استیل ۳۱۶ با اندازه ذرات میانگین ۳ میکرومتر پر شد. سپس نمونه آماده شده تحت عملیات اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفت. رفتار تغییر شکل ماده در روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی توسط نرم‌افزار اجزای محدود DEFORM به صورت یک مدل کوپل سازه‌ای-حرارتی شبیه‌سازی شد.

دستاوردهای تحقیق حاضر را می‌توان به‌طور خلاصه به شرح ذیل بیان کرد:

- نمونه لوله‌ای آلومینیومی و لوله کامپوزیتی با موفقیت فراوری گردید.
- تصاویر متالوگرافی از نواحی مختلف لوله کامپوزیتی تولید شده گویای توزیع غیریکنواخت ذرات پودر در ماده زمینه است ولی با این حال پراکندگی ذرات در ماده زمینه دارای توزیع قابل قبول به‌ویژه در جداره لوله است.
- نتایج آزمون کشش بیانگر افزایش استحکام لوله کامپوزیتی در مقایسه با لوله آلومینیومی به اندازه حدود ۲۲ درصد است.
- نتایج آزمون میکروسختی‌سنجی ویکرز گویای افزایش قابل توجه سختی لوله کامپوزیتی در مقایسه با لوله آلومینیومی به اندازه حدود ۵۷ درصد است.

– نتایج شبیه‌سازی عددی بیانگر وجود دو عامل مهم اعمال کرنش پلاستیکی شدید به ماده در پیشانی سنبه و همچنین افزایش دمای ماده تا محدوده خمیری (۵۰۰-۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) برای امتزاج پودر در زمینه آلومینیومی است.

## References

- [1] Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D. Y., Micari, F., Lahoti, G. D., Groche, P., Yanagimoto, J., Tsuji, N., Rosochowski, A., & Yanagida, A. (2008). Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals*, 57(2), 716-735. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005>
- [2] Valiev, R. (2002). Nanomaterial advantage. *Nature*, 419, 887-889. <https://www.nature.com/articles/419887a>
- [3] Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50(1), 1-78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>
- [4] Hirata, T., Oguri, T., Hagino, H., Tanaka, T., Chung, S. W., Takigawa, Y., & Higashi, K. (2007). Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 456(1), 344-349. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.079>
- [5] Abu-Farha, F. (2012). A preliminary study on the feasibility of friction stir back extrusion. *Scripta Materialia*, 66(9), 615-618. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.01.059>
- [6] Sarkari Khorrami, M., & Movahedi, M. (2015). Microstructure evolutions and mechanical properties of tubular aluminum produced by friction stir back extrusion. *Materials & Design* 65, 74-79. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.018>
- [7] Mathew, N., Dinaharan, I., Vijay, S. J., & Murugan, N. (2016). Microstructure and Mechanical Characterization of Aluminum Seamless Tubes Produced by Friction Stir Back Extrusion. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 69(10), 1811-1818. <https://doi.org/10.1007/s12666-016-0841-8>
- [8] Ahmadkhanbeigi, M., Shapourgan, O., & Faraji, G. (2017). Microstructure and Mechanical Properties of Al Tube Processed by Friction Stir Tube Back Extrusion (FSTBE). *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70(7), 1849-1856. <https://doi.org/10.1007/s12666-016-0987-4>
- [9] Buffa, G., Campanella, D., Fratini, L., & Micari, F. (2016). AZ31 magnesium alloy recycling through friction stir extrusion process. *International Journal of Material Forming*, 9(5), 613-618. <https://doi.org/10.1007/s12289-015-1247-6>
- [10] Baffari, D., Buffa, G., Campanella, D., Fratini, L., & Reynolds, A. P. (2017). Process mechanics in Friction Stir Extrusion of magnesium alloys chips through experiments and numerical simulation. *Journal of Manufacturing Processes*, 29, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.07.010>
- [11] Tang, W., & Reynolds, A. P. (2010). Production of wire via friction extrusion of aluminum alloy machining chips. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(15), 2231-2237. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.010>
- [12] Jafarzadeh, H., Babaei, A., & Esmaeili-Goldarag, F. (2018). Friction Stir Radial Backward Extrusion (FSRBE) as a new grain refining technique. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(4), 1374-1385. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.04.006>
- [13] Jamali, G., Nourouzi, S., & Jamaati, R. (2019). Microstructure and mechanical properties of AA6063 aluminum alloy wire fabricated by friction stir back extrusion (FSBE) process.



- International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 26(8), 1005-1012. <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1806-9>
- [14] Ramesh, S., Lakshminarayanan, A., Raghavan, Y., & Harathi, Y. (2020). Fabrication and Numerical Analysis of Friction Stir Back Extruded Lightweight Magnesium Alloy Heat Pipes. *Materials Science Forum*, 979, 129-134. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.979.129>
- [15] Jarrah, O. M., Nazzal, M. A., & Darras, B. M. (2020). Numerical modeling and experiments of Friction Stir Back Extrusion of seamless tubes. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 165-177. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.11.001>
- [16] Alhourani, A., Awad, M., Nazzal, M. A., & Darras, B. M. (2021). Optimization of friction stir back extrusion mechanical properties and productivity of magnesium AZ31-B seamless tubes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 235(13), 2143-2154. <https://doi.org/10.1177/09544054211014465>
- [17] Shunmugasamy, V. C., Khalid, E., & Mansoor, B. (2021). Friction stir extrusion of ultra-thin wall biodegradable magnesium alloy tubes — Microstructure and corrosion response. *Materials Today Communications*, 26, 102129. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102129>
- [18] Asadi, P., & Akbari, M. (2021). Numerical modeling and experimental investigation of brass wire forming by friction stir back extrusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116(9), 3231-3245. <https://doi.org/10.1007/s00170021-07729-5>
- [19] Akbari, M., & Asadi, P. (2021). Optimization of microstructural and mechanical properties of brass wire produced by friction stir extrusion using Taguchi method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 235(12), 2709-2719. <https://doi.org/10.1177/14644207211032992>
- [20] Asadi Boroojeni, B., & Mozafari Vanani, L. (2020). The effect of tool geometry on the tensile strength of polypropylene Components Welded by Friction Stir Welding Method. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(1), 133-145. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112761>
- [21] Ghasemi Tamami, P., Javadimanesh, A., & Mardani, S. (2021). Investigation and optimization of friction stir welding process of aluminum 5010 to 6061. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(4), 281-311. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128408>
- [22] Valiev, R. Z., Estrin, Y., Horita, Z., Langdon, T. G., Zehetbauer, M. J., & Zhu, Y. T. (2016). Fundamentals of Superior Properties in Bulk NanoSPD Materials. *Materials Research Letters*, 4(1), 1-21. <https://doi.org/10.1080/21663831.2015.1060543>
- [23] Xia, X., Sakaris, P., & McQueen, H. J. (1994). Hot deformation, dynamic recovery, and recrystallisation behaviour of aluminium 6061–SiCp composite. *Materials Science and Technology*, 10(6), 487-496. <https://doi.org/10.1179/mst.1994.10.6.487>