



## پرس کاری لوله به کمک فشار سیال به عنوان روش جدید تغییر شکل پلاستیک شدید جهت تولید لوله‌های استحکام بالا

علی اصغر ذوالفقاری درزی<sup>1</sup>، حمید گرجی<sup>2\*</sup>، محمد بخشی جوئیباری<sup>3</sup>، روح اله جماعتی<sup>4</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

4- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

\* صندوق پستی 484، hamidgorji@nit.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 16 مرداد 1398

داوری اولیه: 13 مهر 1398

پذیرش: 19 آذر 1398

### کلیدواژه‌ها:

تغییر شکل پلاستیک شدید  
پرس کاری لوله به کمک فشار سیال  
لوله استحکام بالا  
خواص مکانیکی

تغییر شکل پلاستیک شدید یکی از روش‌های تولید مواد ریزدانه و استحکام بالا می‌باشد که در چند دهه اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این پژوهش یک روش تغییر شکل پلاستیک شدید جدید با عنوان پرس کاری لوله به کمک فشار سیال جهت تولید لوله استحکام بالا ارائه شده است. در روش مذکور بر خلاف روش‌های معمول، به جای قالب و ماندل، از فشار سیال برای حفظ شکل لوله کمک گرفته شده است تا با حذف تماس بین دیواره لوله و قالب، نیروی مورد نیاز فرایند مستقل از طول لوله گردد. هر پاس فرایند پرس کاری لوله به کمک فشار سیال شامل دو نیم‌سیکل می‌باشد که با عبور لوله از کانال تغییر شکل در نیم سیکل‌های اول و دوم به ترتیب باعث افزایش و کاهش قطر لوله و اعمال کرنش پلاستیک بر لوله می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که نیروی مورد نیاز این فرایند در مقایسه با روش پرس کاری در کانال زاویه‌دار لوله‌ای موازی برای آلومینیوم 1050 و با ابعاد انتخاب شده در این پژوهش 60 درصد کمتر می‌باشد. در فرایند ارائه شده با افزایش طول لوله، نیرو افزایش نخواهد داشت که این نکته از مزایای این روش برای تولید لوله‌های استحکام بالا با ابعاد بزرگ می‌باشد. نتایج تجربی بر روی لوله‌هایی از جنس آلومینیوم 1050 نشان داد که بعد از 2 پاس میزان استحکام تسلیم و نهایی نمونه‌ها از مقادیر اولیه 51 و 65 مگاپاسکال، به ترتیب به 78 و 96 مگاپاسکال افزایش یافت. به علاوه، مقدار متوسط میکروسختی نمونه‌ها بعد از 3 نیم سیکل از مقدار اولیه 28 به 35 ویکرز افزایش یافته است.

## Hydro assisted tube pressing as a new severe plastic deformation method for producing high strength tubes

Ali Asghar Zolfaghari Darzi<sup>1</sup>, Hamid Gorji<sup>1\*</sup>, Mohammad Bakhshi Jooybari<sup>1</sup>, Roohollah Jamaati<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

2- Department of Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

\* P.O.B. 484, Babol, Iran, hamidgorji@nit.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 7 August 2019  
First Decision: 5 October 2019  
Accepted: 10 December 2019

### Keywords:

Severe plastic deformation  
Hydro assisted tube pressing  
High strength tube  
Mechanical properties

### Abstract

Severe plastic deformation has been attracted the attention of researchers during the last couple of decades as a method to produce fine grain materials with high strength. In this study a new technique, called hydro assisted tube pressing (HATP), is proposed for severe plastic deformation of tubular materials. In this technique, unlike conventional methods, the fluid pressure is employed instead of die and mandrel, to maintain the geometry of the tube, and also to eliminate the die and tube surface contacts, making the required force in this process independent of the length of the tube. Each pass of the HATP process involves two half-cycles that by passing the tube through the deformation channel during the first and second half-cycle, respectively, the tube's diameter increases and decreases and imposing a plastic strain on the tube. Finite element simulation results showed that the force required in this technique is 60% less than that in the PTCAP technique for AL1050 with the specified dimensions. In this proposed technique, by increasing the length of the tube, the force will not increase, which is one of the advantages of this method for producing high strength tubes with large dimensions. The experiments on AA1050 tubular specimens showed that the yield and ultimate tensile strengths increase from 51 and 65 MPa to 78 and 96 MPa, respectively, after two passes of HATP. Moreover, the micro-hardness tests on the samples after three half-cycles showed an increase in the hardness from 28 to 35 HV.

### Please cite this article using:

A. A. Zolfaghari Darzi, H. Gorji, M. Bakhshi Jooybari, R. Jamaati, Hydro assisted tube pressing as a new severe plastic deformation method for producing high strength tubes, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 5, pp. 1- 13, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

**1- مقدمه**

لوله استحکام بالا با روش تغییر شکل پلاستیک شدید نشده‌اند. از این رو، نیاز به فرایندی جدید یا اصلاحی احساس شده است تا باعث رفع یا کاستن از محدودیت‌هایی مانند طول کم، نیروی زیاد، پلیسه شدید و عدم همگنی کرنش گردد و پتانسیل صنعتی شدن را نیز دارا باشد [10].

در این پژوهش، روشی جدید با عنوان پرس کاری لوله به کمک فشار سیال<sup>12</sup> برای تولید لوله‌های استحکام بالا ابداع شده است که در آن از فشار سیال برای انجام فرایند استفاده شده است. به کارگیری فشار سیال، باعث حذف تماس لوله با بدنه قالب و ماندن در آن می‌شود و قطعه تنها در یک ناحیه کوچک با قالب در تماس است. کوچک شدن ناحیه تماس سبب حذف بخش زیادی از نیروی اصطکاک می‌گردد که بخش اعظم نیروی مورد نیاز برای انجام فرایندهای SPD است. در این فرایند، با افزایش طول لوله، سطح تماس لوله با قالب ثابت می‌ماند و نیروی اصطکاک زیاد نمی‌شود. بنابراین تغییرات طول در مقدار نیروی اصطکاک تاثیر ندارد و محدودیت طول حذف می‌گردد.

آلومینیوم و آلیاژهای آن با نسبت استحکام به وزن بالا کاربرد بسیاری در صنایع گوناگون، به ویژه خودروسازی و هوافضا دارد. آلومینیوم سری 1000 در مقایسه با دیگر سری‌ها به دلیل ذرات رسوب کمتر، استحکام پایین به حساب می‌آید. با این حال، محققان از روش‌های SPD استفاده نموده‌اند تا با هزینه کم، استحکام این سری آلیاژ را افزایش دهند [13-16]. در این تحقیق، لوله‌هایی از جنس آلومینیوم 1050 با فرایند HATP فرآوری گردیده و خواص مکانیکی و رفتار مواد در این فرایند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. روش اجزای محدود برای بررسی رفتار تغییر شکل ماده در این فرایند مورد استفاده قرار گرفته است.

**2- فرایند پرس کاری لوله به کمک فشار سیال**

شماتیک فرایند HATP در شکل 1 نشان داده شده است. این فرایند از دو مرحله تشکیل می‌شود. در مرحله اول، مطابق شکل 1- الف لوله اولیه توسط ماندنرل و سنبه 1 موقعیت‌دهی می‌شود و با اجزای قالب هم‌محور می‌گردد. بعد از ورود سیال از مجرای 1 و پرکردن فضای بیرونی و درونی لوله و ایجاد فشار مورد نظر در محفظه 1، سنبه 1 به سمت پایین حرکت می‌کند. در اثر این حرکت، لوله از منطقه تغییر شکل که توسط ماندنرل و قالب ایجاد شده است، عبور می‌کند و قطر آن افزایش می‌یابد. بدین ترتیب، مطابق با شکل 2 در دو ناحیه، کرنش برشی بر لوله اعمال می‌شود. برای انجام مرحله دوم، مطابق با شکل 1- ج

در دو دهه اخیر تلاش‌های زیادی به منظور کاهش وزن سازه‌های فلزی صورت گرفته است. یکی از این موارد، جایگزینی قطعات فولادی با فلزات غیر آهنی فوق ریز دانه<sup>1</sup> و توخالی می‌باشد. مواد فوق ریزدانه تولید شده با روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید<sup>2</sup> به عنوان نسل جدیدی از محصولات فلزی مطرح هستند که خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها در مقایسه با مواد درشت دانه به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است [1]. در فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، اعمال کرنش برشی شدید همراه با فشار هیدرواستاتیکی زیاد، باعث افزایش چگالی نایجایی‌ها در شبکه کریستالی فلز و در نهایت باعث ریزش دانه‌ها می‌گردد [3]. از ابتدای مطرح شدن روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، فرایندهایی مانند پرس کاری در کانال‌های یکسان زاویه‌دار<sup>3</sup> [4] برای مواد حجمی و روش‌هایی هم‌چون اتصال نورد تجمعی<sup>4</sup> [5] برای مواد ورقی ارائه شده‌اند. با توجه به نیاز شدید صنایع به مواد توخالی و لوله‌ای شکل با نسبت استحکام به وزن بالا، توجه بسیاری از محققان در چند سال اخیر به ساخت لوله‌های ریزدانه و استحکام بالا جلب شده است. تاکنون روش‌هایی مانند پیچش فشار بالای لوله<sup>5</sup> [6]، اتصال چرخشی تجمعی<sup>6</sup> [7]، پرس کاری در کانال لوله‌ای<sup>7</sup> [8]، پرس کاری لوله در کانال‌های یکسان زاویه‌دار<sup>8</sup> [9]، پرس کاری در کانال لوله‌ای زاویه‌دار<sup>9</sup> [10]، پرس کاری در کانال زاویه‌دار لوله‌ای موازی<sup>10</sup> [11] و انبساط و اکستروژن تناوبی لوله<sup>11</sup> [12] برای فرآوری لوله‌های استحکام بالا ارائه شده‌اند. هر یک از روش‌های بیان شده دارای محدودیت‌های خاص خود می‌باشد. یکی از مهم‌ترین این محدودیت‌ها طول کم لوله است که با افزایش آن، انجام فرایند میسر نبوده و یا به‌خاطر تماس لوله با بدنه و ماندنرل و ایجاد نیروی اصطکاک زیاد نیاز به تجهیزات با تناژ بالا می‌باشد. همچنین پلیسه شدید و عدم همگنی کرنش نیز از محدودیت‌های برخی از روش‌های SPD لوله می‌باشد. به منظور تسهیل در انجام برخی از این فرایندها از ارتعاشات التراسونیک و فرایندهای ترکیبی استفاده شده است [10]. با این حال، هنوز تکنیک‌های ارائه شده منجر به صنعتی شدن تولید

<sup>1</sup> Ultra-Fine Grain (UFG)<sup>2</sup> Severe Plastic Deformation (SPD)<sup>3</sup> Equal Channel Angular Pressing (ECAP)<sup>4</sup> Accumulative Roll Bonding (ARB)<sup>5</sup> High Pressure Tube Twisting (HPTT)<sup>6</sup> Accumulative Spin Bonding (ASB)<sup>7</sup> Tubular Channel Pressing (TCP)<sup>8</sup> Tube Equal Channel Angular Pressing (Tube ECAP)<sup>9</sup> Tubular Channel Angular Pressing (TCAP)<sup>10</sup> Parallel Tubular Channel Angular Pressing (PTCAP)<sup>11</sup> Tube Cyclic Extrusion-Expansion (TCEE)<sup>12</sup> Hydro Assisted Tube Pressing (HATP)

همان‌گونه که از شکل 1 مشاهده می‌شود، در فرایند پرس کاری لوله به کمک فشار سیال، علاوه بر اعمال نیروی پرس، از فشار سیال نیز استفاده می‌شود. در نتیجه، هیچ تماسی بین جداره لوله و قالب وجود ندارد. این امر نه تنها موجب حذف سطح تماس جداره‌های داخلی و بیرونی لوله با قالب می‌شود بلکه منجر به جلوگیری از کمانش و چروکیدگی لوله نیز می‌گردد. به علاوه، حذف نیروی اصطکاک موجب کاهش قابل ملاحظه نیروی موردنیاز می‌شود و نیز از ایجاد پلیسه شدید جلوگیری می‌کند.

قالب 180 درجه چرخانده می‌شود و پایه 1 از مجموعه قالب خارج گردیده و از پایه 2 استفاده می‌شود. در ادامه، فشار سیال در محفظه 2 مطابق با مرحله قبل ایجاد می‌شود و سپس سنبه 2 لوله را در خلاف جهت مرحله قبل حرکت می‌دهد تا لوله به قطر اولیه برسد. در این مرحله نیز کرنش برشی در دو ناحیه مطابق با مرحله اول بر لوله وارد می‌شود. این فرایند را می‌توان طی چندین پاس انجام داد تا کرنش اعمالی بر لوله افزایش یابد و خواص مکانیکی مطلوب به دست آید.

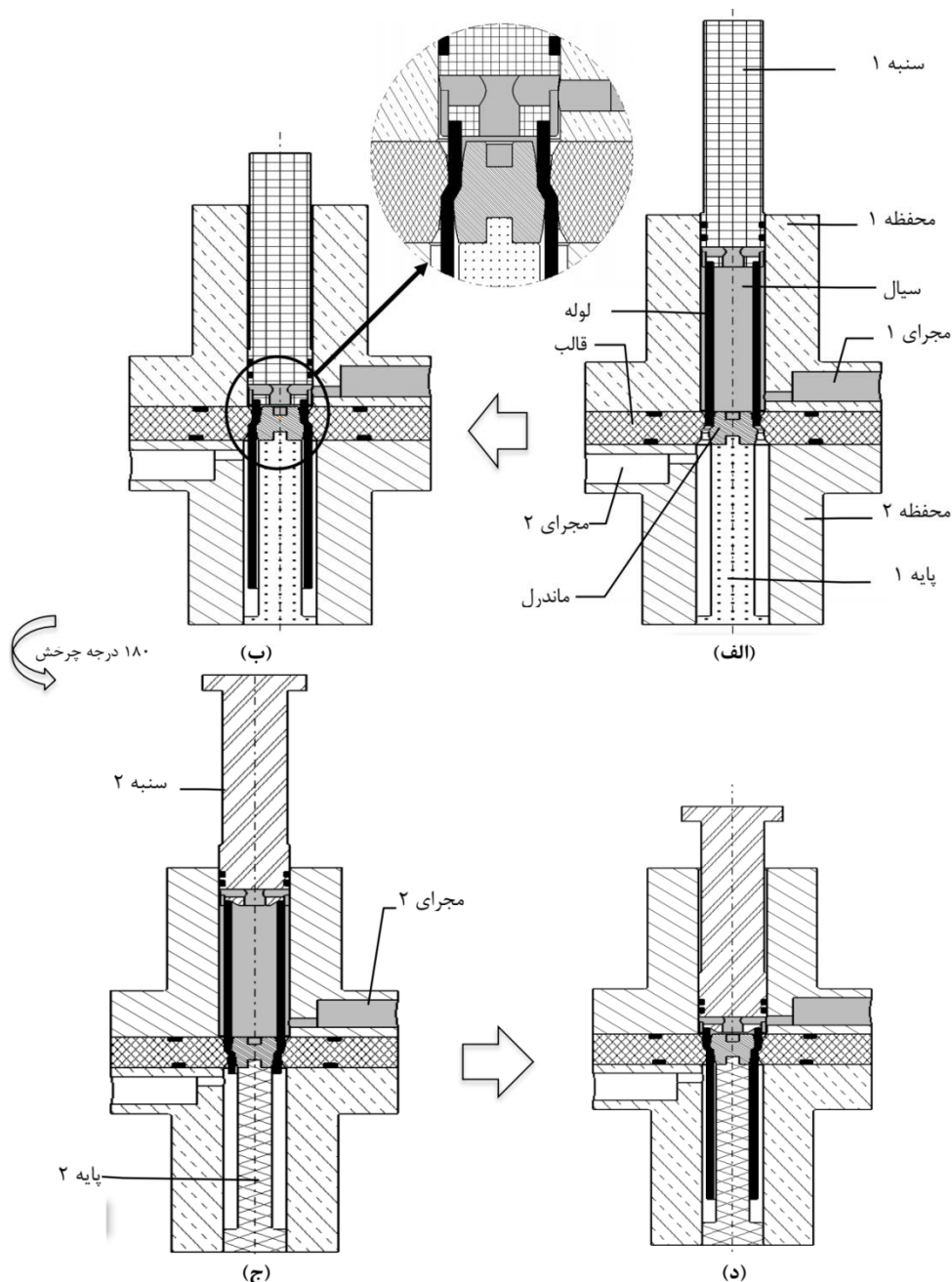


Fig. 1 Schematic of HATP process. (a) initial state, (b) final state of half cycle, (c) second half-cycle and (d) final state of second half-cycle

شکل 1 شماتیک فرایند پرس کاری لوله به کمک فشار سیال - ابتدای مرحله اول - ب - انتهای مرحله اول - ج - ابتدای مرحله دوم - د - انتهای مرحله دوم

این عملیات در دمای 350 درجه سانتیگراد و به مدت 3 ساعت انجام گردید و سپس نمونه‌ها در کوره سرد شدند. شکل 3 اجزای مجموعه قالب فرایند HATP را نشان می‌دهد. کلیه اجزا از فولاد CK45 ساخته شده‌اند. پارامترهای هندسی کانال در شکل 2، برای زاویه‌های کانال ( $\phi_1 = \phi_2$ ) برابر با 150 درجه و برای زاویه‌های گوشه ( $\psi_1 = \psi_2$ ) برابر با صفر تعیین شد. همچنین نسبت تغییر شکل ( $K = R_1 - R_2$ ) برابر با 0/6 ضخامت لوله ( $t$ ) در نظر گرفته شد.

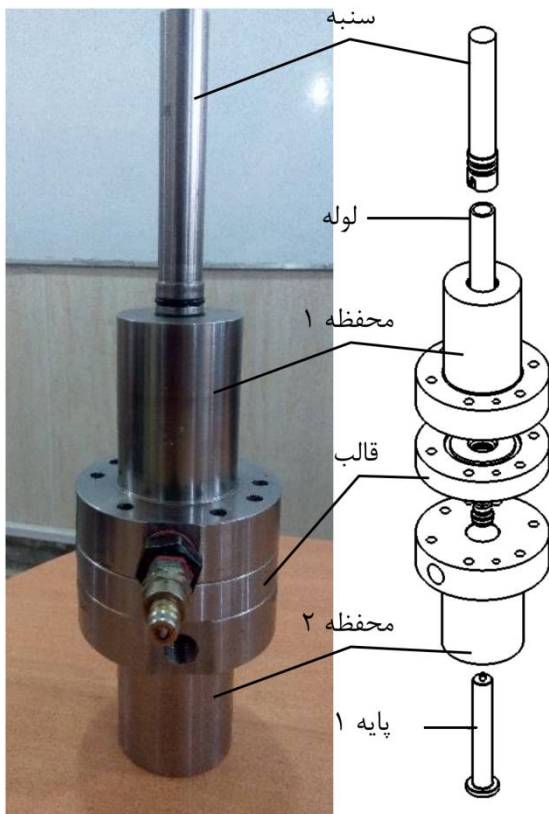


Fig. 3 The fabricated HATP die set

شکل 3 مجموعه قالب ساخته شده برای فرایند HATP

برای انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه آزمایش اونیورسال DMG با ظرفیت 600 کیلو نیوتن استفاده گردید. به علاوه، به منظور ایجاد فشار سیال، یک واحد فشار هیدرولیکی MAGNUS با ظرفیت 120 مگاپاسکال مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها با سرعت دستگاه 5 میلی‌متر بر دقیقه و در دمای محیط انجام گرفت. تجهیزات استفاده شده برای انجام فرایند HATP در شکل 4 نشان داده شده است. برای انجام آزمایش، بعد از آماده سازی مجموعه قالب و تجهیزات، فشار روغن به میزان 600 مگاپاسکال در محفظه قالب ایجاد گردید و فرایند HATP تا 2 پاس بر روی لوله‌های آلومینیومی انجام گردید.

در نهایت، لوله با صافی سطح مطلوب به دست می‌آید. در این فرایند، فشار سیال به دلیل اعمال نیرو به انتهای لوله در جهت حرکت باعث کاهش قابل ملاحظه نیروی شکل‌دهی می‌شود به طوری که در این قالب فقط با اعمال فشار سیال در حد مورد نظر و بدون حرکت سنبه قطعه از قالب خارج می‌شود. کرنش پلاستیک معادل بعد از  $N$  پاس فرایند پرس کاری لوله به کمک فشار سیال را می‌توان به صورت رابطه (1) محاسبه نمود [17].

$$\bar{\varepsilon}_{TN} = 2N \left\{ \sum_{i=1}^2 \left[ \frac{2 \cot(\phi_i/2 + \psi_i/2) + \psi_i \csc(\phi_i/2 + \psi_i/2)}{\sqrt{3}} \right] + \bar{\varepsilon}_\theta \right\} \quad (1)$$

$$\bar{\varepsilon}_\theta = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_\theta \quad (2)$$

$$\varepsilon_\theta = \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (3)$$

در رابطه‌های بالا مطابق با شکل 2،  $R_1$  و  $R_2$  به ترتیب میانگین شعاع‌های داخلی و خارجی لوله در هنگام ورود به کانال و خروج از آن می‌باشد.  $\phi_1$  و  $\phi_2$  زاویه‌های کانال و  $\psi_1$  و  $\psi_2$  زاویه‌های گوشه‌های کانال می‌باشند. مقدار کرنش پلاستیک معادل کل بعد از انجام یک پاس فرایند HATP با مقادیر پارامتر در نظر گرفته شده در این مقاله برابر با 1/3 می‌باشد.

### 3- آزمایش‌ها

در این پژوهش جهت پیاده‌سازی فرایند پرس کاری لوله به کمک فشار سیال، از لوله آلومینیومی 1050 استفاده گردید. نمونه‌های لوله‌ای شکل با قطر بیرونی 20، ضخامت 2/5 و طول 100 میلی‌متر به روش ماشین‌کاری تهیه شدند. قبل از انجام فرایند برای دستیابی به ساختار دانه‌بندی یکنواخت، نمونه‌ها تحت عملیات آنیل قرار گرفتند.

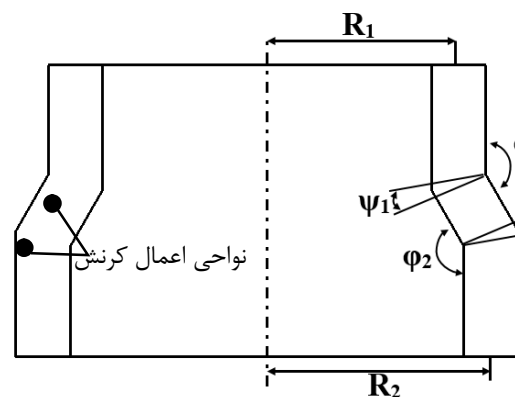


Fig. 2 Geometric parameters of HATP process

شکل 2 پارامترهای هندسی فرایند HATP

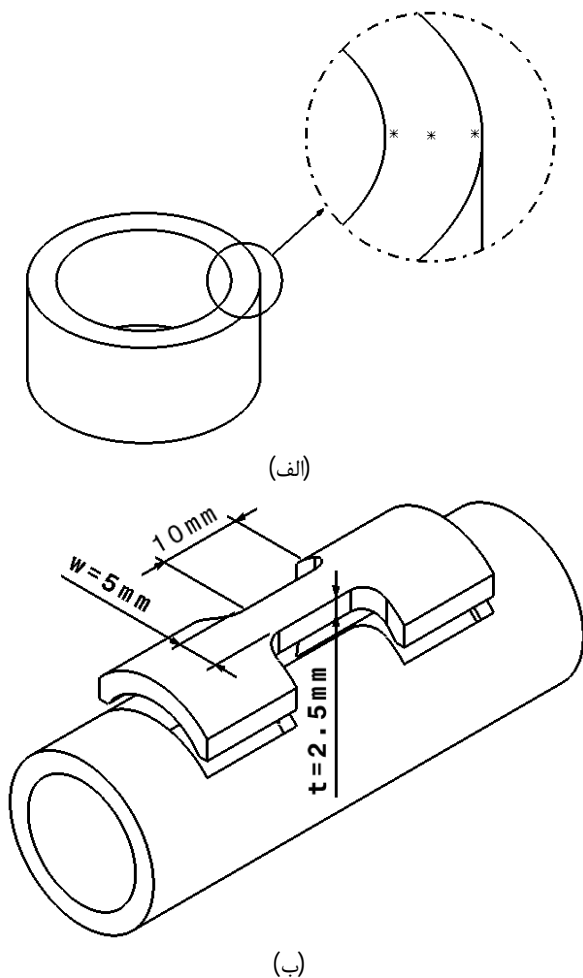


Fig. 5 (a) Locations for measuring Vickers micro hardness, (b) Configuration of the tensile specimens from the tube

شکل 5 (الف) موقعیت‌های اندازه‌گیری میکروسختی (ب) نمونه آزمون کشش [17]

به علت تقارن موجود در فرایندها، شبیه‌سازی به صورت متقارن محوری انجام پذیرفت. مدل‌های ایجاد شده برای انجام شبیه‌سازی در شکل 6 نشان داده است. ابعاد هندسی اجزای قالب و نمونه استفاده شده در شبیه‌سازی مطابق با روش تجربی در نظر گرفته شد. لوله به صورت شکل پذیر و تمامی اجزای قالب به صورت صلب در نظر گرفته شدند. رفتار اصطکاکی بین لوله و همه اجزای قالب، اصطکاک کولمبی و روش پنالتی در نظر گرفته شد [18] و ضریب اصطکاک نیز 0/05 در نظر گرفته شد [19]. به علت وجود سیال، ناحیه تماس بین محفظه سیال و لوله، بدون اصطکاک مدل گردید [19]. نمودار تنش- کرنش حقیقی حاصل از تست کشش لوله آنیل شده که در شکل 7 نشان داده شده، برای تعریف خواص لوله در شبیه‌سازی استفاده گردیده است.



واحد ثبت نیرو - جابجایی واحد ایجاد فشار سیال  
Fig. 4 HATP experimental test setup

شکل 4 مجموعه تجهیزات تجربی فرایند HATP

آزمون میکروسختی-سنجی در سطح مقطع عرضی برش خورده لوله مطابق با شکل 5- الف و با احتساب میانگینی از 3 نقطه تحت بار 100 گرم و به مدت 10 ثانیه طبق استاندارد ASTM-E384 انجام گرفت. نمونه آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM-E8 در جهت طولی لوله بعد از تعداد پاس‌های مختلف با استفاده از وایرکات تهیه شد و ابعاد نمونه مطابق با شکل 5- ب انتخاب گردید [17]. این آزمون در دمای اتاق و با نرخ کرنش  $2/6 \times 10^{-3}$  با استفاده از دستگاه SANTAM انجام گردید. به منظور بررسی کیفیت سطح نمونه‌های تولید شده، زبری سطح با استفاده از دستگاه زبری سنج تایم<sup>1</sup> مدل TR200 به صورت میانگین 3 نقطه تصادفی بر روی سطح بیرونی و در طول نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

#### 4- شبیه‌سازی اجزای محدود

با شبیه‌سازی فرایند پرس‌کاری لوله به کمک فشار سیال، پارامترهایی نظیر میزان کرنش پلاستیک مؤثر و نیروی شکل‌دهی مورد نیاز مورد بررسی قرار گرفتند. برای انجام شبیه‌سازی عددی از نرم افزار اجزای محدود آباکوس 6-13 و از حل گر صریح استفاده شده است. به جهت مقایسه نیروی مورد نیاز و توزیع کرنش در فرایندهای HATP و PTCAP، هر دو فرایند مذکور شبیه‌سازی شده‌اند. ابعاد قالب و لوله برای دو فرایند یکسان در نظر گرفته شد و تمامی شرایط شبیه‌سازی مانند شرایط تماسی، اصطکاکی و نوع المان‌ها برای دو فرایند به صورت مشابه تعریف گردید.

<sup>1</sup> TIME

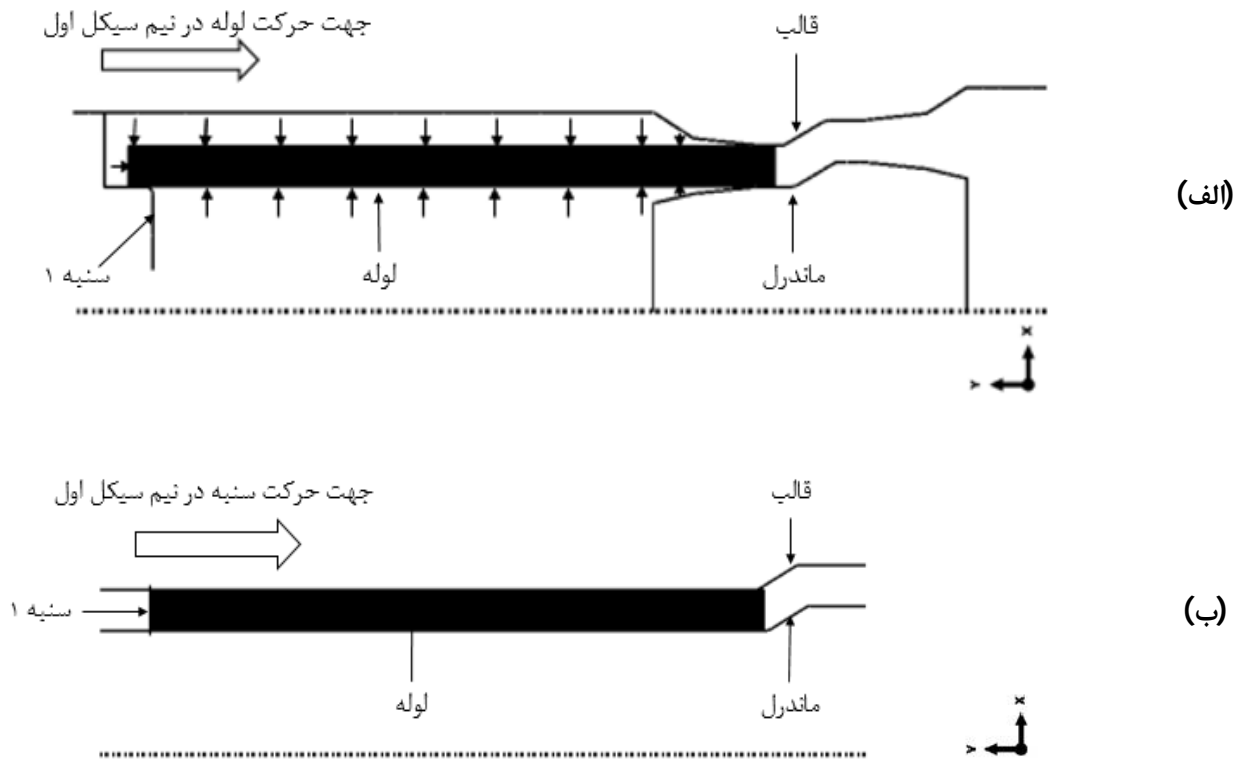


Fig. 6 FE model of (a) HATP and (b) PTCAP process

شکل 6 مدل اجزای محدود فرایند (الف) HATP و (ب) PTCAP

برای بررسی همگرایی مش در راستای طولی، اثر اندازه مش‌های 1، 0/75، 0/5، 0/4 و 0/375 میلی‌متر بر روی مقدار کرنش پلاستیک معادل در وسط ضخامت و به فاصله 20 میلی‌متر از سر لوله بررسی شد. بر اساس نمودار همگرایی مش نشان داده شده در شکل 8، اندازه المان 0/5 میلی‌متر (تعداد 200 المان) در راستای طول، انتخاب گردید. با توجه به مقادیر بالای کرنش‌ها و تغییر شکل‌های زیاد در حین شبیه‌سازی فرایند، برای جلوگیری از اعوجاج بیش از حد المان‌ها و تسهیل همگرایی از روش مش‌بندی تطبیقی<sup>2</sup> یا مش‌بندی مجدد اتوماتیک<sup>3</sup> استفاده شد [18].

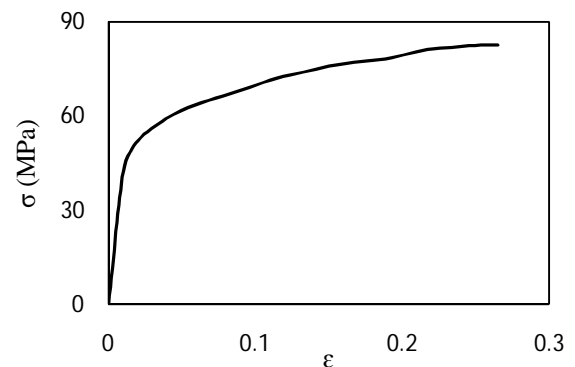


Fig. 7 stress-strain curve of annealed Al 1050

شکل 7 نمودار تنش کرنش حقیقی آلومینیوم 1050 آنیل شده

جدول 1 خواص مکانیکی و فیزیکی آلومینیوم 1050

Table 1 The mechanical and physical properties of Al 1050

مقدار	کمیت
2700	چگالی، $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) [20]
68	مدول یانگ، $E$ (GPa) [20]
0/33	نسبت پواسون، $\nu$ [20]
51	تنش تسلیم، $YS$ (MPa)

خواص مکانیکی و فیزیکی آلومینیوم 1050 در جدول 1 ارائه شده‌است. جهت اعمال توزیع فشار سیال بر جداره‌های داخلی و بیرونی لوله در هر لحظه، زیربرنامه<sup>1</sup> VDLOAD در نرم افزار Visual Studio نوشته شد و به نرم‌افزار آباکوس معرفی گردید. برای لوله المان‌های از نوع متقارن و چهار گره‌ای (CAX4R) انتخاب شد و برای مدل‌سازی مناسب تغییر شکل لوله، در راستای ضخامت 10 المان در نظر گرفته شد. همچنین

<sup>2</sup> Adaptive meshing

<sup>3</sup> Automatic remeshing

<sup>1</sup> subroutine

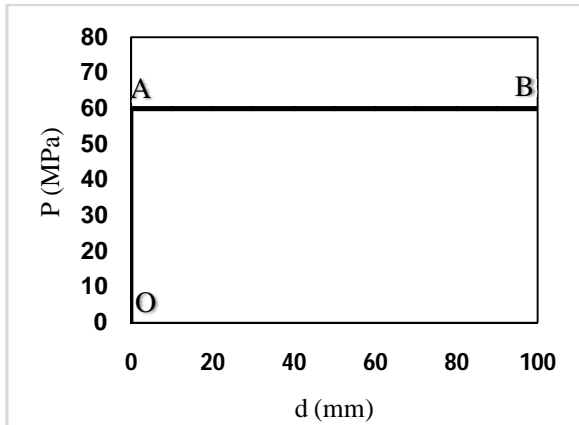


Fig. 9 Pressure-tube displacement curve used for HATP process.

شکل 9 منحنی فشار سیال - جابجایی لوله استفاده شده برای فرایند HATP

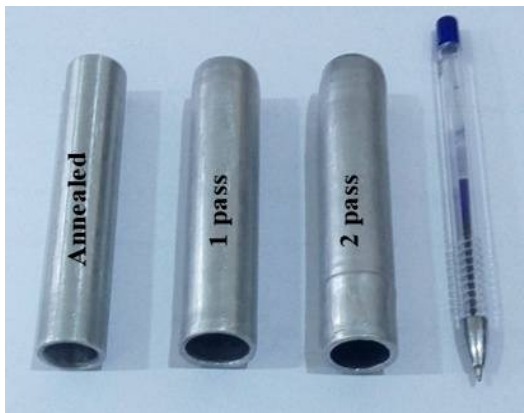


Fig. 10 Initial specimen and the HATP processed specimen by 1 to 2 HATP passes

شکل 10 نمونه آنیل شده و نمونه‌های تولید شده پس از پاس‌های 1 و 2 در فرایند HATP

همراه با افزایش میزان کرنش توسط فرایند HATP، میزان میکروسختی نیز افزایش پیدا کرده است که در مرحله ابتدایی نرخ افزایش میکروسختی بیشتر بوده است. محققان افزایش میکروسختی با نرخ بیشتر در مرحله ابتدایی اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید را به کرنش سختی ناشی از افزایش نابجایی‌ها و شکل‌گیری زیردانه<sup>1</sup> نسبت داده‌اند [13، 16، 21].

همچنین مشاهده شده است که در مراحل بعدی با افزایش کرنش، نرخ افزایش میکروسختی نسبت به مرحله ابتدایی کاهش داشته است.

در تحقیقات قبلی، کاهش نرخ افزایش میکروسختی همراه با افزایش کرنش اعمالی به نمونه در فرایندهای SPD به اثر پدیده بازجایی دینامیکی<sup>2</sup> ربط داده شده است [12، 13، 21، 22]. در ابتدا که انرژی درونی ماده پایین است، سرعت فرایندهایی که

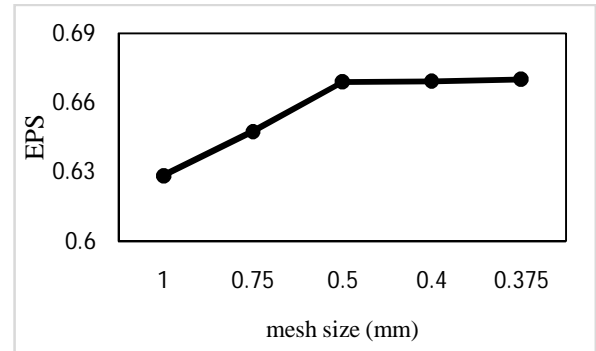


Fig. 8 Influence of element size on equivalent plastic strain

شکل 8 تاثیر اندازه المان بر روی کرنش پلاستیک معادل

منحنی فشار سیال-جابجایی لوله نشان داده شده در شکل 9 برای انجام شبیه‌سازی و آزمایش تجربی فرایند HATP استفاده گردید. شبیه‌سازی فرایند HATP شامل 2 مرحله بوده که در مرحله اول فشار سیال در داخل و خارج لوله ایجاد می‌شود. فشار به مقداری افزایش می‌یابد که لوله شروع به حرکت و عبور از کانال تغییر شکل نماید و در این فشار، لوله در حین حرکت و جابجایی دچار کماتش و چروکیدگی نگردد. با ثابت نگه داشتن فشار سیال، حرکت لوله ادامه پیدا می‌کند، به گونه‌ای که بدون چروکیدگی و به صورت کامل از منطقه تغییر شکل عبور نموده و دچار افزایش قطر می‌گردد. نیم سیکل دوم فرایند نیز به همین روال انجام می‌پذیرد، با این تفاوت که جهت حرکت لوله بر عکس نیم‌سیکل اول بوده و با کاهش قطر، لوله به قطر اولیه خود برمی‌گردد.

## 5- نتایج و بحث

در شکل 10 تصویر لوله‌های آنیل شده و تولید شده پس از پاس‌های 1 و 2 در فرایند HATP نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود لوله با پارامترهای انتخاب شده با کیفیت بالایی فرآوری گردید و پلیسه‌ای در لوله ایجاد نشده است. در عمل مشاهده شد که در انتهای فرایند بدون باز نمودن قالب، لوله به آسانی از قالب خارج گردید.

## 5-1- میکروسختی

شکل 11- الف تغییرات میانگین میکروسختی سطح مقطع لوله را بر حسب کرنش معادل نشان می‌دهد. مقدار کرنش معادل از رابطه (1) به دست آمده است.

ملاحظه می‌شود که میکروسختی نمونه‌های آنیل شده از 28 ویکرز، بعد از نیم‌سیکل‌های اول و سوم فرایند HATP به ترتیب به 33 و 35 ویکرز افزایش یافت.

<sup>1</sup> Sub-grain

<sup>2</sup> Dynamic recovery

روند افزایش میزان سختی با افزایش کرنش اعمالی در HATP و نرخ بیشتر افزایش سختی در پاس ابتدایی و نرخ کمتر در پاس بالاتر در فرایند HATP مطابق با دیگر فرایندهای SPD مانند TTP [16]، TCP [8] و CFS [15] برای آلومینیوم 1050 می باشد.

### 5-2- خواص کششی

منحنی های تنش-کرنش نمونه آنیل شده و نمونه های یک و دو پاس HATP شده در شکل 12 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود میزان استحکام تسلیم و استحکام نهایی به صورت قابل توجهی بعد از فرایند HATP افزایش یافته است، درحالی که درصد تغییر طول نهایی نمونه های فرآوری شده نسبت به نمونه آنیل شده، کاهش یافته است. طبق این شکل، استحکام تسلیم و استحکام نهایی در پاس اول HATP افزایش چشمگیری داشته اند. در این پاس، استحکام تسلیم 43 درصد افزایش یافت و از مقدار اولیه 51 مگاپاسکال به 73 مگاپاسکال رسید. بعد از انجام پاس دوم، استحکام تسلیم با افزایش ناچیز به 78 مگاپاسکال رسید. استحکام نهایی نمونه قبل از فرایند HATP، 65 مگاپاسکال بوده که بعد از یک پاس به 89 مگاپاسکال رسید که حدود 37 درصد افزایش یافت. مشابه استحکام تسلیم، استحکام نهایی نیز در پاس دوم نسبت به پاس اول افزایش کمتری داشته و به 96 مگاپاسکال افزایش یافت. از این رو می توان گفت که انجام 2 پاس فرایند HATP باعث بهبود خواص مکانیکی لوله از جنس آلومینیوم 1050 گردیده است.

فرایند HATP مانند روش های دیگر SPD سبب افزایش حد تسلیم و استحکام کششی لوله فلزی می گردد. در تحقیقات پیشین افزایش حد تسلیم و استحکام کششی در روش های SPD را به کاهش اندازه دانه ها و افزایش چگالی نابجایی ها نسبت داده اند [13، 16، 23]. همانند دیگر روش های SPD، در فرایند HATP آلومینیوم 1050، نرخ افزایش استحکام در پاس اول بیشتر بوده و در پاس دوم کاهش می یابد و به حالت اشباع نزدیک می گردد [8، 13، 15].

### 5-3- کیفیت سطح

مقادیر پارامتر زبری Ra برای نمونه های آنیل شده و فرآوری شده توسط فرایند HATP در جدول 2 ارائه شده است. Ra نمونه اولیه که به صورت ماشین کاری ایجاد گردید برابر با 3/886 میکرومتر بوده است. بعد از انجام نیم سیکل اول و افزایش قطر نمونه، صافی سطح نمونه بهبود چشمگیری پیدا نموده و مقدار Ra به 0/420 میکرومتر کاهش یافت.

باعث کاهش چگالی نابجایی می شوند، کم می باشد و چگالی نابجایی ها افزایش می یابد [22]. با افزایش کرنش، سطح انرژی ماده افزایش می یابد و سرعت فرایندهای صعود و لغزش زیاد می شود [22]. از طرف دیگر نیروی محرکه برای فرایندهایی که نابجایی ها را مصرف می کنند، بیشتر می گردد. از این رو، سرعت افزایش چگالی نابجایی ها و میکروسختی کاهش می یابد [13، 21، 22]. در شکل 11- ب مقادیر میکروسختی حاصل شده در مقادیر مختلف کرنش برای لوله های از جنس آلومینیوم خالص برای فرایند HATP و برخی از روش های SPD لوله نشان داده شده است.

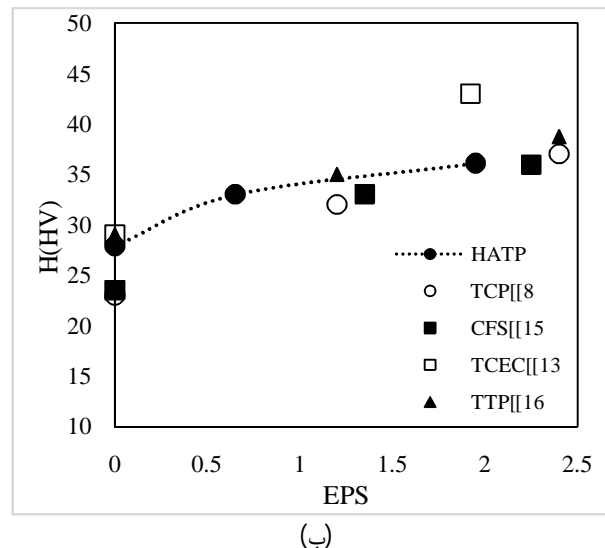
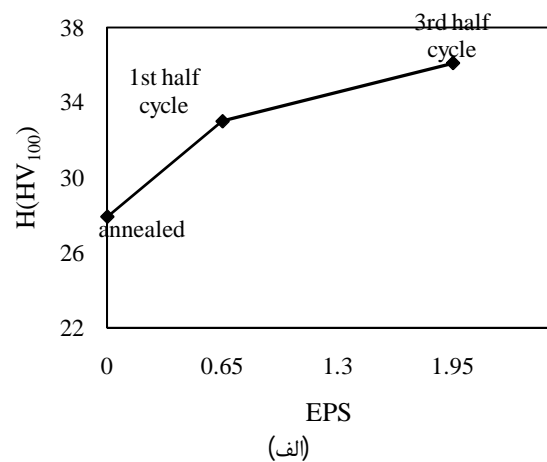


Fig. 11 a) Microhardness values of processed 1050 aluminum tube after three HATP cycles versus equivalent strain b) Microhardness data for commercial purity Al after processing by HATP and other SPD methods

شکل 11 الف) مقادیر میکروسختی لوله آلومینیومی 1050 بعد از پاس های مختلف HATP ب) مقادیر میکروسختی در نمونه آلومینیومی بعد از انجام فرایند HATP و دیگر روش های SPD



انتهای لوله به حرکت لوله در قالب کمک می‌کند. در نیم‌سیکل اول و دوم به ترتیب با ایجاد فشار 60 و 65 مگاپاسکال لوله بدون فشار سنبه از قالب خارج می‌شود.

توزیع کرنش پلاستیک معادل در امتداد ضخامت لوله در نیم‌سیکل‌های اول و دوم در شکل 14- الف نشان داده شده است. کمترین و بیشترین مقدار کرنش پلاستیک معادل در ضخامت لوله بعد از پاس اول فرایند، به ترتیب 1/2 و 1/35 مشاهده می‌شود. در فرایند HATP، توزیع کرنش همگن‌تری در راستای ضخامت لوله نسبت به برخی از فرایندهای SPD نظیر ASB [7]، [14] RPTS، [6] HPTT، [24] TRE حاصل می‌گردد. منحنی توزیع کرنش در راستای طول لوله در شکل 14- ب نشان دهنده این است که در طول لوله کرنش به صورت همگن توزیع شده است و در دو انتهای لوله منطقه مرده یا تغییر شکل نیافته وجود ندارد، در صورتی که در روش‌هایی مانند PTCAP [11]، [8] TCP و [15] CFS در دو سر نمونه منطقه مرده وجود دارد. همچنین مقدار متوسط کرنش پلاستیک معادل شبیه سازی شده در ضخامت لوله، بعد از یک پاس فرایند HATP، برابر با 1/27 بوده است که با مقدار 1/3 محاسبه شده به روش تئوری تطابق خوبی دارد.

مقایسه نیروی مورد نیاز استخراج شده از شبیه‌سازی و روش تجربی در شکل 15 نشان داده شده است. با انجام شبیه‌سازی فرایند HATP، نیروی مورد نیاز برای انجام نیم‌سیکل اول و دوم بر روی لوله آلومینیومی 1050 با طول 100 میلی‌متر به ترتیب برابر با 27/13 و 37/26 کیلونیوتن می‌باشد. در آزمایش تجربی بیشینه نیرو برای نیم‌سیکل اول 26 کیلونیوتن و برای نیم‌سیکل دوم 35 کیلونیوتن ثبت گردید.

قابل ذکر است که مطابق با شکل 13 در فرایند HATP، بدون حرکت سنبه و فقط با فشار سیال، لوله از کانال تغییر شکل عبور نموده است و نمودار نیروی نشان داده شده در شکل 15 در اثر اعمال فشار سیال بر سنبه ایجاد می‌گردد. شکل 16- الف مقایسه، نمودار نیروی مورد نیاز برای انجام فرایند HATP و PTCAP را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با پارامترهای انتخاب شده در این پژوهش، نیروی مورد نیاز فرایند HATP حدود 60 درصد کمتر از فرایند PTCAP می‌باشد.

نیروی شبیه سازی برای لوله با طول 200 میلی‌متر نیز در شکل 16- ب نشان داده شده است، همان‌طور که در شکل نشان داده شده در فرایند PTCAP نیروی 620 کیلونیوتن نیاز می‌باشد که عملاً نشان دهنده چسبیدن لوله به قالب و عدم امکان انجام فرایند می‌باشد، درحالی‌که با دو برابر شدن طول لوله مقدار نیروی فرایند HATP افزایش نداشته است.

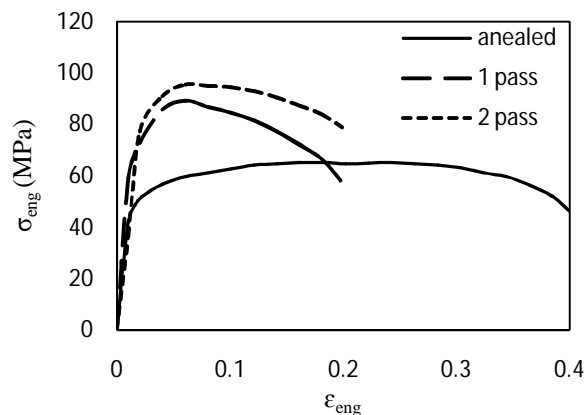


Fig. 12 Engineering stress-strain curves of different passes of HATP

شکل 12 نمودارهای تنش-کرنش پس از پاس‌های مختلف فرایند HATP

جدول 2 مقادیر زبری سطح اندازه گیری شده

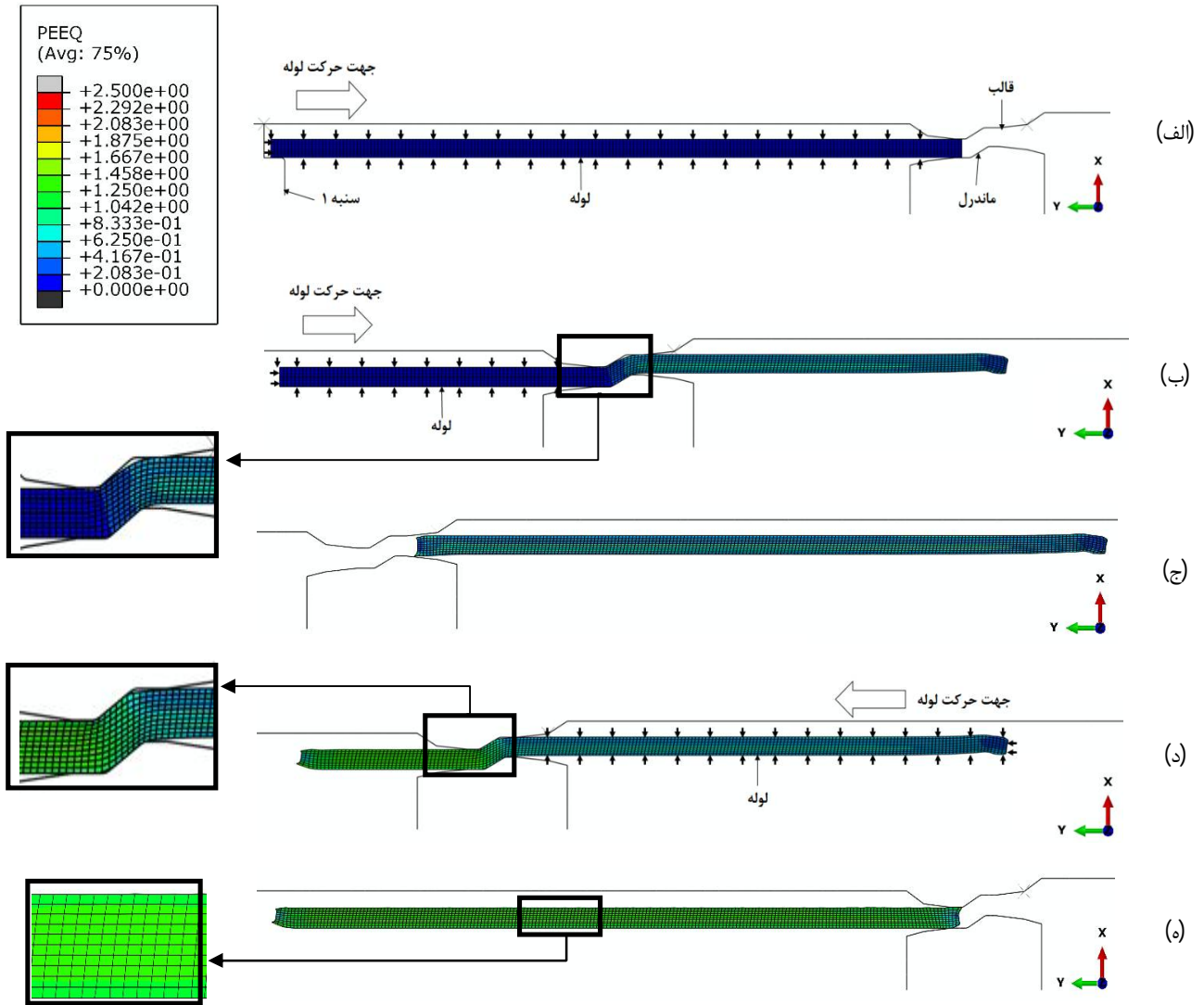
Table 2 Measured surface roughness values

Ra (μm)	نمونه
3/886	نمونه آنبیل شده
0/420	نیم سیکل اول
1/759	نیم سیکل دوم
1/048	نیم سیکل سوم
2/121	نیم سیکل چهارم

بعد از انجام نیم سیکل دوم و بازگشت قطر لوله به قطر اولیه، Ra افزایش پیدا نموده و برابر با 1/759 میکرومتر گردید. مقدار Ra برای نیم سیکل‌های سوم و چهارم نیز به ترتیب برابر با 1/048 و 2/121 میکرومتر بوده است. لذا می‌توان گفت که در ابتدا به دلیل اینکه میزان سختی نمونه آنبیل شده پایین بوده، بعد از نیم سیکل اول در اثر عبور لوله از کانال تغییر شکل و افزایش قطر، سطح نمونه کشیده شده و زبری نمونه کاهش چشمگیری پیدا کرده است و در نیم سیکل دوم به دلیل کاهش قطر و جمع شدن سطح لوله، زبری افزایش پیدا کرده است. این روند برای پاس دوم نیز صدق می‌کند با این تفاوت که چون در پاس دوم میزان سختی نمونه افزایش پیدا نموده است، میزان کاهش زبری در اثر افزایش قطر و افزایش زبری در اثر کاهش قطر نمونه، کمتر از پاس اول بوده است. عدم تشکیل پلیسه و صافی سطح مطلوب در نمونه‌های تولید شده به روش HATP در اثر حذف تماس اصطکاکی بین لوله و قالب را می‌توان یکی از مزایای روش HATP نسبت به فرایندهای دیگر SPD برشمرد.

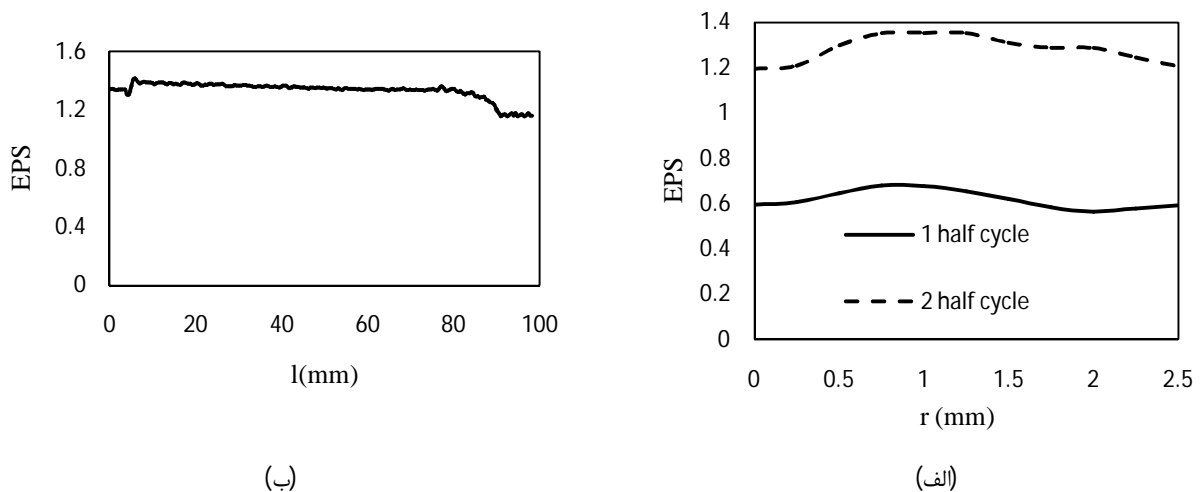
#### 4-5- نتایج شبیه‌سازی

شکل 13 نحوه انجام فرایند HATP را با استفاده از شبیه سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود فشار سیال باعث جلوگیری از کماتش و خمش قطعه می‌شود و در



**Fig. 13** True sequence of forming and strain distribution on the tube in (a)initial state of first half cycle, (b) half cycle, (c) final state of half cycle, (d) 2<sup>nd</sup> half cycle and (e) final state of half cycle in HATP

شکل 13 نحوه شکل دهی و توزیع کرنش بر لوله در فرایند HATP (الف) ابتدای نیم سیکل اول، (ب) نیم سیکل اول، (ج) انتهای نیم سیکل اول، (د) نیم سیکل دوم و (ه) انتهای نیم سیکل دوم



**Fig. 14** (a) Equivalent plastic strain in tube thickness (b) Equivalent plastic strain in tube length

شکل 14 (الف) کرنش پلاستیک معادل در امتداد ضخامت لوله و در پاس های مختلف (ب) کرنش پلاستیک معادل در امتداد طول لوله

روش جهت تولید لوله‌های استحکام بالا و با طول بلند امکان‌پذیر می‌باشد. برای اثبات کاربردی بودن روش HATP، لوله از جنس آلومینیوم 1050 به این روش فرآوری گردید و شبیه‌سازی اجزا محدود نیز انجام پذیرفت. نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر بدست آمد:

- لوله از جنس آلومینیوم 1050 با موفقیت تا 2 پاس به روش HATP فرآوری گردید.

- آزمون کشش نشان داد که بعد از انجام دو پاس فرایند HATP، مقدار استحکام تسلیم با 53 درصد افزایش، از مقدار اولیه 51 مگاپاسکال به 78 مگاپاسکال افزایش یافت و همچنین استحکام نهایی 48 درصد افزایش یافت.

- میزان میکروسختی از مقدار اولیه 28 ویکرز برای نمونه آنیل شده بعد از 3 مرحله به 35 ویکرز افزایش یافت.

- استفاده از روش HATP برای فرآوری لوله‌های استحکام بالا و با طول بلند امکان‌پذیر می‌باشد.

- روش HATP دارای قابلیت تولید لوله‌های با کیفیت سطح خوب و بدون پلیسه می‌باشد.

- میزان کرنش پلاستیک معادل ایجاد شده در لوله، بعد از یک پاس فرایند HATP، برابر با 1/27 بوده است.

- میزان نیروی مورد نیاز فرایند HATP، برای جنس و ابعاد انتخاب شده در این پژوهش، 60 درصد کمتر از فرایند PTCAP می‌باشد.

- در فرایند HATP به دلیل عدم وجود اصطکاک، نیروی فرایند مستقل از طول لوله می‌باشد در صورتی که در فرایند PTCAP با دو برابر شدن طول لوله نیروی موردنیاز 9 برابر می‌گردد.

## 7- فهرست علائم

$YS$	حد تسلیم (MPa)
$UTS$	استحکام نهایی (MPa)
$P$	فشار سیال (MPa)
$d$	جابجایی طولی لوله (mm)
$t$	ضخامت لوله (mm)
$r$	فاصله از سطح داخلی لوله (mm)
$l$	فاصله طولی از سر لوله (mm)
$R_1$	شعاع اولیه لوله
$R_2$	شعاع ثانویه لوله
$N$	تعداد پاس
$K$	نسبت تغییر شکل

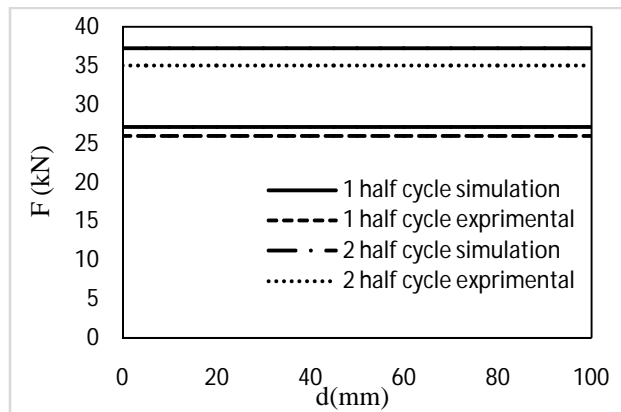
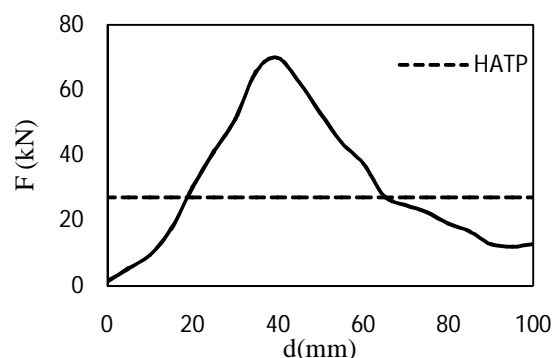
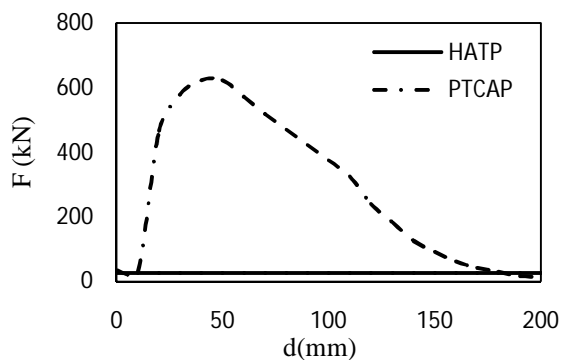


Fig. 15 Compare simulation and experimental force in HATP process

شکل 15 نیروی حاصل از شبیه‌سازی و روش تجربی فرایند HATP



(الف)



(ب)

Fig. 16 Compare HATP and PTCAP load for tube length (a) 100mm (b) 200mm

شکل 16 مقایسه نیروی فرایند HATP و PTCAP برای لوله به طول (الف) 100 میلی‌متر (ب) 200 میلی‌متر

## 6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرایند پرس‌کاری لوله به کمک فشار سیال (HATP) به عنوان یک روش جدید تغییر شکل پلاستیک شدید جهت تولید لوله‌های استحکام بالا با طول بلند ارائه گردید. به دلیل حذف اصطکاک بین قالب و لوله، نیروی موردنیاز فرایند HATP مستقل از طول لوله بوده و امکان استفاده از این

- [10] G. Faraji, H. S. Kim, Review of principles and methods of severe plastic deformation for producing ultrafine-grained tubes, *Materials Science and Technology*, Vol. 33, No. 8, pp. 905-923, 2017.
- [11] M. Javidikia, R. Hashemi, Analysis and Simulation of Parallel Tubular Channel Angular Pressing of Al 5083 Tube, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 70, No. 10, pp. 2547-2553, 2017.
- [12] A. Babaei, M. M. Mashhadi, H. Jafarzadeh, Tube cyclic expansion-extrusion (TCEE) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes, *Journal of materials science*, Vol. 49, No. 8, pp. 3158-3165, 2014.
- [13] A. Babaei, M.M. Mashhadi, Characterization of ultrafine-grained aluminum tubes processed by Tube Cyclic Extrusion-Compression (TCEC), *Materials Characterization*, Vol. 95, pp. 118-128, 2014.
- [14] O. Shapourgan, G. Faraji, Rubber pad tube straining as a new severe plastic deformation method for thin-walled cylindrical tubes, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 230, No. 10, pp. 1845-1854, 2016.
- [15] H. Torabzadeh, G. Faraji, E. Zalnezhad, Cyclic Flaring and Sinking (CFS) as a New Severe Plastic Deformation Method for Thin-walled Cylindrical Tubes, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 69, No. 6, pp. 1217-1222, 2016.
- [16] A. Babaei, H. Jafarzadeh, F. Esmaili, Tube Twist Pressing (TTP) as a New Severe Plastic Deformation Method, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 73, No. 3, pp. 639-648, 2018.
- [17] G. Faraji, S. Roostae, A. Seyyed Nosrati, J. Y. Kang, H. S. Kim, Microstructure and Mechanical Properties of Ultra-fine-Grained Al-Mg-Si Tubes Produced by Parallel Tubular Channel Angular Pressing Process, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 46, No. 4, pp. 1805-1813, 2015.
- [18] M. Ghadiri, M. M. Mashhadi, M. Ghamami, Study of effective parameters of Parallel Tubular Channel Angular Pressing (PTCAP), *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 27-33, 2015. (in Persian فارسی)
- [19] G. Faraji, M. M. Mashhadi, S.H. Joo, H. S. Kim, Hydrostatic radial forward tube extrusion as a new plastic deformation method for producing seamless tube, *Reviews on advanced materials science*, Vol. 88, No. 1-4, pp. 291-301, 2017.
- [20] *1050-O Aluminum*, Accessed on 8 September 2018; <https://www.makeitfrom.com/material-properties/1050-O-Aluminum>.
- [21] H. Jafarzadeh, K. Abrinia, A. Babaei, Fabrication of ultra-fine grained aluminium tubes by RTES technique, *Materials Characterization*, Vol. 102, pp. 1-8, 2015.
- [22] M. Honarpisheh, F. Nazari, V. Ebrahimpoor, Investigation of the effect of Constrained Groove Pressing (CGP) process on the copper sheets, *Iranian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 19, pp. 6-18, 2017. (in Persian فارسی)

$H$	سختی (HV)
$EPS$	کرنش پلاستیک معادل
$F$	نیرو (kN)
$\mu$	ضریب اصطکاک
$\varepsilon$	کرنش
$\sigma$	تنش (MPa)
$\varphi$	زاویه کانال (درجه)
$\Psi$	زاویه گوشه (درجه)

## 8- مراجع

- [1] M. Kawasaki, T. G. Langdon, Principles of superplasticity in ultrafine-grained materials, *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 5, pp. 1782-1796, 2007.
- [2] K. Mathis, J. Gubiczac, N.H. Nam, Microstructure and mechanical behavior of AZ91 Mg alloy processed by equal channel angular pressing, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 394, No. 1-2, pp. 194-199, 2005.
- [3] R. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T. Langdon, M. Zechetbauer, Y. Zhu, Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation, *JOM*, Vol. 58, No. 4, pp. 33-39, 2006.
- [4] F. Djavanroodi, M. Ebrahimi, Effect of die channel angle, friction and back pressure in the equal channel angular pressing using 3D finite element simulation, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, No. 4-5, pp. 1230-1235, 2010.
- [5] H. Pirgazi, A. Akbarzadeh, R. Petrov, L. Kestens, Microstructure evolution and mechanical properties of AA1100 aluminum sheet processed by accumulative roll bonding, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 497, No. 1-2, pp. 132-138, 2008.
- [6] M. Arzaghi, J.J. Fundenberger, L.S. Toth, R. Arruffat, L. Faure, B. Beausir, X. Sauvage, Microstructure, texture and mechanical properties of aluminum processed by high-pressure tube twisting, *Acta Materialia*, Vol. 60, No. 11, pp. 4393-4408, 2012.
- [7] M.S. Mohebbi, A. Akbarzadeh, Accumulative spin-bonding (ASB) as a novel SPD process for fabrication of nanostructured tubes, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, No. 1, pp. 180-188, 2010.
- [8] A. Zangiabadi, M. Kazeminezhad, Development of a novel severe plastic deformation method for tubular materials: Tube Channel Pressing (TCP), *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, No. 15, pp. 5066-5072, 2011.
- [9] F. Djavanroodi, A.A. Zolfaghari, M. Ebrahimi, K.M. Nikbin, Equal Channel Angular Pressing of Tubular Samples, *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*, Vol. 26, No. 5, pp. 574-580, 2013.

2016. (in Persian فارسی)  
[24] H. Jafarzadeh, A. Babaei, Tube Reversing and Extrusion (TRE) as a Novel Method for Producing UFG Thin Tubes, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 70, No. 4, pp. 979-988, 2017.

[23] H. T. Kashi, J. S. Karami, K. M. Fard, Experimental and numerical study of mechanical influence of cyclic flaring and sinking (CFS) method to produce strong copper tubes, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 20-27,