



Numerical and Experimental Investigation of Thin-Walled Bimetallic Aluminum Tubes (AA5000/AA7000) Fabricated by the Direct Extrusion Process

Hossein Jafarzadeh^{1*}, Elyas Haddadi²

¹ Department of Mechanical Engineering, Ta C., Islamic Azad University, Tabriz branch, Tabriz, Iran.

² Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 18.11.2025

Revised: 15.04.2026

Accepted: 31.05.2026

Keyword:

Extrusion process

Bimetallic tubes

Aluminum alloys 5000 and 7000

Finite element analysis

Thin-walled composites

Corresponding Author:

Hossein Jafarzadeh

Email: h.jafarzadeh@iaut.ac.ir

ABSTRACT

In this study, the direct extrusion process was numerically and experimentally investigated to produce thin-walled bimetallic aluminum tubes composed of AA5000 and AA7000 alloys. A floating- punch extrusion die was designed and fabricated, and experiments were performed on a 300-ton hydraulic press at temperatures of 200°C and 300°C with a ram speed of 3 m/min. Finite element analysis (FEA) was employed to evaluate the equivalent stress, strain, and wall thickness distribution in both core and shell regions. Results indicated that at 200°C, the maximum equivalent stress reached 348 MPa and the equivalent strain was 3.29, while at 300°C, these values decreased to 188 MPa and 2.65, respectively. The Brinell hardness test revealed a gradient from 108 HB in the outer shell to 65 HB in the inner core, indicating proper metallurgical bonding. Metallographic analysis confirmed fine, elongated grains along the extrusion direction, particularly at the interface. Both experimental and simulation results consistently demonstrated that selecting an optimal forming temperature of around 250°C ensures uniform material flow and prevents interfacial defects. This study confirms the feasibility of manufacturing lightweight, high-strength aluminum bimetallic tubes for aerospace and energy applications.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The weight-to-volume ratio of aluminum is approximately one to three. Although pure aluminum is highly ductile, it can be strengthened through cold working and alloying. Moreover, some aluminum alloys can be further hardened by heat treatment. Pure aluminum is relatively soft and has low strength, but it can be alloyed with other elements to enhance its strength and obtain additional desirable properties. In general, composites are materials composed of two or more constituent components whose combination results in properties superior to those of the individual components. Bimetallic tubes play a significant role in energy-intensive industries, their use is often limited due to production costs and resource constraints. Considering the advantageous properties of composite tubes, the market for extruded tubes has been steadily expanding, encompassing applications in petrochemical, chemical, pulp and paper, and energy production industries. The use of composites is economically beneficial, particularly when the cost of using a single homogeneous material is high. Aluminum and its alloys are highly suitable for extrusion, and various types of profiles can be produced from alloys that are easily extrudable. The tube extrusion process is considered an appropriate method for manufacturing composite tubes. Bimetallic tubes have essential applications in various industries, including nuclear, chemical, and electrical sectors—particularly when different performance characteristics are required from the outer shell compared to the core. Factors influencing this process include the extrusion ratio, frictional conditions, die geometry, mandrel shape, and the flow strength of the materials, all of which affect the pressure required for extrusion. Thin-walled tubes are defined as those with a ratio of radius to wall thickness greater than 10. In this study, aluminum alloys from the 5000 and 7000 series were investigated. These alloys were selected due to their widespread industrial applications and the similarity of their flow behavior under plastic deformation conditions. The main objective of this research is to examine the mechanical properties of these two alloys and to conduct both numerical and experimental modeling of the extrusion process to achieve a more accurate feasibility assessment.

Methodology

The feasibility of producing thin-walled composite tubes made of aluminum alloys AA5000 and AA7000 was investigated using the direct extrusion method under severe plastic deformation conditions. The chemical composition of the materials was determined by gravimetric method in accordance with the ASTM E-1251 standard at a temperature of 23°C.

The raw materials were cut to a length of 25 mm, and then drilling and machining operations were carried out on the samples according to the specified dimensions and tolerances. The aluminum tube from the 5000 series was machined with an inner diameter of 22.4 mm, an outer diameter of 29.4 mm, and a length of 20 mm, while the aluminum tube from the 7000 series had an inner diameter of 20.4 mm, an outer diameter of 22.4 mm, and the same length of 20 mm.

The extrusion die was designed based on the method of product ejection and the specific requirements of the final product. The die needed to incorporate a floating mechanism, meaning that the extruded part should easily separate from both the punch and the die. After preparing the raw materials and cutting them to the specified dimensions, machining and drilling operations were performed on the parts (Figure 1).

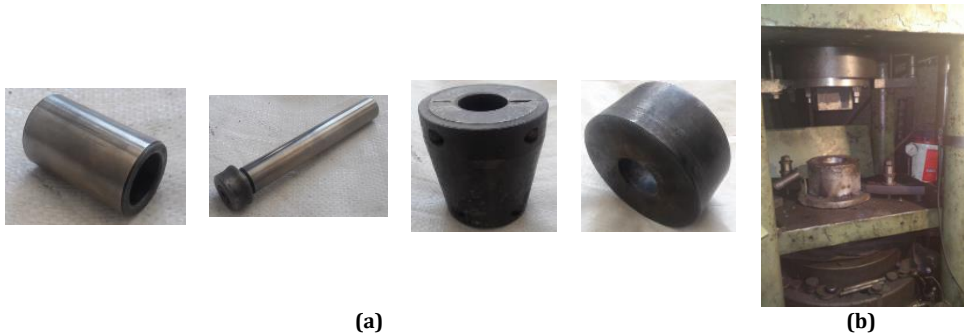


Figure 1. (a) Components of the extrusion die, and (b) the press machine equipped with the extrusion die.

After assembling the initial parts and die components, the die assembly was mounted onto a 300-ton hydraulic press. To reduce stress and friction between the initial workpiece and the punch and die surfaces, these surfaces were coated with a thin film of MOS_2 lubricant. The extrusion process was then carried out isothermally, with the die heated to 200°C using a heater. Once the die and workpiece temperatures had stabilized and become uniform, the extrusion was performed at a constant speed, producing thin-walled composite tubes. This process was repeated to manufacture additional samples.

The extruded thin-walled samples, along with several initial workpieces, were sectioned using a wire-cutting machine (Figure 2). The cut samples were then subjected to evaluations such as hardness testing, microstructural analysis, and longitudinal thickness measurements.

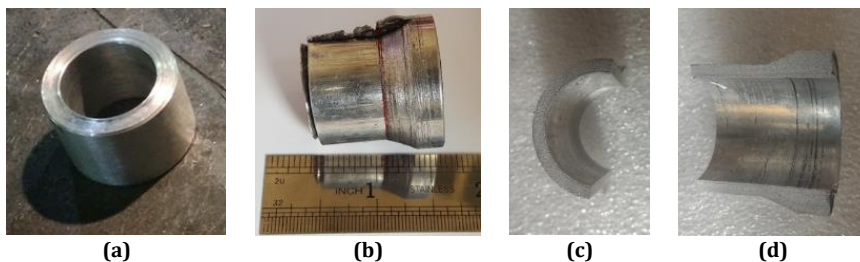


Figure 2. (a) Initial workpiece before extrusion, (b) thin-walled tube obtained from extrusion, (c) sectioned initial workpiece before extrusion, and (d) sectioned thin-walled tube obtained from extrusion.

Results and Discussion

As shown in Figure 3, the maximum equivalent stress was determined consistently across all samples, with the first sample exhibiting a value of approximately 348 MPa, as indicated in the figure. Similarly, the equivalent strain was analyzed uniformly for all samples, with the first sample showing a value of about 3.29, as presented in Figure 4.

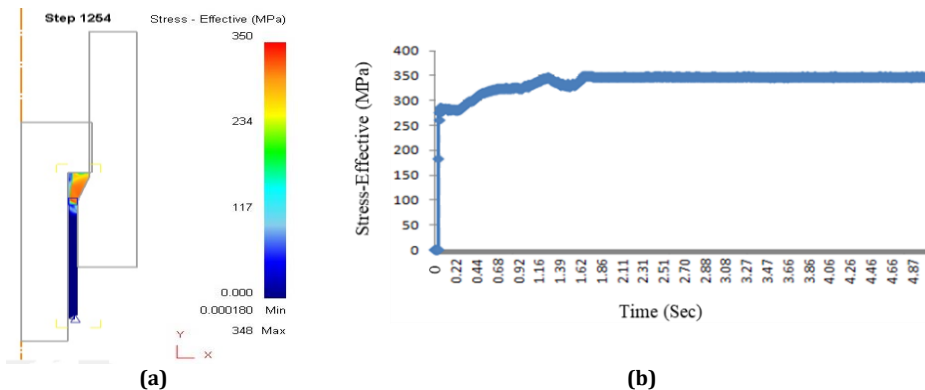


Figure 3. (a) Contour of equivalent stress distribution in the first sample at 200°C, and (b) equivalent stress–time curve for the first sample at the same temperature.

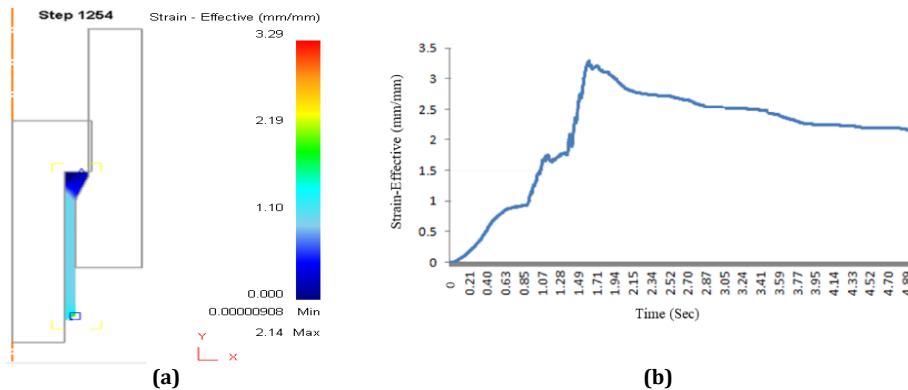


Figure 4. (a) Contour of equivalent strain distribution in the first sample at 200°C, and (b) equivalent strain–time curve for the first sample at the same temperature.

Conclusion

The numerical and experimental results showed that:

- The direct extrusion process using a floating-punch die successfully produced bimetallic tubes (AA5000/AA7000) without separation.
- Increasing the temperature from 200°C to 300°C reduced the extrusion force by approximately 23%, although it slightly induced discontinuity at the interface region.
- The maximum equivalent stress at the lower temperature was 348 MPa, and the equivalent strain reached 3.29, causing the greatest deformation in the shell.
- The average hardness of the bonding region was approximately 85 HB, while the hardness of the shell and core was measured at 108 HB and 65 HB, respectively.
- The numerical and experimental results showed good agreement, with an average discrepancy of less than 7%.



تحلیل عددی و تجربی تولید لوله‌های کامپوزیتی جدار نازک آلومینیوم ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ با استفاده از روش اکستروژن

حسین جعفرزاده^{۱*}، الیاس حدادی^۲

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز، ایران.

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در این پژوهش، فرآیند اکستروژن مستقیم برای تولید لوله‌های کامپوزیتی جدار نازک از آلایزهای آلومینیوم سری ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ به‌صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، قالبی با سنبه شناور طراحی و ساخته شد و آزمایش‌ها در دماهای ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت پیستون ۳ متر بر دقیقه بر روی دستگاه پرس هیدرولیکی ۳۰۰ تنی انجام شد. در شبیه‌سازی عددی با روش المان محدود، توزیع تنش مؤثر، کرنش مؤثر و تغییرات ضخامت پوسته و هسته مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که در دمای ۲۰۰ درجه، بیشینه تنش مؤثر حدود ۳۴۸ مگاپاسکال و کرنش مؤثر ۳/۲۹ است، در حالی‌که با افزایش دما به ۳۰۰ درجه، این مقادیر به‌ترتیب به ۱۸۸ مگاپاسکال و ۲/۶۵ کاهش یافت. سختی‌سنجی برینل مقدار ۱۰۸ برینل را برای پوسته و ۶۵ برینل را برای هسته نشان داد که بیانگر پیوند متالورژیکی مناسب میان دو آلایز است. مشاهدات متالوگرافی، ساختار دانه‌های کشیده و ریز را در ناحیه مرزی آشکار کرد. نتایج عددی و تجربی هم‌راستا بوده و نشان دادند که انتخاب دمای بهینه حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و طراحی دقیق قالب، موجب یکنواختی سیلان ماده و افزایش کیفیت اتصال می‌شود. این تحقیق قابلیت تولید موفق لوله‌های آلومینیومی دوفلزی سبک را برای کاربردهای هوافضا و صنایع انرژی تأیید می‌کند.
دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷ بازنگری مقاله: ۱۴۰۵/۰۱/۲۶ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰	
کلید واژگان: فرآیند اکستروژن آلایزهای آلومینیوم ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ لوله‌های دوفلزی تحلیل اجزای محدود کامپوزیت‌های جدار نازک	
نویسنده مسئول: حسین جعفرزاده پست الکترونیکی: h.jafarzadeh@iaut.ac.ir	



مقدمه

آلومینیوم فراوان‌ترین عنصر فلزی در پوسته زمین است و برآورد می‌شود که حدود ۸ درصد از آن را تشکیل می‌دهد. این فلز سبک با درخشش نقره‌ای روشن است و در میان فلزات، تنها منیزیم از آن سبک‌تر است. نسبت وزن به حجم آلومینیوم تقریباً یک به سه است. اگرچه آلومینیوم خالص بسیار چکش‌خوار است، اما می‌توان آن را از طریق کار سرد و آلیاژسازی سخت‌تر کرد. همچنین، برخی آلیاژهای آلومینیوم با عملیات حرارتی سخت می‌شوند. آلومینیوم خالص نسبتاً نرم و کم‌استحکام است، اما با افزودن عناصر دیگر می‌توان استحکام آن را افزایش داد و خواص مطلوب دیگری به دست آورد [۱-۳]. آلومینیوم رسانی‌ای عالی حرارت و الکتریسیته است. از جمله آلیاژهای مهم آلومینیوم، سری‌های ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ هستند. آلیاژهای سری ۵۰۰۰ که منیزیم عنصر آلیاژی اصلی آن‌ها است، به دلیل مقاومت عالی در برابر خوردگی، در بدنه قایق‌ها، سکوهای حمل و نقل دریایی و سایر کاربردهای محیط‌های دریایی استفاده می‌شوند [۴، ۵]. آلیاژهای سری ۷۰۰۰ که روی عنصر اصلی آلیاژی آن‌ها است، به دلیل نسبت استحکام به وزن بسیار بالا، در صنایع هوافضا و سایر کاربردهای مهندسی پیشرفته به طور گسترده به کار می‌روند. این سری قوی‌ترین گروه آلیاژهای آلومینیوم از نظر استحکام به شمار می‌رود و با عملیات حرارتی پیر سختی، تنش تسلیم بالاتر از ۵۰۰ مگاپاسکال ارائه می‌دهد [۶-۸]. به طور کلی، کامپوزیت‌ها از دو یا چند جزء سازنده تشکیل شده‌اند که ترکیب آن‌ها خواصی برتر از اجزای جداگانه ایجاد می‌کند [۹-۱۱]. این مواد باید حداقل از دو ماده شیمیایی متفاوت تشکیل شوند، از طریق اختلاط ساخته شوند و شامل ترکیب یا مخلوطی از اجزای غیرآتمی باشند که از نظر شکل، ظاهر و ترکیب شیمیایی متفاوت بوده و در یکدیگر حل نشوند [۱۲]. مواد کامپوزیتی امکان دستیابی خواصی مانند استحکام بالا، چگالی پایین، مقاومت بهتر به ساییش، مقاومت خوردگی زیاد و هدایت الکتریکی بالا را فراهم می‌کند. لوله‌های کامپوزیتی به دلیل اهمیت کاربردی در صنایع مختلف، مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این تحقیق به بررسی و مطالعه تولید این گروه از قطعات پرداخته شده است. در دهه گذشته، تولید مواد فوق ریزدانه/نانوساختار به طور ویژه مورد توجه پژوهش‌گران جهان قرار گرفته است. این مواد به عنوان نسل جدیدی از محصولات فلزی شناخته می‌شوند که خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها در مقایسه با مواد درشت‌دانه به طور قابل توجهی بهبود یافته است [۱۳]. لوله‌های دوفلزی^۱ به دلیل ترکیب هم‌زمان خواص مکانیکی و مقاومتی دو فلز متفاوت، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند. از جمله، در صنایع خمیر و کاغذ برای دیگ‌های بخار، صنایع شیمیایی برای فرآیند تولید اتیلن و صنایع نفت و پتروشیمی برای حفاری‌ها و کاوش‌های عمیق نفتی. اگرچه لوله‌های دوفلزی کاربردهای عمده‌ای در صنایع انرژی‌بر دارند، اما اغلب به دلیل هزینه‌های تولید و محدودیت منابع، استفاده از آنها محدود است. با توجه به خواص مطلوب لوله‌های کامپوزیتی، بازار لوله‌های اکستروژنه‌شده روز به روز در حال گسترش است و شامل کاربردهایی در صنایع پتروشیمی، شیمیایی، خمیر و کاغذ و تولید انرژی می‌شود. استفاده از کامپوزیت‌ها از نظر اقتصادی سودمند است، به ویژه زمانی که هزینه استفاده از یک ماده همگن تک بسیار بالا باشد [۱۴، ۱۵]. آلومینیوم و آلیاژهای آن برای فرآیند اکستروژن بسیار مناسب هستند و انواع مختلفی از پروفیل‌ها را می‌توان از آلیاژهای آلومینیوم اکستروژنه تولید کرد [۱۶]. فرآیند اکستروژن لوله، روش مناسبی برای تولید لوله‌های مرکب به شمار می‌رود. لوله‌های دوفلزی کاربردهای اساسی در صنایع گوناگون از جمله هسته‌ای، شیمیایی و الکتریکی دارند به ویژه زمانی که

^۱ Bimetallic tubes

ویژگی‌های عملکردی متفاوتی از پوسته^۱ خارجی نسبت به هسته^۲ داخلی مورد انتظار با شد. عوامل مؤثر بر این فرآیند شامل نسبت اکستروژن، شرایط اصطکاکی، هندسه قالب، شکل مندرل^۳ و استحکام جریان مواد است که همگی بر فشار مورد نیاز برای اکستروژن تأثیر می‌گذارند [۱۷، ۱۸]. لوله‌های جدار نازک به لوله‌هایی اطلاق می‌شود که نسبت شعاع به ضخامت جدار آن‌ها بیش از ۱۰ باشد. در سال‌های اخیر روش المان محدود رایج‌ترین رویکرد برای بررسی مسائل فرآیندهای شکل‌دهی از جمله اکستروژن است [۱۹]. این روش عددی قادر است هندسه‌های پیچیده را حل کند و مزایایی بسیاری دارد؛ برای مثال، در آزمایش‌های عملی، اندازه‌گیری تغییر شکل و تنش در قالب دشوار است. اما با شبیه‌سازی دقیق در نرم‌افزارهای المان محدود می‌توان تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییر شکل‌ها را در نقاط حساس مشاهده کرد [۲۰-۲۲]. علاوه بر این، المان محدود امکان بررسی تأثیر پارامترهای بدون اثرات غیرقابل کنترل را فراهم می‌کند و به کشف قوانین طراحی در آزمایش‌های مختلف کمک می‌نماید. همچنین، می‌تواند ابزارهای جدیدی برای طراحی قالب و پیش‌بینی عملکرد آن معرفی کند [۲۳]. پژوهش‌گران بسیاری در زمینه تغییر شکل پلاستیک شدید بر آلیاژهای مختلف از جمله آلومینیوم، مس، منیزیم و سایر فلزات تحقیق کرده‌اند [۲۴-۲۸]. روش‌های گوناگون تغییر شکل پلاستیک شدید نیز بر روی این مواد با ابعاد و مشخصات متفاوت اعمال شده است [۲۹-۳۲]. مطالعات قبلی بیشتر بر توصیف فرآیند اکستروژن تک‌فلزی تمرکز داشتند و تحلیل عددی و تجربی لوله‌های دوفلزی جدار نازک کمتر انجام شده است. با توجه به نیاز صنایع هوافضا و انرژی به لوله‌های دوفلزی سبک و مقاوم، تولید یکنواخت لوله‌های دوفلزی جدار نازک آلومینیوم ۵۰۰ و ۷۰۰ با فرآیند اکستروژن هنوز چالش برانگیز است زیرا مشکلاتی مانند کنترل جریان فلز، یکنواختی ضخامت و اتصال متالورژیکی در این فرآیند وجود دارند. انتخاب آلیاژهای آلومینیوم سری‌های ۵۰۰ و ۷۰۰ به دلیل کاربرد گسترده صنعتی و همچنین تطابق رفتار سیلان آن‌ها در شرایط تغییر شکل پلاستیک صورت گرفته است. در این پژوهش برای اولین بار طراحی و ساخت قالب اکستروژن با مکانیزم سنبه شناور ویژه تولید لوله‌های دوفلزی جدار نازک آلومینیوم ۵۰۰ و ۷۰۰ با استفاده از روش اکستروژن معرفی و اجرا گردیده است. در مطالعات پیشین درباره لوله‌های دوفلزی از مواد مختلف، عمدتاً بر مزایای کلی این ساختارها (نظیر ترکیب هم‌زمان مقاومت به خوردگی و استحکام مکانیکی) تأکید شده است؛ با این حال، برخی از چالش‌های کلیدی که در مطالعات قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته شامل بررسی عدم یکنواختی توزیع کرنش پلاستیک در ضخامت لوله طی فرآیند تغییر شکل و اثر این ناهمگنی بر پیوستگی فصل مشترک دوفلزی و خواص مکانیکی نهایی و همچنین ناتوانی در پیش‌بینی کمی تغییرات موضعی سختی و استحکام پس از فرآیند می‌باشد. بنابراین، مسئله علمی اصلی این پژوهش درک و مدل‌سازی توزیع موضعی کرنش پلاستیک در لوله دوفلزی طی فرآیند تغییر شکل و تبیین اثر آن بر تحول خواص مکانیکی و یکپارچگی فصل مشترک است. از منظر صنعتی، مشکل عملی که این پژوهش هدف قرار داده است شامل بررسی قابلیت تولید لوله‌های دوفلزی جدار نازک آلومینیوم ۵۰۰ و ۷۰۰ با استفاده از روش اکستروژن، بررسی احتمال تمرکز تنش و کرنش در یکی از لایه‌ها و خطر تضعیف اتصال بین دوفلزی می‌باشد.

^۱ Sleeve^۲ Core^۳ Mandrel

روش انجام آزمایش

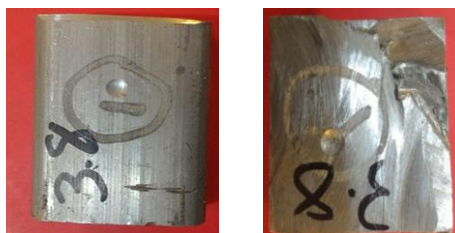
آلیاژهای آلومینیوم سری های ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ به عنوان مواد اولیه برای تولید لوله های کامپوزیتی جدار نازک انتخاب شدند. دلیل این انتخاب، کاربرد گسترده این آلیاژها در صنعت است. در لوله های دوجداره (بیمتالیک)، یکی از مواد استحکام مکانیکی بالا را تأمین می کند و دیگری مقاومت عالی در برابر خوردگی را فراهم می آورد. با توجه به مقاومت برتر آلیاژ سری ۵۰۰۰ در محیط های آبی و دریایی (در برابر خوردگی) و همچنین استحکام بسیار بالای آلیاژ سری ۷۰۰۰ نسبت به سایر سری های آلیاژهای آلومینیوم این دو آلیاژ برای این تحقیق انتخاب گردیدند.

در این تحقیق، امکان تولید لوله های کامپوزیتی جدار نازک آلومینیومی از سری های ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ با استفاده از روش اکستروژن مستقیم تحت شرایط تغییر شکل پلاستیک شدید بررسی شد. برای این منظور، از آلیاژهای آلومینیومی سری های ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ با ترکیب شیمیایی عناصر ذکر شده در جدول (۱) استفاده گردید. ترکیب شیمیایی مواد، به روش کوانتومتری و مطابق با استاندارد ASTM E1251 در دمای ۲۳ درجه سانتی گراد تعیین شد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلومینیوم سری ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ (به صورت درصد وزنی)

	As	B	Be	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	Mg	Mn
5xxx	0.006	0.005	0.000	<0.0002	0.001	<0.00005	0.156	<0.001	0.250	0.000	4.029	0.647
7xxx	>0.025	0.024	0.000	<0.0002	0.000	<0.00005	0.069	0.815	0.277	0.000	0.872	0.359
	Ni	P	Pb	Sb	Si	Sn	Sr	Ti	V	Zn	Zr	Al
5xxx	0.000	0.000	0.028	0.051	0.043	0.126	0.000	0.000	0.023	0.000	0.007	94.627
7xxx	0.000	0.001	0.108	0.320	0.922	0.190	0.000	0.000	0.020	3.920	0.006	92.097

یکی از روش های تعیین ویژگی های مکانیکی مواد، آزمون سختی-سنجی است. به همین منظور، از مواد تهیه شده نمونه هایی مطابق با شکل ۱ آماده شد و آزمون سختی سنجی بر روی آنها انجام گرفت. این آزمون با روش برینل، با استفاده از ساچمه ای به قطر ۱۰ میلی متر، نیروی اعمالی ۲۵۰ کیلوگرم و زمان بارگذاری ۶۰ ثانیه صورت پذیرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که سختی مواد اولیه بیش از ۸۵ برینل است.



شکل ۱. نمونه های اولیه برای انجام سختی سنجی

آنیل کردن قبل و بعد از نورد، استحکام اتصال را افزایش می‌دهد. این اثر در کاهش ضخامت‌های بیشتر مشهودتر است. همچنین، انجام آنیل کردن پیش از عملیات شکل‌دهی، مقدار تغییر شکل بحرانی مورد نیاز برای ایجاد اتصال را کاهش می‌دهد [۳۳].

پس از انجام آزمون سختی‌سنجی اولیه و تعیین مقدار سختی، عملیات حرارتی آنیل کردن بر روی مواد اعمال شد تا ساختار و دانه‌بندی آن‌ها اصلاح گردد (شکل ۲). سرد کردن نمونه‌ها داخل کوره انجام گرفت. سپس مجدداً آزمون سختی‌سنجی تحت شرایط یکسان با دستگاه قبلی اجرا شد. در این حالت، سختی مواد به حدود ۵۰ برینل کاهش یافت.

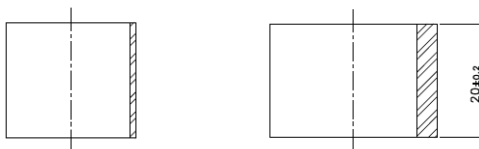
پس از عملیات حرارتی و کاهش سختی، مواد اولیه به طول ۲۵ میلی‌متر بریده شدند. سپس عملیات سوراخ‌کاری و ماشین‌کاری بر روی نمونه‌ها مطابق با ابعاد و تolerانس‌های نشان‌داده شده در شکل ۲ انجام شد. بر اساس شکل ۲، لوله آلومینیومی سری ۵۰۰۰ با قطر داخلی ۲۲/۴ میلی‌متر، قطر خارجی ۲۹/۴ میلی‌متر و طول ۲۰ میلی‌متر و لوله آلومینیومی سری ۷۰۰۰ با قطر داخلی ۲۰/۴ میلی‌متر، قطر خارجی ۲۲/۴ میلی‌متر و طول ۲۰ میلی‌متر ماشین‌کاری شدند. مشخصات هندسی قطعه‌کار اولیه نیز در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات هندسی قطعه‌کار اولیه

نمونه	ضخامت هسته	ضخامت پوسته
نمونه اول	۱	۳/۸
نمونه دوم	۲	۲/۸

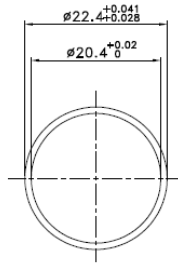
نمونه مورد مطالعه شامل دو لایه لوله است: لوله آلومینیوم سری ۵۰۰۰ به عنوان پوسته آلومینیوم سری ۷۰۰۰ به عنوان هسته. ضخامت اولیه لوله پوسته (سری ۵۰۰۰) ۷ میلی‌متر و ضخامت اولیه لوله هسته (سری ۷۰۰۰) ۲ میلی‌متر است. به منظور بهبود کیفیت اتصال و فرآیند تشکیل کامپوزیت، پیش از مونتاژ لوله‌ها، سطح داخلی لوله پوسته (سری ۵۰۰۰) که در تماس با سطح خارجی لوله هسته (سری ۷۰۰۰) قرار می‌گیرد، تحت عملیات آماده‌سازی سطحی قرار گرفت. مراحل آماده‌سازی سطحی به شرح زیر بود:

شستشو و چربی‌زدایی کامل قطعات در محلول استون، اکسیدزدایی سطح داخلی پوسته و سطح خارجی هسته با استفاده از سنباده سیمی (قطر سنباده ۲۰ میلی‌متر، قطر سیم فلزی ۱ میلی‌متر، سرعت چرخش ۲۵۰۰ دور در دقیقه). بلافاصله پس از سنباده‌زنی (با توجه به تمایل بالای آلومینیوم به اکسید شدن)، قطعات توسط پرس دستی با تolerانس پرسی ۰/۰۲ میلی‌متر به یکدیگر مونتاژ شدند تا پیوند متالورژیکی مناسب برقرار گردد.

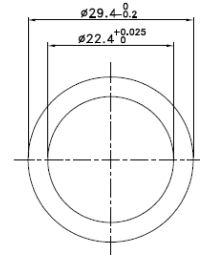




(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۲. الف) نقشه لوله‌های اولیه آلومینیوم سری ۵۰۰۰ قبل از مرحله اکستروژن، ب) نقشه لوله‌های اولیه آلومینیوم سری ۷۰۰۰ قبل از مرحله اکستروژن و ج) لوله‌های اولیه

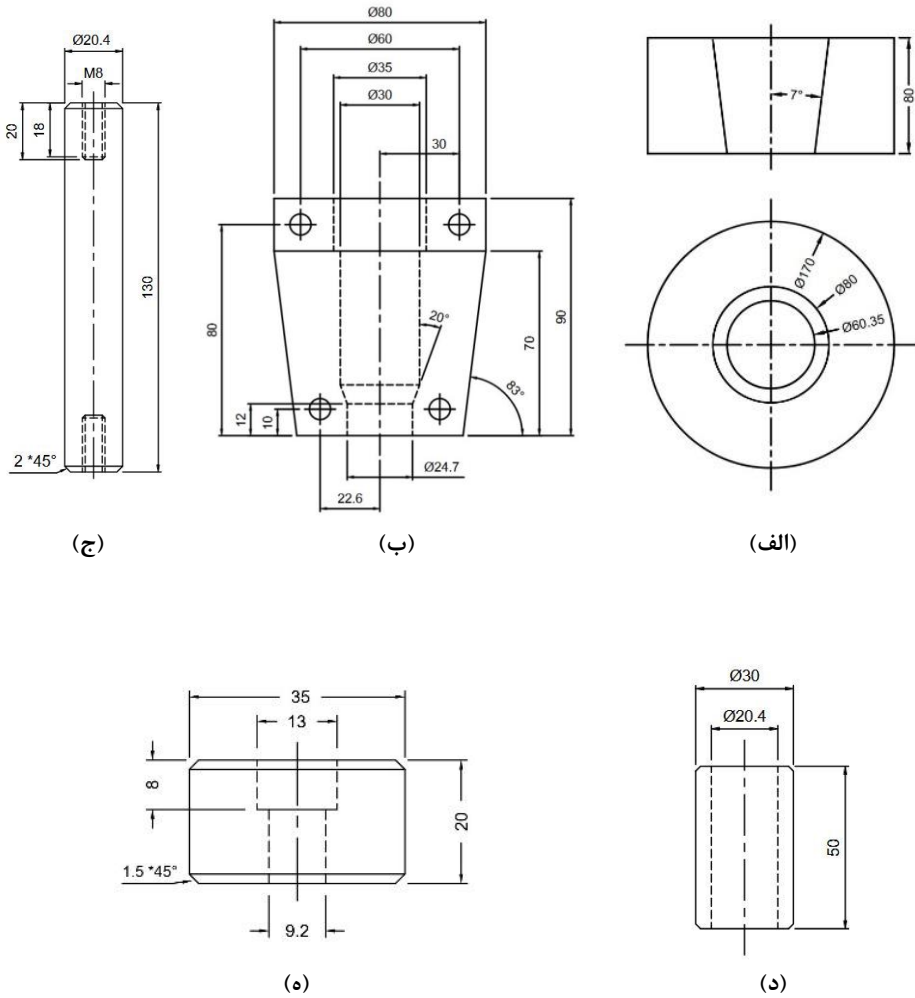
فرآیند طراحی و ساخت قالب اکستروژن

قالب‌های اکستروژن همیشه دارای پیچیدگی منحصربه‌فردی هستند. این پیچیدگی با افزودن شرایطی همچون تغییر شکل پلاستیک شدید در محصول نهایی و همچنین جدار نازک بودن آن، بیش از پیش افزایش می‌یابد. در این تحقیق، قالب اکستروژن بر اساس نحوه خروج قطعه از قالب و با توجه به ویژگی محصول نهایی (جدار نازک بودن) باید دارای مکانیزم شناور^۱ باشد؛ به‌طوری‌که قطعه نهایی به‌راحتی و بدون آسیب از سنبه و ماتریس جدا شود. بنابراین، طراحی قالب با شرایط زیر انجام شد (شکل‌های ۳ و ۴):

پس از تهیه مواد خام و برش اولیه آن‌ها به اندازه‌های مورد نیاز، مراحل ماشین‌کاری و سوراخ‌کاری بر روی قطعات اجرا گردید (شکل ۴). سپس به ترتیب عملیات حرارتی و سنگ‌زنی روی قطعات انجام شد. در نهایت، قطعات روی هم مونتاژ گردیدند. طراحی قالب بر حسب نیاز فرآیند اکستروژن و ویژگی محصول نهایی (جدار نازک) به‌گونه‌ای انجام گرفت که محصول بدون هیچ ضربه یا نیروی اضافی، به‌صورت سالم و کامل از قالب خارج شود. مصالح قالب به شرح زیر انتخاب شدند (شکل ۴):

غلاف از جنس Mo40 با سختی ۵۵ راکول سی، ماتریس، سنبه شناور و سنبه ثابت از جنس H13 (1.2344) با سختی ۵۵ راکول سی و محفظه از جنس CK45 با سختی مینیمم ۳۰ راکول سی.

^۱ Floating die



شکل ۳. الف) غلاف، ب) محفظه، ج) سنبه شناور، د) سنبه ثابت و ه) ماتریس (بدون تفرانس‌گذاری)



(ب)

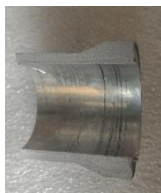


(الف)

شکل ۴. الف) اجزاء قالب اکستروژن و ب) دستگاه پرس به همراه قالب اکستروژن

انجام فرآیند اکستروژن

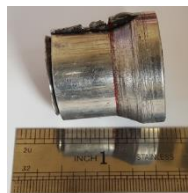
پس از ساخت قطعات اولیه و اجزای قالب و مونتاژ آنها، مجموعه قالب بر روی پرس هیدرولیکی ۳۰۰ تنی نصب شد. پیستون پرس با سرعت ۳ متر بر دقیقه به صورت عمودی عمل اکستروژن را انجام داد. برای کاهش تنش و اصطکاک بین سطوح قطعه کار اولیه با سنبه و ماتریس، این سطوح به فیلم نازکی از روانکار MoS_2 آغشته گردید. سپس فرآیند اکستروژن به صورت ایزوترمال با گرم کردن قالب توسط هیتر تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد اجرا شد. پس از یکنواخت شدن دمای قالب و قطعه کار اولیه داخل آن، عملیات اکستروژن با سرعت ثابت انجام گرفت و لوله کامپوزیتی جدار نازک تولید شد. این فرآیند برای ساخت نمونه‌های بیشتر تکرار گردید. نمونه‌های قطعه کار قبل و بعد از اکستروژن در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. نمونه‌های اکستروژن شده جدار نازک به همراه چند قطعه کار اولیه، توسط وایرکات به صورت مقطعی برش داده شدند (شکل ۵). بر روی نمونه‌های برش خورده، بررسی‌هایی شامل آزمون سختی، تحلیل ریزساختار و اندازه‌گیری ضخامت در جهت طولی انجام شد.



(د)



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۵. الف) قطعه کار اولیه قبل از اکستروژن، ب) لوله جدار نازک حاصل از اکستروژن، ج) برش قطعه کار اولیه قبل از اکستروژن و د) برش لوله جدار نازک حاصل از اکستروژن

متالوگرافی و سختی‌سنجی

با توجه به شکل لوله جدار نازک و به منظور بررسی دقیق کیفیت اتصال لایه‌ها در فصل مشترک، نمونه‌های برش خورده باید مانع می‌شدند. از آنجا که پیوند بین دو ماده به صورت مکانیکی است، امکان مانع گرم وجود

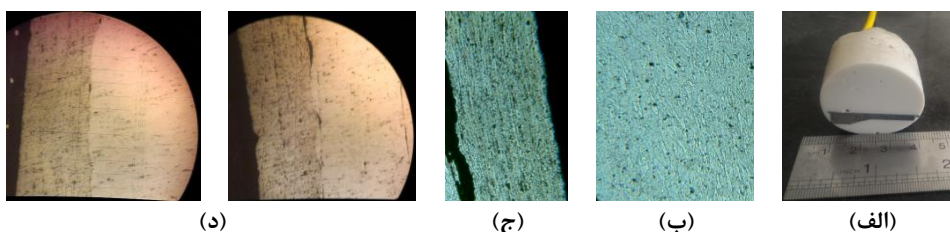
نداشت؛ بنابراین، نمونه‌های اکستروده شده با استفاده از چسب سنگ مانت گردیدند و نمونه‌های قطعه‌کار اولیه نیز با رزین اپوکسی مانت شدند.

لازم به ذکر است که با توجه به جنس نمونه‌ها (آلومینیوم سری‌های ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰)، احتمال نیاز به اچ الکتروشیمیایی (به جای اچ شیمیایی معمولی) وجود داشت. بنابراین، به منظور امکان‌پذیر کردن این روش، سیم الکتریکی (الکتروده) داخل نمونه‌ها تعبیه گردید. این سیم به عنوان مسیر جریان الکتریکی در فرآیند اچ الکتروشیمیایی عمل می‌کند و کنترل بهتری بر پتانسیل و سرعت انحلال سطحی فراهم می‌آورد (شکل ۶).

پس از مانت کردن نمونه‌ها، عملیات سنباده‌زنی به صورت متوالی با کاغذهای سنباده سیلیکون کارباید (SiC) از شماره ۸۰ تا ۳۰۰۰ انجام شد. در هر مرحله، نمونه‌ها ابتدا با آب و سپس با الکل شسته شدند. پس از آن، پولیش نهایی با محلول آلومینا با اندازه ذرات ۰/۳ میکرون صورت گرفت؛ مجدداً شست و شو با آب و الکل انجام شد و در نهایت نمونه‌ها با هیترا خشک گردیدند.

با توجه به ساختار کامپوزیتی نمونه‌ها، ابتدا از محلول‌های متداول اچ شیمیایی آلومینیوم استفاده شد؛ اما مرز دانه‌ها به طور واضح مشاهده نشد. بنابراین، روش اچ الکتروشیمیایی به کار گرفته شد. برای ایجاد مسیر عبور جریان الکتریکی، سیم الکتروده داخل نمونه تعبیه گردید. در نهایت، بررسی‌های میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل Olympus PM3 انجام گرفت (شکل ۶).

آزمون سختی سنجی مطابق شرایط پیش‌تر ذکر شده، بر روی قطعات قبل از برش و همچنین بر روی سطح مقطع نمونه‌های برش‌خورده (قطعه‌کار اولیه و محصولات اکستروده شده) اجرا شد. این آزمون با نیروی ۲۵ گرم و زمان ۳۰ ثانیه، در سه منطقه و هر منطقه سه بار اندازه‌گیری گردید (شکل ۶د).



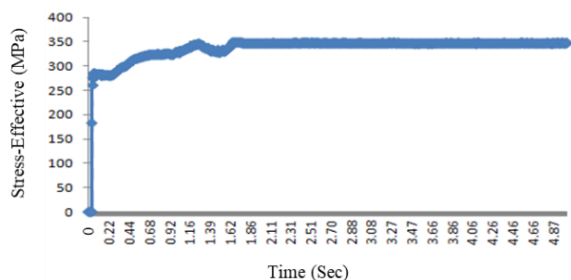
شکل ۶. الف) نمونه مانت شده، اچ الکتروشیمیایی مواد کامپوزیتی اکستروده شده با بزرگنمایی ۲۰۰؛ ب) آلومینیوم سری ۵۰۰۰ و ج) آلومینیوم سری ۷۰۰۰ و د) محل‌های اندازه‌گیری سختی به صورت ویکرز

نتایج و بحث

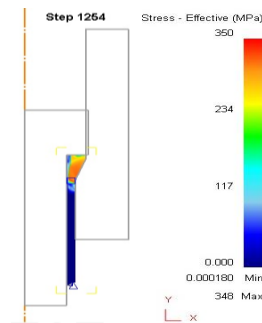
بررسی نتایج نمونه اول در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، حداکثر مقدار تنش معادل در همه نمونه‌ها به صورت یکسان بررسی گردید و برای نمونه اول حدود ۳۴۸ مگاپاسکال است (همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده). به طور مشابه، کرنش معادل نیز در همه نمونه‌ها به صورت یکسان تحلیل شد و برای نمونه اول حدود ۳/۲۹ به دست آمد (شکل ۸). به منظور بررسی هندسه نهایی، ضخامت هسته و پوسته در طول نمونه اکستروده شده اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که ضخامت متوسط دیواره داخلی قطعه اکستروده شده در حدود ۰/۴ میلی‌متر در سراسر طول لوله

بود. علاوه بر این، شکل ۹ تقارن محوری قطعه اکستروژن شده را به خوبی نمایش می‌دهد. با دقت در شکل ۱۰ و به‌ویژه در بخش جلویی ماده کامپوزیتی اکستروژن شده، مشاهده می‌شود که پوسته نسبت به هسته کمی جلوتر قرار گرفته است. این پدیده یک عیب هندسی جزئی به شمار می‌رود و می‌تواند منجر به اتلاف مواد و کاهش یکنواختی جریان فلز در فرآیند اکستروژن شود.

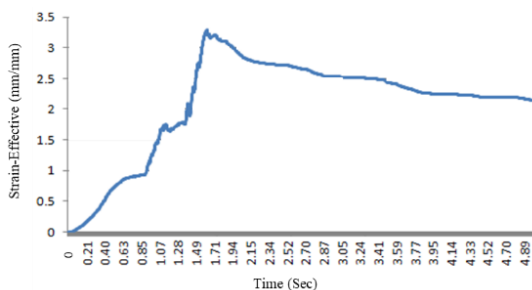


(ب)

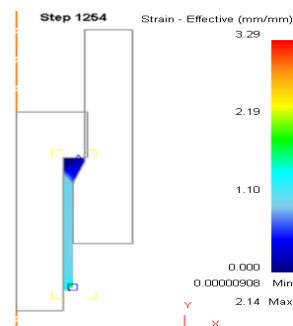


(الف)

شکل ۷. الف) کانتور توزیع تنش مؤثر در نمونه اول در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و ب) نمودار تنش مؤثر - زمان برای نمونه اول در همان دما

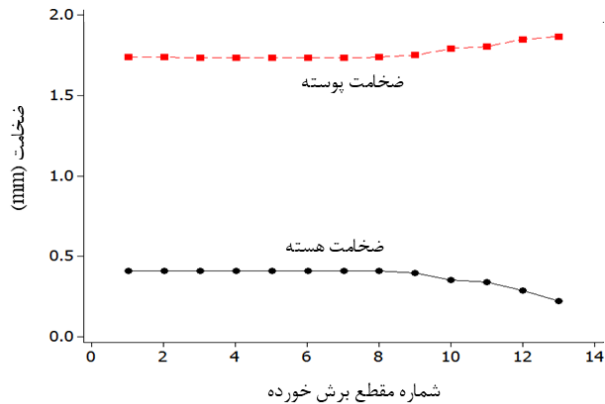


(ب)



(الف)

شکل ۸. الف) کانتور توزیع کرنش مؤثر در نمونه اول در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و ب) نمودار کرنش مؤثر - زمان برای نمونه اول در همان دما



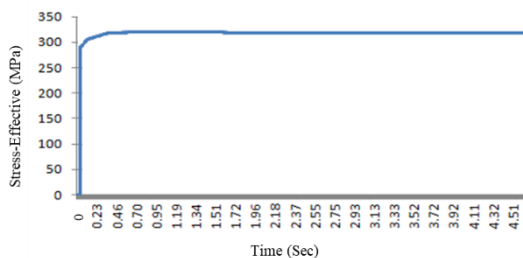
شکل ۹. تغییر ضخامت هسته و پوسته در مقاطع مختلف نمونه اکستروژن شده اول



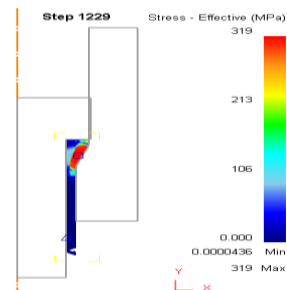
شکل ۱۰. هندسه قطعه نهایی به صورت متقارن محوری مربوط به نمونه اول

بررسی نتایج نمونه دوم در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد

به دلیل تنش سیلان بالای مواد در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، عملیات اکستروژن به طور کامل انجام نشد. حداکثر تنش معادل در قطعه کار در این شرایط حدود ۳۱۹ مگاپاسکال است که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همچنین، حداکثر کرنش معادل در نمونه اول تحت همین شرایط حدود ۳/۱۲ به دست آمد (شکل ۱۲). ضخامت هسته و پوسته نیز در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. تقارن محوری نمونه دوم در شکل ۱۴ نشان داده شده که در اینجا نیز پوسته نسبت به هسته جلوتر قرار گرفته است. بنابراین، نمونه دوم همان عیب هندسی جزئی مشاهده شده در نمونه اول (جلوتر بودن پوسته) را دارد.



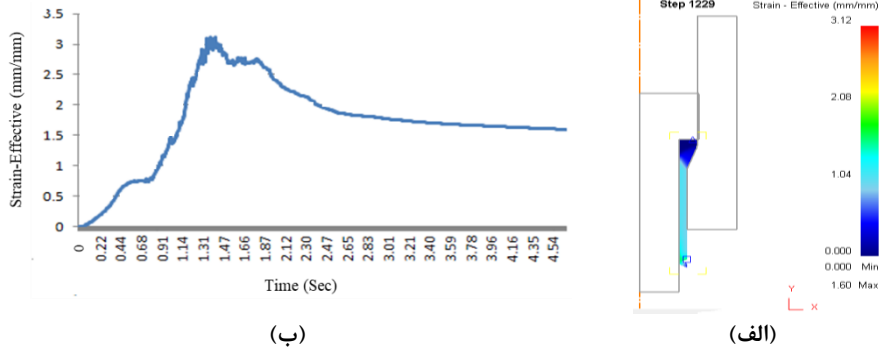
(ب)



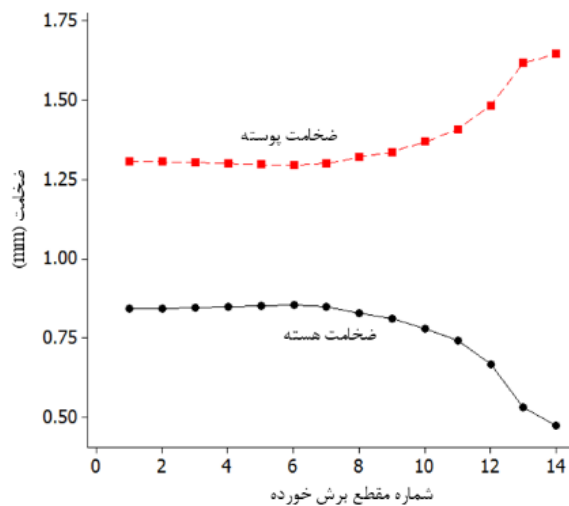
(الف)

شکل ۱۱. (الف) کانتور توزیع تنش مؤثر در نمونه دوم در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و (ب) نمودار تنش مؤثر -

زمان برای نمونه دوم در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۲. الف) کانتور توزیع کرنش مؤثر در نمونه دوم در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد و ب) نمودار کرنش مؤثر - زمان برای نمونه دوم در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد



شکل ۱۳. تغییر ضخامت هسته و پوسته در مقاطع مختلف نمونه اکستروژد شده دوم

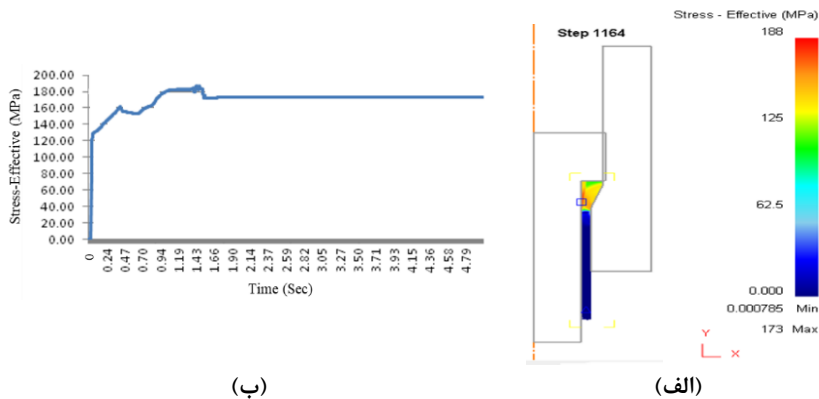


شکل ۱۴. هندسه قطعه نهایی به صورت متقارن محوری مربوط به نمونه دوم

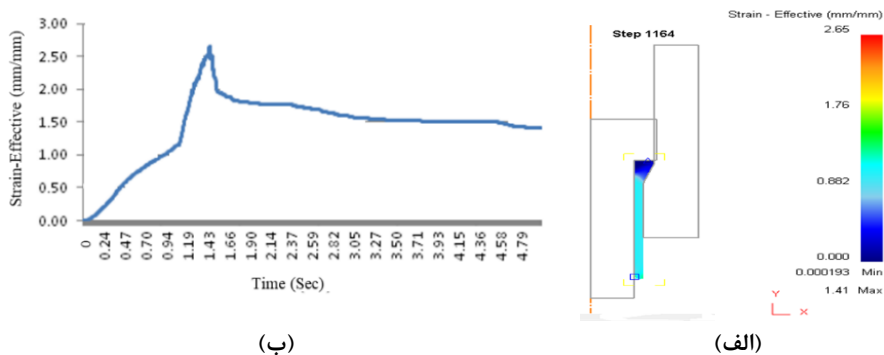
بررسی نتایج نمونه اول در دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد

حداکثر تنش معادل در نمونه اول تحت شرایط دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد حدود ۱۸۸ مگاپاسکال است (شکل ۱۵). همچنین، حداکثر کرنش معادل در این نمونه حدود ۲/۶۵ به دست آمد (شکل ۱۶). بررسی ضخامت

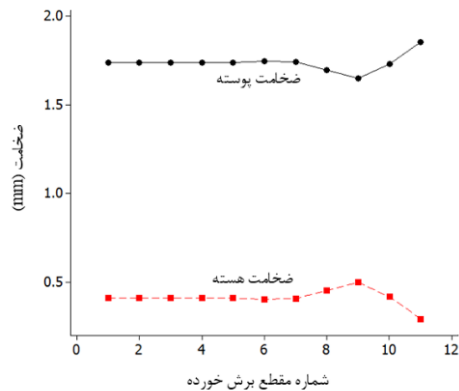
هسته و پوسته در طول نمونه اول (شکل ۱۷) نشان داد که ضخامت متوسط دیواره داخلی قطعه اکستروژده در ناحیه یکنواخت حدود ۰/۴۵ میلی‌متر است. شکل تقارن محوری (شکل ۱۸) نیز حاکی از آن است که پوسته نسبت به هسته کمی جلوتر قرار گرفته و این عیب هندسی جزئی - همانند حالات قبلی - همچنان مشاهده می‌شود.



شکل ۱۵. الف) کانتور توزیع تنش مؤثر در نمونه اول در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و ب) نمودار تنش مؤثر - زمان برای نمونه اول در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۶. الف) کانتور توزیع کرنش مؤثر در نمونه اول در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و ب) نمودار کرنش مؤثر - زمان برای نمونه اول در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد



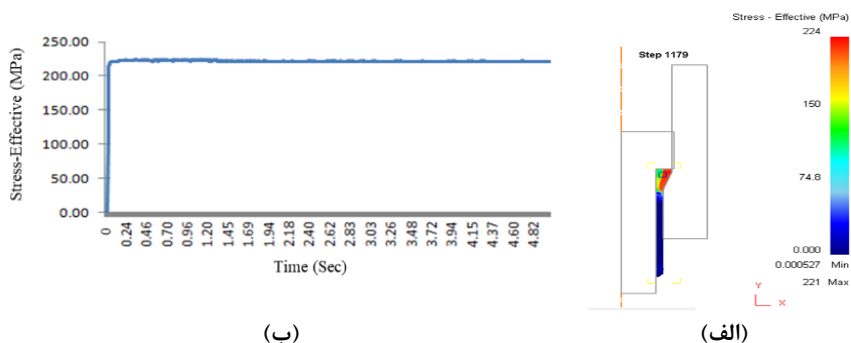
شکل ۱۷. تغییر ضخامت هسته و پوسته در مقاطع مختلف نمونه اکستروژده اول



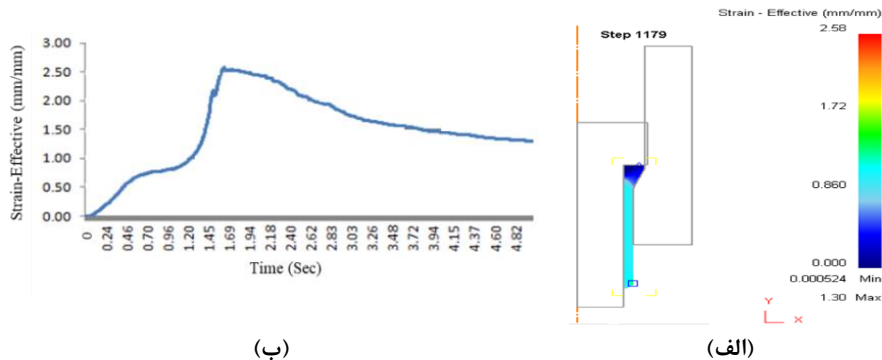
شکل ۱۸. هندسه قطعه نهایی به صورت متقارن محوری مربوط به نمونه اول

بررسی نتایج نمونه دوم در دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد

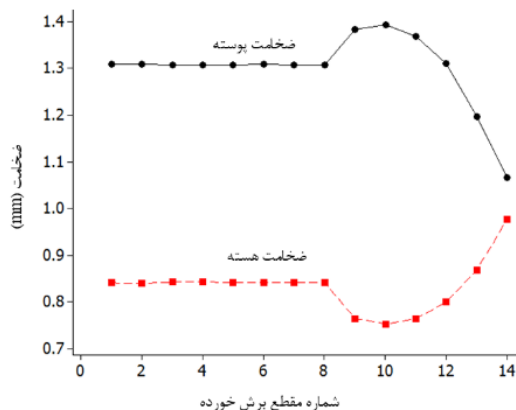
شکل ۱۹ نشان می‌دهد که حداکثر تنش معادل در نمونه دوم تحت شرایط دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد حدود ۲۲۴ مگاپاسکال است. همچنین، حداکثر کرنش معادل در این نمونه حدود ۲٫۵۸ به دست آمد (شکل ۲۰). بررسی ضخامت هسته و پوسته در طول نمونه دوم (شکل ۲۱) نشان داد که ضخامت متوسط دیواره داخلی قطعه اکستروژده در ناحیه یکنواخت حدود ۰٫۷۵ میلی‌متر است. از شکل تقارن محوری (شکل ۲۲) مشخص است که این بار هسته نسبت به پوسته جلوتر قرار گرفته است. این پدیده نیز یک عیب هندسی جزئی محسوب می‌شود و می‌تواند منجر به اتلاف مواد و کاهش یکنواختی جریان فلز در فرآیند اکستروژن گردد.



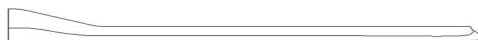
شکل ۱۹. الف) کانتور توزیع تنش مؤثر در نمونه دوم در دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد و ب) نمودار تنش مؤثر – زمان برای نمونه دوم در دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد



شکل ۲۰. الف) کانتور توزیع کرنش مؤثر در نمونه دوم در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و ب) نمودار کرنش مؤثر - زمان برای نمونه دوم در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۲۱. تغییر ضخامت هسته و پوسته در مقاطع مختلف نمونه اکستروژده دوم

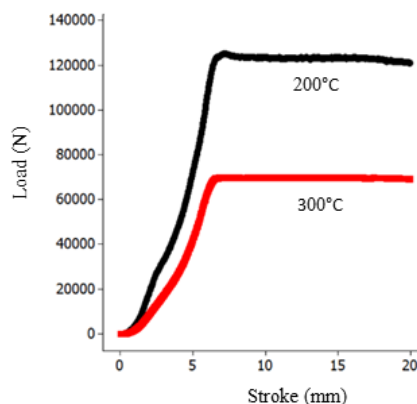


شکل ۲۲. هندسه قطعه نهایی به صورت متقارن محوری مربوط به نمونه دوم

شبیه سازی اجزای محدود نشان داد که توزیع کرنش در لایه داخلی آلومینیوم سری ۵۰۰۰ نسبت به سری ۷۰۰۰ یکنواخت تر است. اما در نزدیکی لبه‌ها تنش‌های محلی افزایش می‌یابد. این رفتار ناشی از اختلاف خواص مکانیکی دو فلز و هندسه قالب است. نتایج تجربی و عددی هم‌خوانی خوبی داشتند. مشخص شد که کنترل دما در اکستروژن باعث کاهش ترک‌ها و افزایش چسبندگی بین دو فلز می‌شود. این یافته‌ها فراتر از نتایج بدیهی مطالعات پیشین است و می‌تواند راهنمای عملی برای طراحی قالب‌ها و پارامترهای فرآیند صنعتی باشد.

بررسی نیروی مورد نیاز فرآیند

دو نمونه اول که به طور کامل اکستروژن شدند، مورد بررسی دقیق قرار گرفتند. با مقایسه نیروی مورد نیاز برای انجام فرآیند، مشخص شد که افزایش ضخامت آلومینیوم سری ۷۰۰۰ (به عنوان هسته) منجر به افزایش نیروی اکستروژن می شود. بنابراین، نمونه اول - که تنش سیلان پایین تری دارد - برای مقایسه رفتار فرآیند در دماهای مختلف انتخاب گردید. نتایج نشان داد که نیروی لازم برای اکستروژن در دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد به طور چشم گیری کمتر از دمای پایین تر است (شکل ۲۳).

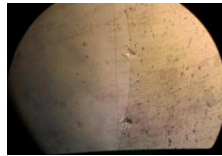


شکل ۲۳. مقایسه نیروی مورد نیاز برای انجام فرآیند نمونه اول در دمای ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی گراد

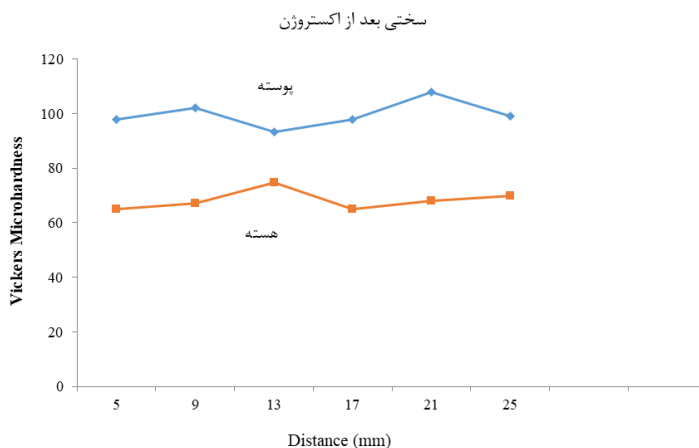
نتایج سختی

با توجه به فرآیند اکستروژن قطعه کار اولیه و وجود سه ناحیه مشخص (پوسته، ناحیه میانی و هسته) در مقطع قطعه، اندازه گیری سختی به صورت طولی در امتداد محور اکستروژن انجام شد (شکل ۲۴). نتایج نشان می دهند که سختی در نواحی با شدت تغییر شکل پلاستیک بالاتر، افزایش یافته است (شکل ۲۵). حداکثر سختی ۱۰۸ ویکرز در ناحیه پوسته و حداقل سختی ۶۵ ویکرز در ناحیه هسته به دست آمد. همچنین، سختی برینل میانگین پس از اکستروژن در پوسته حدود ۹۰ برینل و در هسته حدود ۶۰ برینل اندازه گیری شد. نکات کلیدی در تحلیل نتایج سختی به شرح زیر است:

- ۱- تغییر اندک سختی در ناحیه هسته (آلیاژ سری ۷۰۰۰) نسبت به قطعه کار اولیه و نمونه اکستروژن شده، بیانگر اثر محدود تغییر شکل پلاستیک شدید در این ناحیه است.
- ۲- با حرکت از فصل مشترک دو آلیاژ به سمت دیواره های خارجی، میزان سختی افزایش می یابد و در نواحی مجاور سنبه و ماتریس به حداکثر مقدار خود می رسد. این رفتار ناشی از شدت بالاتر تغییر شکل پلاستیک و کرنش جمعی در نزدیکی سطوح تماس با ابزار است.
- ۳- بر اساس تصاویر متالوگرافی، وجود تخلخل ها و ناپیوستگی های موضعی در ناحیه پوسته می تواند یکی از عوامل کاهش سختی در محل اتصال دو آلیاژ باشد.



شکل ۲۴. اثر سختی‌سنجی ویکرز در مواد کامپوزیت

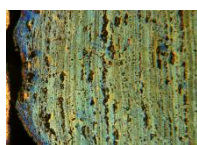


شکل ۲۵. میزان سختی در فواصل مختلف در قطعه اکستروده شده

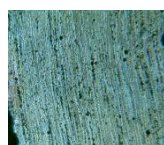
نتایج متالوگرافی

همان‌طور که در شکل ۲۶ مشاهده می‌شود، دانه‌بندی مواد علی‌رغم ریز شدن قابل توجه طی فرآیند اکستروژن، در مناطق مختلف شکل‌های متفاوتی نشان می‌دهد. به عنوان مثال، در آلومینیوم سری ۷۰۰۰ (هسته)، دانه‌ها کاملاً کشیده شده و دقیقاً منطبق با جهت اکستروژن رشد کرده‌اند. در مقابل، در آلومینیوم سری ۵۰۰۰ (پوسته) رفتار دانه‌ها در مناطق مختلف متفاوت است:

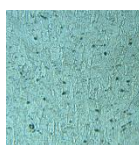
در منطقه A1، دانه‌ها کاملاً کشیده و منطبق با جهت اکستروژن هستند. در منطقه A2، دانه‌ها عمود بر جهت اکستروژن قرار گرفته‌اند. در منطقه A3، دانه‌ها مجدداً منطبق با جهت اکستروژن هستند، اما اندازه آن‌ها بزرگ‌تر از منطقه A1 است (شکل ۲۶). این تفاوت‌ها نشان‌دهنده توزیع ناهمگن تغییر شکل پلاستیک شدید در مقطع قطعه اکستروده شده است.



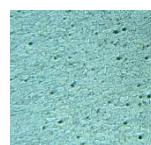
(ه)



(د)



(ج)



(ب)

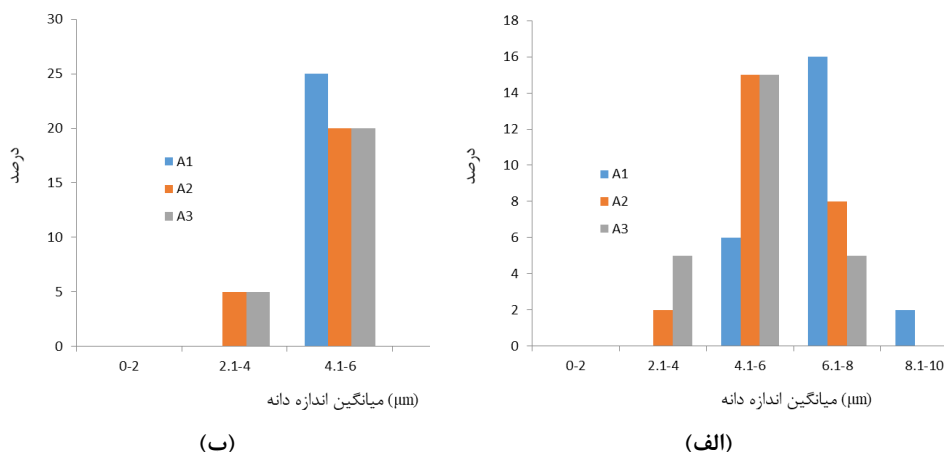
پوسته			هسته		
*A1	*A2	*A3	*A3	*A2	*A1

(الف)

شکل ۲۶. الف) موقعیت مکانی مناطق A1، A2 و A3، نتایج متالوگرافی آلومینیوم سری ۵۰۰۰: ب) اکستروودشده با بزرگنمایی ۱۰۰ در منطقه A2 و ج) اکستروودشده در منطقه A1 با همان بزرگنمایی و نتایج متالوگرافی آلومینیوم سری ۷۰۰۰: د) اکستروودشده با بزرگنمایی ۱۰۰ و ه) اکستروودشده با بزرگنمایی ۲۰۰

اندازه دانه‌ها

همان‌طور که در شکل ۲۷ مشاهده می‌شود، دانه‌بندی در آلومینیوم سری ۷۰۰۰ (هسته) تقریباً در تمامی مناطق A1، A2 و A3 یکسان است و به صورت دندردیتی ظاهر می‌شود. در مقابل، این رفتار در آلومینیوم سری ۵۰۰۰ (پوسته) مشاهده نمی‌شود. بر اساس شکل ۲۶، دانه‌ها در ناحیه A1 ریزتر از سایر نواحی هستند؛ دانه‌ها در ناحیه A2 نیز ریزتر از ناحیه A3 می‌باشند. به عبارت دیگر، اندازه دانه‌ها در پوسته از ناحیه A1 به سمت A3 افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که محاسبه تعداد دانه‌ها مطابق با استاندارد ASTM E112 و با بزرگنمایی ۱۰۰× در هر اینچ مربع انجام گرفت.



شکل ۲۷. الف) میزان توزیع دانه در مناطق مختلف قطعه اکستروودشده در آلومینیوم سری ۵۰۰۰ با بزرگنمایی ۱۰۰× در هر اینچ مربع مطابق با استاندارد ASTM E112 و ب) میزان توزیع دانه در مناطق مختلف قطعه اکستروودشده آلومینیوم سری ۷۰۰۰ با بزرگنمایی ۱۰۰× در هر اینچ مربع مطابق با استاندارد ASTM E112

مشخصات فرآیند اکستروژن

به منظور ارائه جمع‌بندی جامع از فرآیند اکستروژن، مهم‌ترین پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۳) گردآوری شده است.

جدول ۳. پارامترها و مشخصات دقیق فرآیند اکستروژن

پارامتر	مقدار / توضیح	واحد	توضیحات
جنس پوسته	آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۰۰	—	مقاومت بالا در برابر خوردگی
جنس هسته	آلیاژ آلومینیوم سری ۷۰۰۰	—	استحکام کششی بالا
قطر اولیه داخلی/خارجی پوسته	۲۹/۴ / ۲۲/۴	mm	مطابق نقشه قالب

قطر اولیه داخلی/خارجی هسته	۲۲/۴ / ۲۰/۴	mm	مطابق نقشه قالب
طول قطعات اولیه	۲۰	mm	مطابق نقشه قالب
دمای قالب	۳۰۰ و ۲۰۰	°C	با گرم‌کن هیتر
سرعت پیستون	۳	m/min	ثابت در همه آزمایش‌ها
فشار بیشینه اکستروژن	۲۲۰-۱۸۰	MPa	بر اساس ثبت نیرو-جابجایی
نوع روانکار	MoS ₂	—	لایه نازک جهت کاهش اصطکاک
دستگاه پرس	هیدرولیک ۳۰۰ تنی	—	حالت عمودی
نوع قالب	اکستروژن با سنبه شناور	—	برای خروج یکنواخت لوله

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، امکان‌سنجی تولید لوله‌های کامپوزیتی جدارنازک آلومینیوم AA5000/AA7000 به روش اکستروژن مستقیم با استفاده از قالب دارای سنبه شناور، به‌صورت هم‌زمان از طریق تحلیل عددی و بررسی‌های تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. اثر دمای فرآیند (۲۰۰ و ۳۰۰ درجه‌سانتی‌گراد) بر رفتار سیلان ماده، توزیع تنش و کرنش مؤثر، یکنواختی ضخامت دیواره، نیروی مورد نیاز اکستروژن، توزیع سختی و ریزساختار فصل مشترک به‌صورت جامع ارزیابی شد. نتایج شبیه‌سازی المان محدود با داده‌های تجربی تطابق مناسبی داشتند و اختلاف میانگین کمتر از ۷ درصد گزارش گردید.

نتایج نشان داد که افزایش دما موجب کاهش قابل توجه تنش مؤثر و نیروی اکستروژن می‌شود، اما می‌تواند بر یکنواختی سیلان و کیفیت فصل مشترک تأثیرگذار باشد. بررسی سختی و ریزساختار نشان‌دهنده ایجاد اتصال مناسب بین هسته و پوسته بدون جدایش ماکروسکوپی بود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، دمای حدود ۲۵۰ درجه‌سانتی‌گراد به‌عنوان دمای بهینه جهت ایجاد تعادل میان کاهش نیروی فرآیند، یکنواختی تغییرشکل و کیفیت اتصال پیشنهاد می‌شود. از مهم‌ترین نوآوری‌ها و سهم علمی این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- طراحی و ساخت قالب اکستروژن با مکانیزم سنبه شناور ویژه تولید لوله‌های دوفلزی جدار نازک آلومینیوم ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ با استفاده از روش اکستروژن

۲- بررسی هم‌زمان عددی و تجربی پدیده ناهماهنگی سیلان بین هسته و پوسته (جلو زدن لایه‌ها) و تحلیل تأثیر آن بر کیفیت قطعه نهایی.

۳- برقراری ارتباط کمی بین توزیع کرنش مؤثر، گرادیان سختی و تغییرات ریزساختاری در ناحیه اتصال. تعیین بازه دمایی بهینه برای اکستروژن ترکیب آلیاژهای ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ با هدف ایجاد توازن میان استحکام، یکنواختی هندسی و مصرف انرژی.

نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند راهنمای عملی مناسبی برای تولید صنعتی لوله‌های بیمتال آلومینیومی سبک و مستحکم در کاربردهای هوافضا و صنایع انرژی فراهم نماید.

فهرست منابع

- [1] Bai, P., Chen, L., Liu, X., & Zhang, W. (2024). Interpretable descriptors for fatigue performance of aluminium alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 28, 2361–2374. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.014>

- [2] Zhang, X., Li, L., Wang, Z., Peng, H., Chen, S., Ban, T., Gao, J., Peng, Z. (2023). Ultrafine-grained Al–La–Mg–Mn alloy with superior thermal stability and strength-ductility synergy. *Materials Science and Engineering: A*, 873, 145035. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145035>
- [3] Bobruk, E. V., Zaripov, N. G., Ramazanov, I. A., Chinh, N. Q., & Valiev, R. Z. (2024). Low-temperature superplasticity of ultrafine-grained aluminum alloys: Recent discoveries and innovative potential. *Materials*, 17(13), 3311. <https://doi.org/10.3390/ma17133311>
- [4] Muribwathoho, O., Mungur, R., & Van Rooyen, G. (2022). Metal matrix composites fabricated with 5000 series marine grades of aluminium using friction stir processing: A state-of-the-art review. *Applied Sciences*, 12(24), 12832. <https://doi.org/10.3390/app122412832>
- [5] Wahid, M.A., Siddiquee, A.N., Khan, Z.A. (2020). Aluminum alloys in marine construction: characteristics, application, and problems from a fabrication viewpoint. *Marine Systems & Ocean Technology*, 15(1), 70–80. <https://doi.org/10.1007/s40868-019-00069-w>
- [6] Luo, H., Wang, Y. Q., & Zhang, P. (2020). Simulation and experimental study of 7A09 aluminum alloy milling under double liquid quenching 7A09. *Materials Engineering*, 27(2), 372-380. DOI:10.1007/s11771-020-4302-5
- [7] Chakraborty, P., Tiwari, V. (2022). Dynamic fracture behaviour of AA7475-T7351 alloy at different strain rates and temperatures. *Engineering Fracture Mechanics*, 279, 109065. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109065>
- [8] Thavasilingam, K., Sakthimurugan, D., Giridharan, K. (2025). Aluminum alloys for aircraft structures, in *Aerospace Materials*, 385–404. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-22118-7.00016-6>
- [9] Alem, S. A. A., Sabzvand, M. H., Govahi, P. et al. (2025). Advancing the next generation of high-performance metal matrix composites through metal particle reinforcement. *Adv Compos Hybrid Mater*, 8, 3. <https://doi.org/10.1007/s42114-024-01057-4>
- [10] Phiri, R., Mavinkere Rangappa, S., Siengchin, S., Oladijo, O. P., Ozbakkaloglu, T. (2024). Advances in lightweight composite structures and manufacturing technologies: A comprehensive review, *Heliyon*, 10(21), e39661. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39661
- [11] Huang, X., Su, S., Xu, Z., Miao, Q., Li, W., & Wang, L. (2023). Advanced Composite Materials for Structure Strengthening and Resilience Improvement. *Buildings*, 13(10), 2406. <https://doi.org/10.3390/buildings13102406>
- [12] Clyne, T. W., and Hull, D. (2019). *An introduction to composite materials*. Cambridge university press. <https://doi.org/10.1017/9781139050586>
- [13] Boroumand, R., Babaei, A., Mazloun Bashiri, H. and Zaheri, M. H. (2022). Processing MMC Tubes Via Friction Stir Backward Extrusion. *Karafan Journal*, 19(1), 225-241. doi: 10.48301/kssa.2021.287462.1550. (In Persian)
- [14] Swarnkar, R., Karmakar S., Pal S. K. (2023). An investigation of bimetallic tube fabrication through a novel friction stir extrusion based technology for automotive applications. *Materials Today Communications*, 35, 106363. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106363>
- [15] Standley, M. R., Knezevic, M. (2025). Accumulative extrusion bonding of Cu/Al bimetallic tubes: Design, fabrication, characterization, testing, and modeling.

- Journal of Materials Research and Technology*, 36, 1860-1874.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.03.236>
- [16] Semiatin, S. L. (2005). *Metalworking: bulk forming*: ASM International. doi: 10.1361/asmhba0004015
- [17] Zeng, Z., Liu, H., Zhu, F. C., Wang, S. Z., Wang, Q. Z., Xue, Y. D., P., ... & Ma, Z. Y. (2024). Hybrid additive manufacturing of aluminum matrix composites with improved mechanical properties compared to extruded counterparts. *Composites Part B: Engineering*, 280, 111497. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111497>
- [18] Li, H., Zhu, Y., Chen, W., Yuan, C., Wang, L. (2024). Advanced bending and forming technologies for bimetallic composite pipes. *Materials*, 18(1), 111. <https://doi.org/10.3390/ma18010111>
- [19] Hashemi, S. J., Rahmani, F., Seyedkashi, S. M. H. (2023). Study of Effect of Temperature on Forming Diameter and Thinning in Warm Incremental Forming of Aluminum Tubes. *Karafan Journal*, 20(3), 129-148. doi: 10.48301/kssa.2023.381133.2416. (In Persian)
- [20] Hwang, Y. M., & Hsu, I. P. (2023). Die Design and Finite Element Analysis of Welding Seams during Aluminum Alloy Tube Extrusion. *Metals*, 13(5), 911. <https://doi.org/10.3390/met13050911>
- [21] Giarmas, E., Tzetzis, D. (2022). Optimization of die design for extrusion of 6xxx series aluminum alloys through finite element analysis: a critical review. *Int J Adv Manuf Technol*, 119, 5529–5551. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08694-3>
- [22] Ranjan, R., Yogesh Dewang, Y., Raghuwanshi, J., Sharma, V. (2020). Finite element analysis of extrusion process using aluminum alloy. *Materials Today: Proceedings*, 24(2), 500-509. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.302>
- [23] Al-Baghdadi, M. A. S., & Al-Waily, M. (2021). Three-dimensional fluid-thermal-structure multiphysics interaction simulation model of aluminium extrusion process. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 15(3), 8253-8261. DOI:10.15282/jmes.15.3.2021.04.0648
- [24] Haddadi, E., Jafarzadeh, H. and Shameli, M. (2025). Numerical and Experimental Study of Backward-Radial Extrusion Process for Flanged Brass Alloy C26000 Parts. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-12737-7>
- [25] Volokitin, A. V., Volokitina, I. E., Denissova, A. I., Seref Sonmez, M. (2025). Severe Plastic Deformation Methods Influence on the Structure and Properties of Metal Materials: A Review: Methods for producing consolidated nanomaterials. *Johnson Matthey Technology Review*, 69(2). <https://doi.org/10.1595/205651325X17343556140949>
- [26] Zohrevand, M., Khatami, A. R., Faraji, G. (2025). Non-equal channel angular press bonding (NECAPB) as a novel severe plastic deformation technique; bonding and interface. *Materials Today Communications*, 114199. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.114199>
- [27] Horita, Z. (2025). Strengthening of Aluminum Alloys Using Severe Plastic Deformation. *Materials Transactions*, 66(12), 1501–1512. DOI:10.2464/jilm.73.559
- [28] Hatami Sadr, M., Jafarzadeh, H. (2020). Characterization of AZ91 magnesium alloy processed by cyclic contraction/expansion extrusion using the experimental and

- micromechanical cellular automaton finite element approach. *Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 234(11), 1417–1430. <https://doi.org/10.1177/1464420720944194>
- [29] Langdon, T. G. (2025). Recent advances in using severe plastic deformation for the processing of nanomaterials. *Nanoscale*, 17(30), 17417–17427. DOI:10.1039/d5nr01886b
- [30] Zayed, E. M., Alateyah, A. I., El-Garaihy, W. H., Shaban, M., Alinizzi, M. (2025). Advancing Severe Plastic Deformation for Tubular Samples: Systematic Review and Machine Learning Optimization. *MetalMat*, e70026. <https://doi.org/10.1002/metm.70026>
- [31] Zayed, E. M., Shazly, M., El-Sabbagh, A., El-Mahallawy, A. (2023). Deformation behavior and properties of severe plastic deformation techniques for bulk materials: A review. *Heliyon*, 9(6). DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16700
- [32] Asano, M., Yuasa, M., Miyamoto, H., Tanaka, T., Erdogan, C., Yalcinkaya, T. (2020). Potential of high compressive ductility of ultrafine grained copper fabricated by severe plastic deformation. *Metals*, 10(11), 1503. <https://doi.org/10.3390/met10111503>
- [33] Li, Q., Zhang, X., Wang, L., & Qiao, J. (2022). The effect of extrusion and heat treatment on the microstructure and tensile properties of 2024 aluminum alloy. *Materials*, 15(21), 7566. <https://doi.org/10.3390/ma15217566>