



## مطالعه تجربی و عددی روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی برای تولید لوله‌های ریز ساختار

مسعود احمدخان بیگی<sup>1</sup>، جواد شهبازی کرمی<sup>2</sup>، محمد مراد شیخی<sup>3\*</sup>

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 163-16785، m.sheikhi@SRTTU.edu

### کلیدواژگان

### چکیده

لوله ریزدانه  
آلومینیوم  
تغییر شکل پلاستیک شدید  
خواص مکانیکی  
اجزا محدود

در این تحقیق، فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی برای تولید لوله‌های ریزدانه آلومینیومی ارائه شده است. شکل‌دهی لوله‌ها در این روش، با نفوذ ابزار دورانی به درون ماده توپر اولیه صورت می‌گیرد. شبیه‌سازی اجزا محدود این روش تأثیر پارامترهای مختلف از جمله دما، کرنش اعمال شده و نحوه سیلان در حین فرایند را مشخص کرده است. خواص مکانیکی و متالورژیکی لوله‌های تولید شده توسط بررسی ریز ساختاری، آزمون کشش و میکرو سختی مورد مطالعه قرار گرفته است. تصویر میکروسکوپی ریز ساختار نشان دهنده این موضوع است که این فرایند توانایی تولید لوله‌هایی با ریز ساختار اصلاح شده در اثر پدیده تبلور مجدد دینامیکی را دارد. در نتیجه اصلاح ریز ساختار و کاهش سایز دانه‌ها در راستای دیواره داخلی لوله‌ها، اندازه دانه‌ها از مقدار اولیه 110 میکرون به حدود 33 میکرون کاهش یافته است. نتایج بدست آمده از تست کشش نشان دهنده افزایش استحکام نهایی از مقدار اولیه 153 مگاپاسکال به 195 مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول از 10% به 13% می‌باشد. در نتیجه استحکام نهایی به میزان 13% رشد داشته است. متوسط سختی لوله‌ها در امتداد ضخامت از 63 ویکرز به 82 ویکرز افزایش یافته است. نتایج بدست آمده تأیید کننده این موضوع است که این فرایند برای تولید نوعی از لوله‌ها با خواص استحکامی و انعطاف پذیری بالا، مناسب می‌باشد.

## Experimental and numerical study of friction stir back extrusion process for producing ultra-fine-grained tubes

Masoud Ahmad Khan Beigi<sup>1</sup>, Javad Shahbazi Karami<sup>2</sup>, Mohammad Morad Sheikhi<sup>2\*</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 16785-163 Tehran, Iran, m.sheikhi@SRTTU.edu

### Keywords

Ultra-fine-grained tubes  
Aluminum  
Severe plastic deformation  
Mechanical properties  
Finite element

### Abstract

In this paper, friction stir back extrusion process is proposed for producing ultra-fine grain (UFG) tubes. In this process, a rotating tool is plunged into round bar specimens and then forming tubes. The influence of design parameters such as heat treatment, applied strain and material flow behavior was determined by finite element simulation. Various tests including optical microscopy, tensile test and microhardness test were carried out to evaluate the metallurgical and mechanical properties of processed tubes. The optical micrographs of the microstructure demonstrate that this process is capable to form a tube with a significant fine grained structure resulting from dynamic recrystallization phenomenon. Reduction in grain size and grain refinement occur across the inner wall of the formed tube as well. Hence, the grain size with an initial value of ~ 110  $\mu\text{m}$  was decreased to ~ 33  $\mu\text{m}$  in the inner side of formed tube wall. The obtained results from tensile tests illustrate that the ultimate strength and elongation to failure were increased from the initial value of 153 MPa to 195 MPa and 10% to 13%, respectively. Thus the ultimate strength increased by 13%. The average hardness along thickness has reached to 82 Hv from 63 Hv. The results show that this method is suitable for fabricating a kind of ultrafine-grained tube which own an acceptable combination of strength and ductility.

### 1- مقدمه

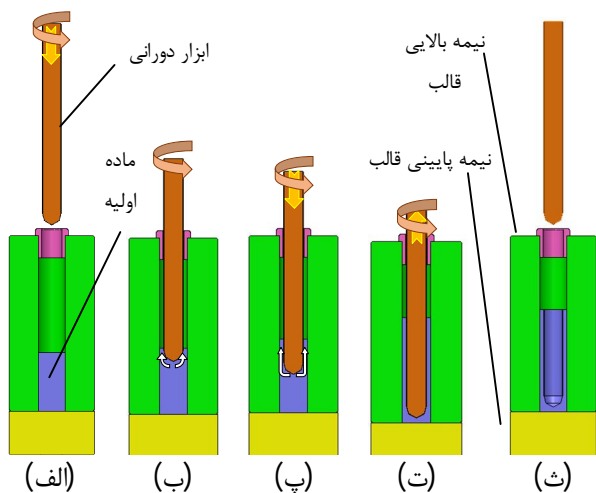
این عمل با افزایش تنش تسلیم، سبب کاربرد وسیع این گونه از فلزات در صنعت به ویژه حمل و نقل می‌گردد. روش‌های تغییر

امروزه افزایش نسبت استحکام به وزن توسط ریز کردن دانه‌های آلیاژهایی مانند آلومینیوم بسیار مورد استقبال قرار گرفته است.

Please cite this article using:

M. Ahmad Khan Beigi, J. Shahbazi Karami, M. M. Sheikhi, Experimental and numerical study of friction stir back extrusion process for producing ultra-fine-grained tubes, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 34-44, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



**Fig. 1** Schematic of the FSBE process. (a) placing of the tube specimen in the die, (b) rubbing the upper edge of the specimen, (c) inserting the process tool, (d) attaining the desirable depth, (e) removing the tool

شکل 1 شماتیک فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی لوله‌ها (الف) قرارگیری نمونه در قالب (ب) پیش گرمایش نمونه (پ) نفوذ ابزار دورانی (ت) پیشروی به عمق مطلوب (ث) خروج ابزار از قالب

در ادامه و با حرکت روبه پایین ابزار، تغییر شکل پلاستیک رخ داده و مواد نرم شده به سمت بالا اکستروژن می‌شوند. در مرحله (ت) پیشروی سنبه تا رسیدن به عمق از پیش تعیین شده ادامه پیدا می‌کند. در مرحله (ث) با خروج سنبه از قالب شکل نهایی لوله ایجاد می‌گردد، لازم به ذکر است که قطر درونی لوله نهایی وابسته به قطر سنبه می‌باشد.

تاکنون تمام مطالعات صورت گرفته بر روی فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی، به منظور بررسی قابلیت این روش برای تولید لوله‌ها و همچنین بررسی تجربی خواص مکانیکی و ریز ساختار بوده است.

در مطالعه‌ای سرکاری و همکارانش [9] موفق به تولید لوله آلومینیومی با استفاده از روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی شدند. نتایج یافته‌های آن‌ها حاکی از آن بود که تبلور مجدد دینامیکی<sup>10</sup> عامل اصلی در بهبود ریز ساختار ماده در حین فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد. با این حال با بررسی خواص مکانیکی متوجه شدند که استحکام نهایی لوله تولید شده نسبت به ماده اولیه کاهش یافته است. آن‌ها دلیل این امر را غلبه اثر افزایش حرارت نسبت به کاهش سایز دانه‌ها در حین فرایند ذکر کرده‌اند. در مطالعه دیگر، میلنر و همکارانش در بررسی تولید لوله‌هایی از جنس منیزیم AZ31 با استفاده از این فرایند دریافتند که خواص مکانیکی از جمله

شکل پلاستیک شدید<sup>1</sup> به منظور دستیابی به ساختار بسیار ریز دانه<sup>2</sup> در فلزات است [2,1]. فلزاتی که تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار می‌گیرند، دارای خواص مکانیکی خوبی از جمله انعطاف‌پذیری و استحکام می‌باشند [3]. به طور کلی اساس تمام روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید بر مبنای ایجاد تغییرات ریز ساختار در مواد است، اما نحوه اعمال تغییر شکل بر اساس هندسه و ظاهر مواد متفاوت می‌باشد. فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید در ابتدا برای ورق‌ها و مواد حجیم<sup>3</sup> و امروزه برای لوله‌ها و مواد تو خالی مورد توجه قرار گرفته است. اخیراً مطالعه و بررسی‌هایی به منظور اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید بر روی قطعات لوله‌ای شکل و تو خالی به منظور معرفی فرایندی کاربردی، صنعتی به همراه هزینه تولید کم و نرخ تولید بالا انجام شده است. از جمله برخی از این روش‌ها می‌توان به پیچش لوله با فشار بالا<sup>4</sup> [4]، فشار در کانال لوله‌ای<sup>5</sup> [5] و فشردن در کانال زاویه‌دار لوله‌ای موازی<sup>6</sup> [6] اشاره نمود.

فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی<sup>7</sup> به عنوان یک روش جدید برای تولید مواد لوله‌ای شکل با ساختار ریز دانه در سال 2012 توسط ابوفرها<sup>8</sup> به ثبت رسیده است [7]. فرایند مذکور بر پایه فرایند اصطکاکی اغتشاشی توسعه یافته است. در این فرایند سنبه با حرکت توامان چرخشی و رو به پایین، به درون ماده اولیه نفوذ کرده و حرارت ناشی از اصطکاک باعث نرم شدن قطعه می‌شود؛ سپس مواد به دور سنبه به صورت روبه بالا اکستروژن شده و به شکل نهایی لوله تبدیل می‌شوند [8]. شکل 1 شماتیک فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد. در این فرایند، در مرحله (الف) ماده اولیه در حالی درون حفره قالب قرار می‌گیرد که لقی<sup>9</sup> بین آن و قالب، امکان چرخش و حرکت را ندهد. در مرحله (ب) سنبه فولادی غیر مصرفی به داخل قالب نفوذ می‌کند و با لبه بالایی نمونه تماس پیدا می‌کند. این مرحله به منظور ایجاد پیش گرمایش ناشی از اصطکاک بوده تا نفوذ سنبه به درون نمونه به صورت سریعتر انجام شود. در مرحله (پ) پیشروی سنبه به درون نمونه در حالی انجام می‌شود که حرارت ایجاد شده سبب خمیری شدن ماده می‌گردد.

<sup>1</sup> Severe Plastic Deformation (SPD)

<sup>2</sup> Ultra-Fine Grain (UFG)

<sup>3</sup> Bulk Materials

<sup>4</sup> High Pressure Tube Twisting (HPTT)

<sup>5</sup> Tube Channel Pressing (TCP)

<sup>6</sup> Parallel Tubular Channel Angular Pressing (PTCAP)

<sup>7</sup> Friction Stir Back Extrusion (FSBE)

<sup>8</sup> Abu-Farha

<sup>9</sup> Clearance

<sup>10</sup> Dynamic recrystallization

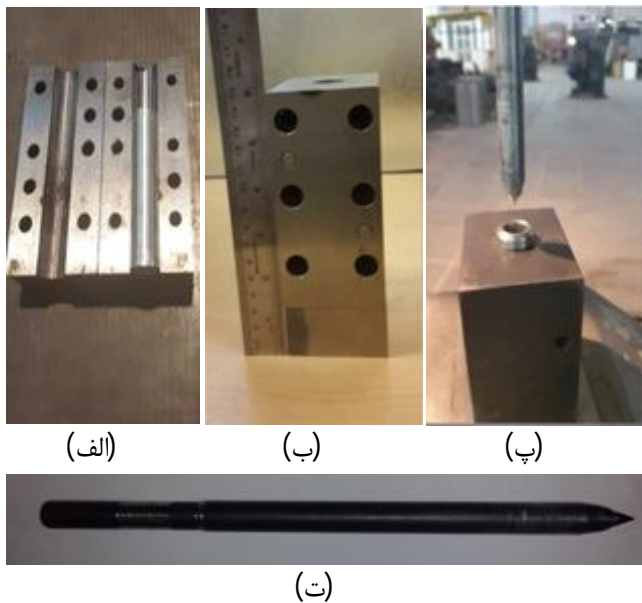


Fig. 2 Images of; (a) and (b) The components of die and, (c) locator bush. (d) process tool

شکل 2 تصاویر الف و ب) قالب فرایند پ) بوش راهنمای ابزار ت) ابزار دورانی

جدول 1 درصد عناصر وزنی تشکیل دهنده ماده اولیه

Table. 1 Composition of initial specimen

المان	آلومینیوم	سیلیسیم	آهن	مس	منگنز	منیزیم
مقدار (%)	پایه	0/143	0/288	5/8	0/027	0/015

آزمایشی با سرعت دورانی 1100 دور در دقیقه و پیشروی 2/21 میلی‌متر بر دقیقه بهترین حالت برای رسیدن به شکل قابل قبول لوله تولید شده می‌باشد. پس از حدود 20 دقیقه، به منظور خنک‌کاری و تبادل دمایی بین محیط و قالب، نمونه از قالب خارج می‌گردد.

با توجه به این که نمونه‌های مورد آزمایش آلومینیومی بودند، آن‌ها تحت ولتاژ 7/4 ولت و توسط محلول بارکرز<sup>3</sup> 4) میلی لیتر فلوروتیک اسید<sup>4</sup>، 0/5 میلی لیتر هیدروکلوریک اسید<sup>5</sup> اسید<sup>5</sup> و 200 میلی لیتر آب<sup>6</sup> الکترواچ<sup>7</sup> شدند. در نهایت با استفاده از میکروسکوپ نوری پلاریزه<sup>8</sup> بررسی ریز ساختاری روی نمونه‌ها انجام شده است. برای بررسی دقیق ریز ساختار لوله تولید شده، سطح مقطع لوله از وسط به وسیله دستگاه وایرکات برش می‌خورد و نواحی منتخب مورد مطالعه ریز ساختار قرار می‌گیرند.

خواص مکانیکی نمونه‌ها با استفاده از استحکام کششی و

میکرو سختی در دیواره درونی لوله تولید شده نسبت به دیواره خارجی آن افزایش یافته است. آن‌ها دلیل این اختلاف را متناسب با بررسی ریز ساختار گزارش کرده‌اند به صورتی که مواد در دیواره داخلی لوله تولید دچار تغییر شکل بیشتر و در نتیجه دچار کاهش بیشتر در اندازه دانه‌ها شده‌اند، به همین دلیل خواص مکانیکی مرتبط با اندازه دانه از جمله سختی سنجی در این ناحیه افزایش یافته است [10].

در گزارشی دیگر دیناهاران<sup>1</sup> و همکاران با استفاده از فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی موفق به تولید لوله‌هایی از جنس مس خالص شدند [11].

با وجود اینکه بررسی‌های گوناگونی در زمینه تأثیر فرایند FSBE بر ریزساختار و خواص مکانیکی لوله‌های تولید شده صورت گرفته است [8-11] ولی در زمینه بررسی المان محدود متغیرهای تأثیر گذار فرایند و همچنین تطابق دهی و مقایسه یافته‌های تجربی و عددی تاکنون تحقیقی صورت نگرفته است.

بنابراین هدف از تحقیق حاضر بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی لوله‌های تولیدی از جنس آلیاژ آلومینیوم 2024، به همراه بررسی پارامترهایی نظیر کرنش مؤثر پلاستیک و دما در حین شکل‌دهی با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی اجزا محدود آباکوس می‌باشد.

## 2- آزمایش‌های تجربی

تجهیزات مورد استفاده برای انجام فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی مطابق شکل 2 می‌باشد. قالب به صورت سه تکه و از جنس فولاد تزریق پلاستیک ساخته شده است. حفره میانی قالب با استفاده از دستگاه وایرکات به قطر 18 میلی‌متر و عمق 150 میلی‌متر برش خورده است.

ابزار فرایند از جنس فولاد گرم کار<sup>2</sup> بوده و دارای قطر 13 میلی‌متر می‌باشد. نوک ابزار به دلیل هدایت و نفوذ بهتر در نمونه به صورت زاویه‌دار (35 درجه) مخروطی شده است. در این آزمایش از یک ماده توپر آلومینیومی آلیاژ 2024 با درصد وزنی عناصر مطابق جدول 1 به عنوان نمونه اولیه استفاده شده است. طول ماده اولیه 60 میلی‌متر و قطر آن 18 میلی‌متر می‌باشد. به منظور دستیابی به شکل مطلوبی از لوله تولید شده، نیاز به یافتن حالت بهینه‌ای از دو پارامتر وابسته به هم یعنی سرعت دورانی و سرعت پیشروی می‌باشد، لذا آزمایش‌های گوناگونی بدین منظور انجام شد.

<sup>3</sup> Barkers

<sup>4</sup> HBF4

<sup>5</sup> HCL

<sup>6</sup> H2O

<sup>7</sup> Electro Etched

<sup>8</sup> Polarized

<sup>1</sup> Dinaharan et al.

<sup>2</sup> HSS

در این تحلیل اثرات حرارتی همراه با اثرات دینامیکی در مسأله لحاظ گردیده است، لذا از تحلیل کوپل سازه‌ای - حرارتی<sup>1</sup> استفاده شده است.

در شبیه‌سازی فرایند FSBE سرعت پیشروی ابزار mm/s 2/21 و سرعت دورانی آن 1100 rpm در نظر گرفته شد. همچنین مدل‌سازی بر اساس حالت سه بعدی انجام شد. ماده تحت فرایند با مدل پوسته قابل تغییر شکل<sup>2</sup> شبیه‌سازی شده است. از سوی دیگر مدل ایجاد شده از سنبه و قالب از نوع صلب<sup>3</sup> می‌باشد. با استفاده از المان‌های سه گره‌ای<sup>4</sup>، قطعه‌کار مش‌بندی شده و برای دقت بیشتر مدل‌سازی، اطراف حفره مرکزی قطعه کار که تحت نفوذ ابزار می‌باشد، ندی ریزتری اعمال شد. سطوح برخوردی از نوع سینماتیک<sup>5</sup> و اصطکاک بین آن‌ها از نوع پنالتی<sup>6</sup> تعریف شده است. علاوه بر تعریف تماس اصطکاکی بین ابزار و قطعه، تماس‌های حرارتی نیز تعریف شده است. به طوریکه برای تعریف انتقال حرارت جابجایی از حالت لایه‌ای<sup>7</sup> و برای انتقال حرارتی تابشی، از مدل تابش سطحی<sup>8</sup> استفاده شده است.

فرایند شبیه‌سازی به طور مشابه با روش تجربی در سه مرحله انجام شده است، به طوریکه طی زمان دو ثانیه، ابتدا ابزار در تماس با سطح بالای ماده اولیه موجب ایجاد گرما و نرم شدن آن می‌گردد، سپس با نفوذ به درون ماده توپر، شکل نهایی لوله تشکیل می‌شود. در انتها با خروج ابزار از قطعه شکل داده شده، شبیه‌سازی به پایان می‌رسد. لازم به ذکر است ابعاد قطعه و ابزار مطابق شرایط واقعی در نظر گرفته شده است.

#### 4- نتایج و بحث

شکل 3 تصویر ماده اولیه و لوله تولید شده نهایی را نشان می‌دهد. طول لوله نهایی در مقایسه با نمونه اولیه، 40 میلی‌متر افزایش داشته و به  $(\pm 0/2) 100$  میلی‌متر رسیده است. همچنین قطر درونی لوله متناسب با قطر ابزار به اندازه  $(\pm 0/2) 13$  میلی‌متر می‌باشد. جدول 3 ابعاد نمونه اولیه و نهایی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است اعداد اندازه‌گیری شده بر مبنای استاندارد ISO 2768-m در نظر گرفته شده است. شکل 3- ب نمای خارجی لوله تولید شده را نشان می‌دهد.

میکرو سختی ویکرز مورد بررسی قرار گرفته است. استحکام کششی و میکروسختی به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM E8M و ASTM E384-11 در دمای اتاق مورد بررسی قرار گرفت.

لازم به ذکر است به منظور مقایسه بین خواص لوله تولیدی و نمونه ماده اولیه، با استفاده از مته به قطر 13 میلی‌متر، نمونه اولیه به شکل لوله‌ای شکل سوراخ شده و آزمون استحکام کششی در راستای محور لوله انجام گرفته است.

همچنین آزمون میکرو سختی در راستای ضخامت دیواره لوله تولید شده انجام گرفته است. لازم به ذکر است آزمون میکرو سختی توسط دستگاه LEITZ METZLAR و با نیروی ثابت 100 گرم و زمان 10 ثانیه در 5 نقطه با فواصل یکسان از یکدیگر در راستای چهار مسیر منتخب از ضخامت لوله انجام شده است.

لازم به ذکر است آزمون کشش و سختی، بر روی 3 نمونه ماده اولیه و 3 نمونه از لوله تولید شده به روش اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی انجام شده است.

#### 3- روند شبیه‌سازی اجزا محدود

مدل‌سازی فرایند FSBE با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود به دلیل وجود دماهای وابسته به رفتار ماده و همچنین نرخ کرنش زیاد، پیچیده می‌باشد.

از آنجاکه فرایند FSBE به صورت شکل‌دهی گرم می‌باشد، از یک سو در حین تغییر شکل پلاستیک حرارت ایجاد شده سبب افزایش دمای قطعه می‌شود و از سوی دیگر به دلیل قرار گرفتن در محیط آزاد، دمای قطعه کاهش می‌یابد. به همین دلیل با تغییر زیاد دمای قطعه، نوع رفتار ماده نیز تغییر می‌کند. با توجه به دلایل ذکر شده لازم است برای انجام یک تحلیل دقیق، رفتار ماده تابعی از دما و نرخ کرنش تعریف شود. خواص مکانیکی ماده وابسته به دما و نرخ کرنش از اطلاعات [12] استخراج شده است. جدول 2 برخی از خواص فیزیکی آلیاژ آلومینیوم 2024 را نشان می‌دهد.

جدول 2 خواص فیزیکی آلیاژ آلومینیوم 2024

Table. 2 Physical properties of aluminum alloy 2024

چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	ضریب انبساط حرارتی (10 <sup>-6</sup> m/(mk))	ضریب انبساط حرارتی (10 <sup>-6</sup> m/(mk))	گرمای ویژه (J/kg <sup>0</sup> c)	خاصیت
2700	22/3	0/33	880	مقدار

<sup>1</sup> Dynamic, Temp- disp, Explicit

<sup>2</sup> Deformable shell

<sup>3</sup> Analytic rigid

<sup>4</sup> C3D8RT

<sup>5</sup> Kinematic contact

<sup>6</sup> Penalty

<sup>7</sup> Film condition

<sup>8</sup> Surface radiation to ambient

در حدود  $110 (\pm 0/1)$  میکرومتر اندازه‌گیری شده است. نواحی (الف)، (ب)، (پ)، (ت) و (ث) مطابق شکل 5 بر روی سطح مقطع برش خورده لوله، به منظور بررسی اثرات فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی بر روی ریزساختار لوله تولید شده انتخاب شده‌اند.

شکل 6- الف، ب، پ و ت به ترتیب تصویر ریزساختار نواحی (الف)، (ب)، (پ) و (ت) مشخص شده در شکل 5 را نشان می‌دهد. برای بررسی دقیق‌تر، ناحیه (الف) مشخص شده در شکل 5 در مکانی انتخاب شده، که با سطح مخروطی نوک ابزار دورانی در تماس بوده است. با مطالعه اندازه دانه‌ها مشخص گردید که میانگین اندازه دانه‌ها در منطقه I این ناحیه در حدود 77 میکرون و در منطقه II در حدود 33 میکرون می‌باشد (شکل 6- الف). علت این تغییرات را می‌توان به اختلاف در اثر افزایش حرارت، تفاوت در اعمال کرنش اعمالی ناشی از تغییر شکل و همچنین فرصت بازیابی به مواد در این نواحی نسبت داد. به عبارت دیگر با دور شدن از نواحی تحت اغتشاش، رشد اندازه دانه‌ها مشاهده می‌شود.

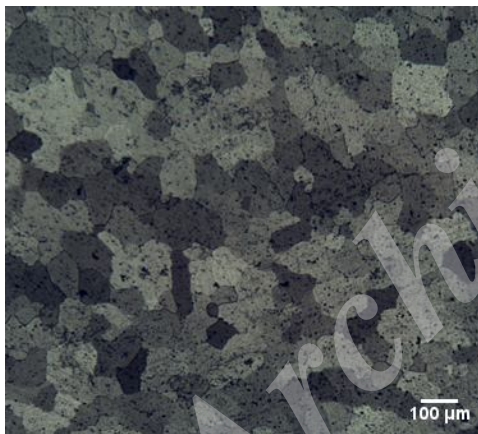


Fig. 4 Optical micrographs of as-received material

شکل 4 تصویر میکروسکوپی از ریز ساختار ماده اولیه

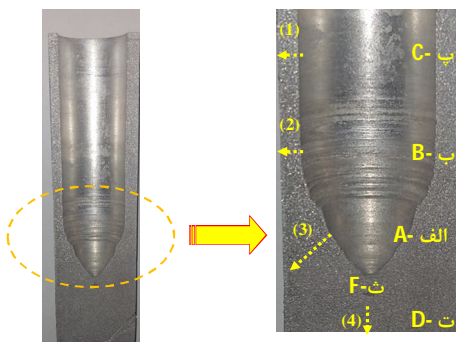


Fig. 5 photograph of the cross-section of processed tube and selected paths and regions

شکل 5 تصویر برش خورده لوله تولید شده و انتخاب نواحی و مسیرها



Fig. 3 illustrations of; (a) the initial specimen, (b) the final processed tube, (c) cross-section of the formed tube

شکل 3 الف) ماده توپر اولیه ب) لوله نهایی تولید شده پ) تصویر برش خورده نمونه نهایی

جدول 3 ابعاد نمونه اولیه و لوله نهایی تولید شده

Table. 3 Dimension of initial specimen and processed tube

پارامتر	لوله نهایی (میلی‌متر)	نمونه اولیه (میلی‌متر)
قطر داخلی	$13 (\pm 0/2)$	-
قطر خارجی	$18 (\pm 0/2)$	$18 (\pm 0/2)$
طول	$100 (\pm 0/2)$	$60 (\pm 0/2)$

حرارت محبوس شده در قالب و چسبندگی ماده به سطح قالب سبب کاهش کیفیت سطح بیرونی لوله شده است. از طرف دیگر شکل 3- پ تصویر برش خورده لوله تولید شده توسط فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل پیداست، سطح درونی لوله دارای کیفیت و صافی سطح بالایی بوده و فاقد هرگونه عیوب ظاهری از جمله ترک یا مک می‌باشد.

#### 1-4- خواص ریز ساختار

به منظور بدست آوردن سایز دانه‌های نمونه اولیه، نواحی مختلفی از آن بررسی گردید. شکل 4 تصویر ریز ساختار ماده اولیه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل 4 مشاهده می‌گردد، ریز ساختار ماده اولیه دارای توزیع ذرات به صورت همگن می‌باشد. با بررسی تصویر ریز ساختار ماده اولیه و با اندازه‌گیری در مناطق مختلف، میانگین سایز دانه‌های نمونه ماده اولیه

با بررسی بیشتر تصاویر میکروسکوپی، عدم یکنواختی در توزیع دانه‌ها در دیواره لوله تولید شده مشاهده می‌گردد (شکل 6-ب و 6-پ).

به منظور بررسی دقیق‌تر، تصویر ریزساختار دیواره لوله در شکل 6-ب از لحاظ اندازه دانه‌ها، به دو منطقه I و II تقسیم‌بندی شده است. اندازه دانه‌ها در منطقه I، II به ترتیب 75 و 55 میکرون اندازه گیری شده است.

با بررسی اندازه دانه‌ها و همچنین بررسی تصاویر ریز ساختار این نواحی، وجود گرادیان در اندازه دانه‌ها در راستای ضخامت لوله در این نواحی مشاهده می‌گردد. به عبارت دیگر منطقه II دچار بیشترین کاهش در اندازه دانه شده و با حرکت از سمت دیواره داخلی (منطقه II) لوله تولید شده به سمت دیواره بیرونی (منطقه I) و دور شدن از نواحی تحت اغتشاش، اندازه دانه‌ها افزایش پیدا کرده است.

لازم به ذکر است منبع تولید حرارت در فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی لوله‌ها به دو بخش تقسیم می‌شود: الف) حرارت ناشی از سیلان مواد و ب) حرارت ناشی از اصطکاک بین مواد و ابزار دورانی.

به دلیل کاهش اندازه دانه‌ها، انتظار می‌رود خواص مرتبط با اندازه دانه‌ها یعنی استحکام مکانیکی و سختی نیز بهبود یابد. لازم به ذکر است همان گونه که در ابتدای بحث اشاره شد، پدیده بازیابی دینامیکی<sup>2</sup> که نقش منظم کردن نابجایی‌ها در خلال تغییر شکل گرم را دارد به همراه پدیده تبلور مجدد دینامیکی، از عوامل اصلی در بهبود ریزساختار هستند. تحولات متالورژیکی که باعث رخ دادن پدیده تبلور مجدد دینامیکی می‌شود، بسیار پیچیده می‌باشد، اما به طور خلاصه می‌توان گفت که با افزایش دانسیته نابجایی‌ها به مقدار بحرانی که ناشی از اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید (کارسختی<sup>3</sup>) است، پدیده تبلور مجدد دینامیکی شروع می‌شود.

پدیده تبلور مجدد دینامیکی بر اساس نحوه تکثیر و رشد جوانه‌ها به انواع مختلفی طبقه‌بندی شده است. از جمله می‌توان به پدیده تبلور مجدد دینامیکی هندسی<sup>4</sup> و پدیده تبلور مجدد دینامیکی غیر پیوسته<sup>5</sup> اشاره کرد [16]. در فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی لوله‌ها، به دلیل انرژی نقص<sup>6</sup> بالای آلیاژ آلومینیوم و همچنین فشار جانبی اعمال شده بر دیواره لوله

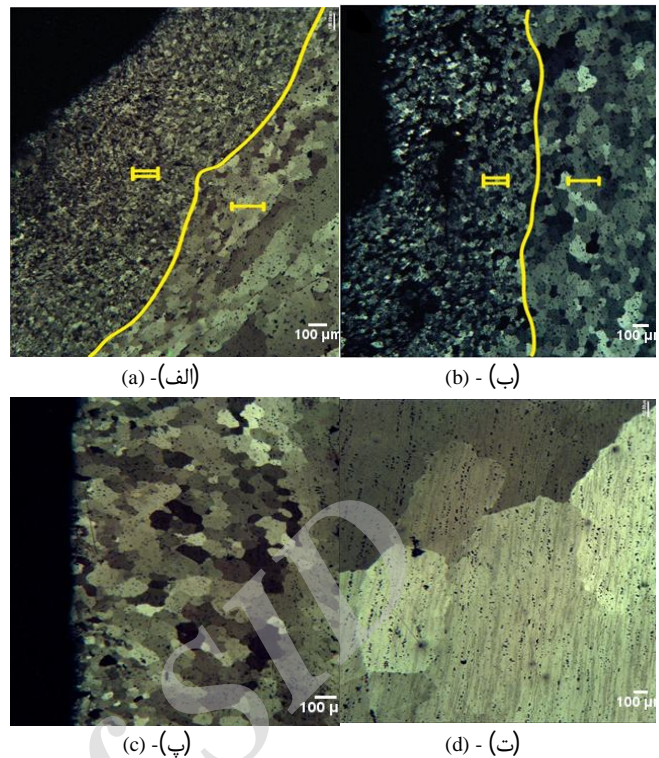


Fig. 6 (a) to (d) The microstructures of the specific areas of "A" to "D" shown in Fig. 5, respectively.

شکل 6 الف)، ب)، پ) و ت) به ترتیب نشان دهنده تصویر ریزساختار نواحی الف)، ب)، پ) و ت) مشخص شده در شکل 5

مقایسه اندازه دانه محاسبه شده نسبت به اندازه دانه ماده اولیه، کاهش سایز دانه‌ها را نشان می‌دهد. برای علت یابی این موضوع، پدیده‌های متالورژیکی رخ داده شده در حین انجام فرایند بررسی شده است. از آنجاییکه فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی لوله‌ها جزء فرایندهای کارگرم<sup>1</sup> محسوب می‌گردد، انتظار می‌رود در حین انجام این فرایند، اولاً با افزایش حرارت، پدیده تبلور مجدد دینامیکی رخ داده و ثانیاً در اثر اعمال تنش‌های برشی، پدیده تغییر شکل پلاستیک شدید اتفاق افتد. لازم به ذکر است، پدیده تبلور مجدد دینامیکی در سایر فرایندهای مشابه نظیر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و فرایند اصطکاکی اغتشاشی عامل اصلی در بهبود ریز ساختار می‌باشد [13-15].

بنابراین مواد در حین انجام فرایند، توسط چرخش ابزار دچار اغتشاش شده و در معرض تبلور مجدد دینامیکی قرار می‌گیرند. به همین دلیل اندازه دانه‌ها کاهش یافته و با شکل گرفتن یک ساختار متشکل از دانه‌های ریز هم محور، ریزساختار بهبود می‌یابد.

<sup>2</sup> Dynamic recovery (DRV)

<sup>3</sup> Work Hardening (WH)

<sup>4</sup> Discontinuous dynamic recrystallization (DDRX)

<sup>5</sup> Geometric dynamic recrystallization (GDRX)

<sup>6</sup> Stacking Fault Energy (SFE)

<sup>1</sup> Hot Working Process

#### 2-4- خواص مکانیکی

استحکام کششی در نقطه تسلیم، استحکام کششی نهایی و افزایش طول در نقطه پارگی از جمله مهم‌ترین پارامترهایی هستند که با آن‌ها می‌توان خواص مکانیکی ماده را ارزیابی کرد. شکل 8 نمودار تنش- کرنش مهندسی حاصل از آزمون کشش را نشان می‌دهد. با مقایسه نمودار تنش-کرنش مهندسی مشاهده می‌گردد که نمونه بدست آمده از فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی نسبت به نمونه اولیه دارای درصد ازدیاد طول و همچنین استحکامی بیشتر از نمونه اولیه می‌باشد. با توجه به شکل 9، تنش تسلیم از مقدار 77 مگاپاسکال به 103 مگاپاسکال و به میزان 12% و همچنین استحکام نهایی از مقدار 153 مگاپاسکال به 195 مگاپاسکال و به میزان 13% رشد داشته است. نکته قابل توجه افزایش درصد ازدیاد طول از 10 درصد به حدود 13 درصد می‌باشد. لازم به ذکر است مقادیر تنش تسلیم و استحکام نهایی حاصل از مقدار متوسط بررسی 3 نمونه لوله تولید شده و ماده اولیه بوده و با انحراف از معیار 0/32 ذکر گردیده است.

باید به این نکته اشاره کرد که به طور معمول در فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، پدیده کارسختی علاوه بر افزایش استحکام باعث کاهش شدید درصد ازدیاد طول نمونه‌ها می‌شود [20]. این در حالی است که نتایج بدست آمده از فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی، نشان دهنده افزایش توان استحکام مکانیکی و ازدیاد طول می‌باشد.

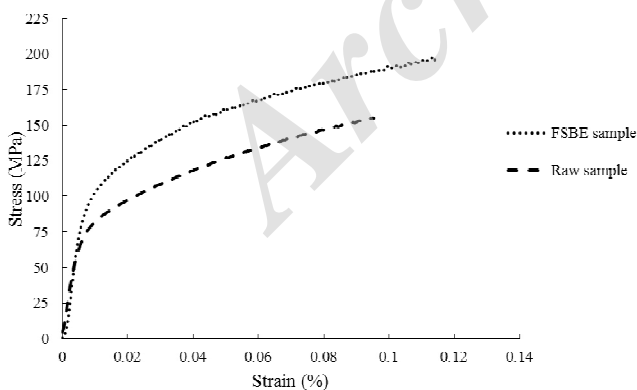


Fig. 8 engineering stress-strain diagram

شکل 8 نمودار تنش - کرنش مهندسی

علت افزایش درصد ازدیاد طول را می‌توان به بالا بودن دما در حین آزمایش نسبت داد، به نحوی که با افزایش نرخ بازیابی در دماهای بالاتر ناپودی نابعایی‌ها سرعت گرفته و این امر سبب

در حین انجام فرایند [17]، احتمال وقوع پدیده تبلور مجدد دینامیکی از نوع هندسی بیشتر از تبلور مجدد دینامیکی غیر پیوسته می‌باشد [18،19]

ناحیه (ت) علامت‌گذاری شده در شکل 5، تنها در معرض افزایش حرارت محبوس شده در قالب قرار گرفته و هیچ گونه تغییر شکلی بر روی آن اتفاق نیفتاده است. شکل 6- ت تصویر میکروسکوپی از ریزساختار این ناحیه را نشان می‌دهد. همان گونه که انتظار می‌رفت تحت اثر حرارت زیاد، دانه‌های این ناحیه رشد داشته و میانگین سایز ذرات آن به 150 میکرومتر رسیده است.

ناحیه (ث) در شکل 5 بر روی انتهای لوله تولید شده واقع شده است. به عبارت دیگر، این ناحیه در مکانی که با سطح نوک تیز ابزار دورانی فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی در تماس بوده، واقع شده است. با مطالعه اندازه دانه‌ها، تصویر ریز ساختار این ناحیه مطابق شکل 7 به چهار منطقه تقسیم‌بندی شده است.

میانگین اندازه دانه‌ها در منطقه I، II، III و IV مربوط به شکل 7 در جدول 3 نشان داده شده است.

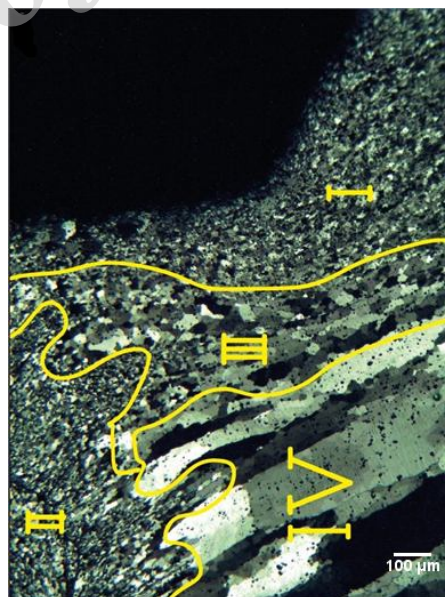


Fig. 7 Optical micrographs of region (F), classified based on grain size

شکل 7 تصویر ریز ساختار ناحیه (ث)، طبقه بندی شده بر اساس اندازه دانه

جدول 4 اندازه دانه‌های نواحی مشخص شده در شکل 7

Table. 4 The grain size of the particular areas as specified in Fig. 7

اندازه دانه در ناحیه (میکرومتر)			
IV	III	II	I
85	42	25	33

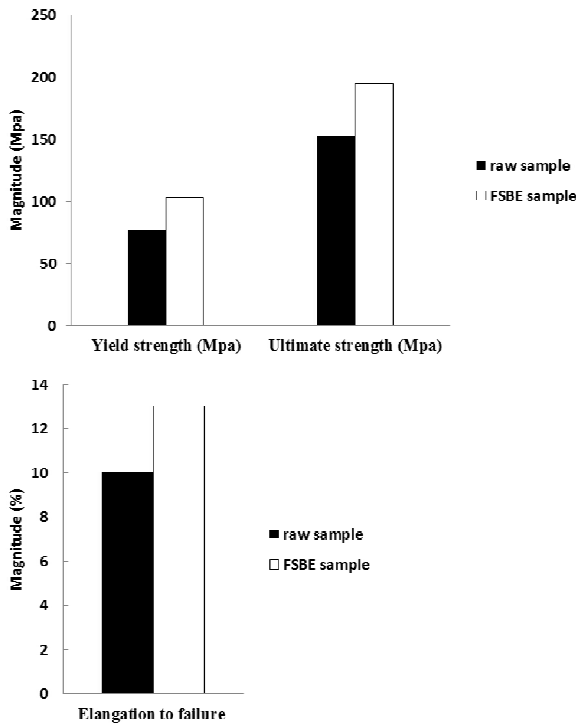


Fig. 9 Summary results of the tensile test eventuated from Fig.8

شکل 9 خلاصه اطلاعات بدست آمده از نمودار تنش - کرنش مهندسی

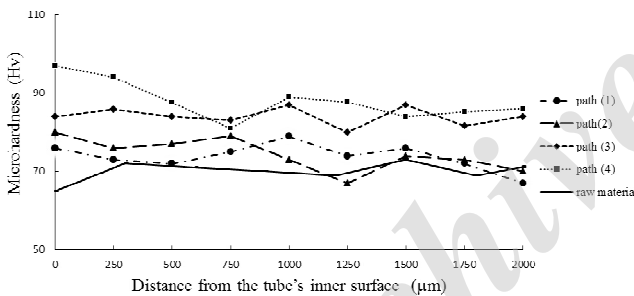


Fig. 10 Microhardness measurements of the raw material and processed tube along four path shown in Fig. 5

شکل 10 نمودار میکرو سختی ماده اولیه و مسیرهای چهارگانه از لوله تولید شده مشخص شده در شکل 5

با توجه به شکل 10 برای بررسی سختی در دیواره لوله تولید شده، مقدار سختی مسیرهای (1)، (2)، (3) و (4) مقایسه گردید و مشاهده گردید که مسیر (4) دارای سختی آغازین بیشتری نسبت به سایرین است. علت این امر، انتخاب مسیر (4) در ناحیه‌ای از ماده می‌باشد که با قسمت نوک تیز ابزار در تماس است و در نتیجه همان گونه که قبلاً در قسمت بررسی ریز ساختار بحث گردید، دچار تغییر شکل بیشتر شده است. در ادامه مسیر به علت رشد دانه‌ها، سختی در وسط تمام مسیرها کاهش یافته و پس از آن مقدار سختی در سراسر دیواره خارجی لوله در یک مقدار ثابت باقی می‌ماند.

کاهش نابجایی‌های جذب شده در دیواره دانه‌های فرعی می‌گردد و به تبع آن با افزایش کرنش در تبلور مجدد دینامیکی دانه‌های هم محور ریز و مرزهای زاویه زیاد تشکیل شده و افزایش میزان ازدیاد طول مشاهده می‌شود. اما در ارتباط با تنش با دو عامل متضاد روبرو هستیم. اولین عامل، اثر افزایش دما می‌باشد که منجر به کاهش استحکام کششی می‌گردد.

از سوی دیگر در اثر اغتشاش، تغییر شکل پلاستیک شدید، بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی ساختار ریزدانه‌ای تشکیل می‌شود که منجر به افزایش استحکام کششی می‌گردد که با توجه به نتایج بدست‌آمده در این تحقیق عامل دوم قدرت بیشتری داشته و استحکام افزایش یافته‌است. در نهایت، دلیل افزایش استحکام ماده و کاهش نیافتن پیوسته ازدیاد طول، توزیع غیر همگن اندازه دانه در راستای ضخامت لوله است. این امر در تطابق با تغییرات بررسی شده ریز ساختار می‌باشد، به نحوی که دانه‌های ریزتر باعث افزایش استحکام و دانه‌های بزرگتر مانع کاهش پیوسته ازدیاد طول می‌گردد [21].

### 3-4- سختی

آزمون میکروسختی بر روی چهار مسیر (1)، (2)، (3) و (4) که در شکل 5 مشخص شده است، انجام شده است. فاصله نقاط سختی‌سنجی از یکدیگر در هر مسیر یکسان می‌باشد. مقدار متوسط سختی 3 نمونه اولیه در حدود  $63 (\pm 3)$  ویکرز اندازه‌گیری شده است. شکل 10 نمودار میکرو سختی مسیرهای مختلف مشخص شده در راستای دیواره لوله تولید شده و نمونه اولیه می‌باشد. لازم به ذکر است مقادیر سختی ذکر شده در نمودار 10 حاصل از بررسی مقدار متوسط 3 نمونه لوله تولید شده و نمونه اولیه با انحراف از معیار 0/67 می‌باشد.

با توجه به شکل 10 مشاهده می‌گردد که در تمام مسیرهای واقع بر دیواره لوله تولید شده به روش اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی، مقدار سختی از نمونه اولیه بیشتر شده است. همچنین با حرکت از سمت دیواره درونی لوله تولید شده به سمت دیواره بیرونی مقدار سختی کاهش می‌یابد.

به عنوان مثال در مسیر (1) مقدار متوسط سختی از 76 ویکرز در نقطه شروع واقع در دیواره درونی به 66 ویکرز در دیواره بیرونی کاهش یافته است. این روند کاهشی برای سایر مسیرها نیز صادق می‌باشد. این روند کاهشی را می‌توان به اثر افزایش حرارت و همچنین تغییرات ریزساختار از جمله افزایش اندازه دانه‌ها در راستای ضخامت دیواره نسبت داد.



همچنین شکل 13 المان‌های مسیر مشخص شده به منظور بررسی توزیع نتایج را نشان می‌دهد. تعداد چهار المان مورد بررسی بر روی مسیری واقع بر ضخامت لوله تولید شده انتخاب شده‌اند. دلیل این امر، اهمیت دیواره لوله‌ها و همچنین بحرانی بودن پارامترها در این ناحیه می‌باشد.

اولین نکته‌ای که در بررسی شکل 14 قابل توجه است، بالاترین نرخ دماست که در حدود 0/8 دمای ذوب آلیاژ آلومینیوم 2024 می‌باشد. به عبارت دیگر خواص دمایی ایجاد شده در فرایند FSBE همانند فرایند اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد [19]. در ادامه بررسی شکل مشاهده می‌گردد که در ثانیه چهارم ماکزیمم دمای ممکنه به خاطر سرعت چرخشی بالای قطعه حاصل می‌شود و به مرور با گذشت زمان و با کاهش سرعت چرخشی قطعه چرخان میزان حرارت تولیدی در فصل مشترک کاهش می‌یابد و به خاطر مسأله انتقال حرارت، از میزان دما کاسته می‌شود. علاوه بر این همان‌گونه که انتظار می‌رود دما در نواحی که بیشترین اصطکاک وجود داشته است بالا بوده و با دور شدن از نواحی اصطکاکی و حرکت به سمت دیواره بیرونی کاهش یافته است.

لازم به ذکر است که در اجرای فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی دو پدیده متضاد مشاهده می‌شود. از یک سو اغتشاش مکانیکی و تغییر شکل پلاستیک شدید سبب کاهش اندازه دانه‌ها و افزایش چگالی نابجایی‌ها می‌شود و در نتیجه بر اساس رابطه سختی هال-پچ، سختی افزایش می‌یابد [22]. از سوی دیگر با افزایش دما و پدیده تبلور مجدد که سبب کاهش چگالی نابجایی‌ها می‌شود، مقدار سختی کاهش می‌یابد. بنابراین این دو پدیده به طور دائم در حال رقابت می‌باشند. در این تحقیق با توجه به نتایج سختی‌سنجی می‌توان گفت که کاهش اندازه دانه نسبت به کاهش دانسیته نابجایی‌ها تأثیر بیشتری بر سختی داشته و در نتیجه سختی نمونه‌های تحت فرایند افزایش یافته است.

#### 4-4- شبیه‌سازی اجزا محدود

کرنش پلاستیک معادل و میدان توزیع دما حاصل از شبیه‌سازی فرایند FSBE به ترتیب در شکل‌های 11 و 12 نشان داده شده است.

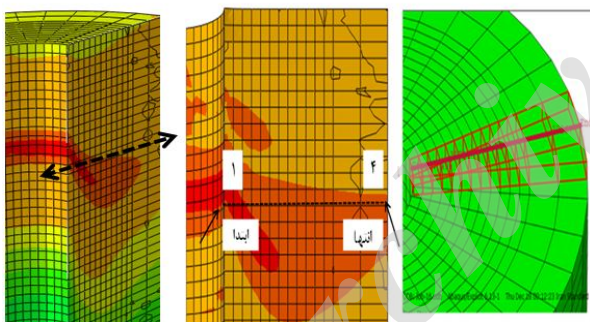


Fig. 13 Elements specified in the processed tube thickness

شکل 13 المان‌های مشخص شده در راستای ضخامت لوله تولید شده

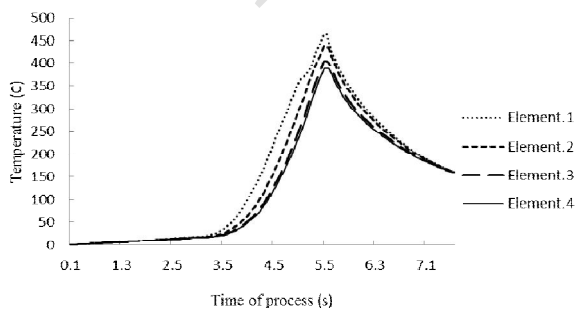


Fig. 14 Variations of temperature along tube thickness in different elements

شکل 14 نمودار تاریخچه حرارتی المان‌های انتخاب شده در راستای ضخامت لوله تولید شده

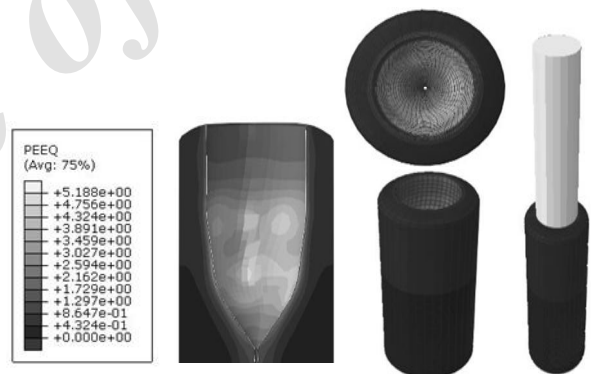


Fig. 11 Equivalent plastic strain after process

شکل 11 کرنش پلاستیک معادل اعمال شده در انتهای فرایند

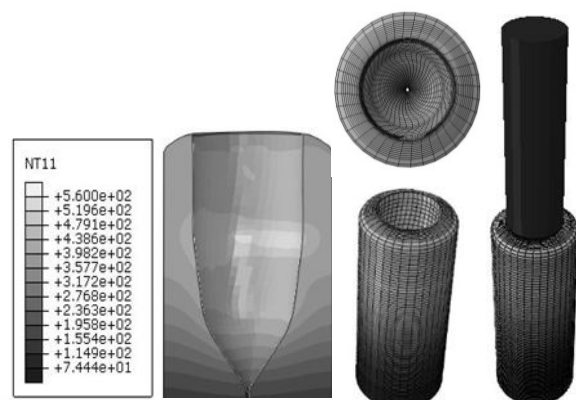


Fig. 12 The temperature distribution after process

شکل 12 میدان توزیع دما در انتهای فرایند

### 5- نتیجه‌گیری

در این مقاله از فرایند اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی به عنوان روشی برای تولید لوله‌های ریز ساختار استفاده شد. لوله‌های حاصل از این فرایند دارای خواص مکانیکی و ریز ساختاری بهبود یافته‌ای نسبت به ماده اولیه شروع فرایند می‌باشند. بدین صورت که میانگین اندازه دانه‌ها از حدود 110 میکرون به 33 میکرون در جداره داخلی لوله تولید شده رسیده است. همچنین استحکام نهایی از مقدار 153 مگاپاسکال به 195 مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول از 10 به 13 درصد رشد داشته‌اند. از طرف دیگر مقدار متوسط سختی لوله‌های تولید شده نسبت به ماده اولیه بیشتر شده است، و با رشد 12 درصدی از 63 ویکرز به 82 ویکرز رسیده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزا محدود، تأیید کننده نتایج آزمایش‌های تجربی می‌باشد. به نحوی که میزان کرنش اعمال شده بر جداره داخلی لوله تولید شده با بررسی‌های ریزساختاری آن ناحیه تطابق دارد.

### 6- مراجع

- [1] V. M. Segal, Materials processing by simple shear, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 197, No. 2, pp. 157-164, 1995.
- [2] R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Progress in Materials Science*, Vol. 45, No. 2, pp. 103-189, 2000.
- [3] A. Rosochowski, Processing Metals by Severe Plastic Deformation, *Solid State Phenomena*, Vol. 101-102, No. 13-22, 2005.
- [4] L. S. Tóth, et al., Severe plastic deformation of metals by high-pressure tube twisting, *Scripta Materialia*, pp. 175-177, 2009.
- [5] M. K. Zangiabadi, Development of a novel severe plastic deformation method for tubular materials: Tube Channel Pressing (TCP), *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, pp. 5066-5072, 2011.
- [6] G. Faraji, et al., Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes, *Materials Letters*, Vol. 77, pp. 82-85, 2012.
- [7] F. Abu-Farha, Spiral Friction Stir Processing (SFSP) for the Extrusion of Lightweight Alloy Tubes, *Proceedings of the 07th International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC 2012*, No. Notre Dame, 2012.
- [8] F. Abu-Farha, A preliminary study on the feasibility of friction stir back extrusion, *Scripta Materialia*, Vol. 66, No. 9, pp. 615-618, 2012.
- [9] M. S. Khorrami, M. Movahedi, Microstructure evolutions and mechanical properties of tubular

لازم به ذکر است دمای در انتهای فرایند در هنگام خروج ابزار از قطعه رو به کاهش بوده و در تمام المان‌ها به یک مقدار خاص همگرا شده است.

همان‌گونه که از شکل 15 مشخص است با گذشت زمان میزان کرنش افزایش می‌یابد به نحوی که در ثانیه پنجم به بیشترین مقدار خود رسیده است. این امر بدین علت است که، دما در ثانیه پنجم به بیشترین مقدار خود رسیده بوده و به همراه پلاستیسیته ناشی از اغتشاش سبب ماکزیمم مقدار کرنش می‌گردد. علاوه بر این مشاهده می‌گردد که بعد از زمان مذکور همزمان با افت دما، میزان کرنش ثابت باقی مانده است. دلیل این اتفاق مربوط به کاهش پلاستیسیته مواد در نتیجه کاهش دما می‌باشد. شکل 16 نمایش دهنده میدان توزیع دما در ناحیه تماس نوک ابزار و ماده اولیه است. محدوده دمایی متغیر نشان داده شده، متناسب با تغییرات ریز ساختار در این ناحیه است (شکل 7). به منظور توضیح دقیق‌تر، مناطقی که تحت اثر مستقیم نیروی وارده از طرف ابزار به درون ماده هستند، در معرض اغتشاش مکانیکی و همچنین افزایش دمای ناشی از اصطکاک می‌باشند، در نتیجه انتظار کاهش اندازه دانه‌ها در این مناطق طبیعی است.

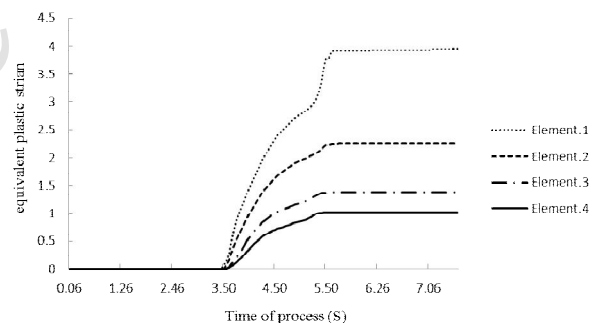


Fig. 15 Charts of equivalent plastic strain along tube thickness in different elements

شکل 15 نمودار کرنش معادل پلاستیک اعمال شده بر المان‌های انتخاب شده در راستای ضخامت لوله تولید شده

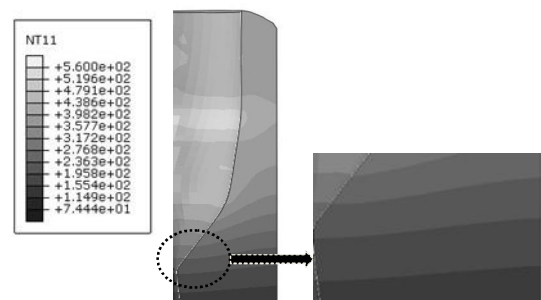


Fig. 16 The temperature distribution in the contact area of tools and material

شکل 16 میدان توزیع دما در ناحیه تماس نوک ابزار و ماده

- deformation, Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, Eds., pp. 363-392, Oxford: Pergamon, 1995.
- [17] M. E. Kassner, S. R. Barrabes, New developments in geometric dynamic recrystallization, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 410-411, pp. 152-155, 2005.
- [18] P. B. Prangnell, C. P. Heason, Grain structure formation during friction stir welding observed by the 'stop action technique', *Acta Materialia*, Vol. 53, No. 11, pp. 3179-3192, 2005.
- [19] S. T.R. Mcnelley, Recrystallization mechanisms during friction stir welding/processing of aluminum alloys, *Scripta Materialia* Vol. 58, pp. 349-354, 2008.
- [20] V. R. A. Mishra, Fabienne Grégori, B.K. Kad, R.J. Asaro, M.A. Meyers, Effect of Initial Grain Size, Die Angle and Pass Sequence on the Formation of Ultrafine Grain Structure in Cu by ECAP, *Materials Science Forum* Vol. 503-504, pp. 25-30, 2006.
- [21] A. Mishra, V. Richard, F. Grégori, R. J. Asaro, M. A. Meyers, Microstructural evolution in copper processed by severe plastic deformation, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 410-411, No. 0, pp. 290-298, 11/25/, 2005.
- [22] Y. Morisada, H. Fujii, T. Nagaoka, M. Fukusumi, Effect of friction stir processing with SiC particles on microstructure and hardness of AZ31, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 433, No. 1-2, pp. 50-54, 2006.
- aluminum produced by friction stir back extrusion, *Materials & Design*, Vol. 65, pp. 74-79, 2015.
- [10] J. L. Milner, F. Abu-Farha, *Friction Stir Back Extrusion of Mg AZ31B-F: A Preliminary Investigation*, in: *Magnesium Technology 2014*, Eds., pp. 497-503: John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [11] I. Dinaharan, R. Sathiskumar, S. J. Vijay, N. Murugan, Microstructural Characterization of Pure Copper Tubes Produced by a Novel Method Friction Stir Back Extrusion, *Procedia Materials Science*, Vol. 5, pp. 1502-1508, 2014.
- [12] M. Handbook, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials* :ASM International, 1990.
- [13] C. M. L. Hu, C. M. Du, X. H. Ho, N. J. Huang, J. C., Enhanced tensile plasticity in ultrafine-grained metallic composite fabricated by friction stir process, *Scripta Materialia*, Vol. 59, No. 11, pp. 1163-1166, 2008.
- [14] K. V .S. Jata, S. L., Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys, *Scripta Materialia*, Vol. 43, No. 8, pp. 743-749, 2000.
- [15] M. Zohoor, M. K. Besharati Givi, P. Salami, Effect of processing parameters on fabrication of Al-Mg/Cu composites via friction stir processing, *Materials & Design*, Vol. 39, pp. 358-365, 2012.
- [16] F. J. Humphreys, M. Hatherly, *Chapter 11- Recovery and recrystallization during and after hot*