

Microstructural evolution and mechanical properties of Mg alloys after processing by HPTE technique

Farshad Akbaripanah *, Behnam Khakipour

Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

ABSTRACT: This study investigates the effect of high-pressure torsion extrusion (HPTE) as a severe plastic deformation method on the mechanical properties and microstructure of AZ80 and ZK30 alloys. By inducing high strains, HPTE significantly improves the microstructure and mechanical properties of the samples. The alloys were initially produced by centrifugal casting and then subjected to HPTE at room temperature. Shear punch tests and Vickers hardness tests were conducted to assess mechanical properties, and the structure of the samples was examined using electron backscatter diffraction (EBSD). The average grain size of AZ80 alloy decreased from an initial value of 5.10 μm to 2.40 μm , 3.52 μm , and 3.33 μm for the v8 ω 0.6, v5 ω 1, and v1 ω 1 conditions, respectively. For ZK30 alloy, the grain size reduced from 30.87 μm to 6.51 μm under the v6 ω 0.6 condition. The final shear strength of AZ80 alloy in the extruded sample was 157 MPa, and under HPTE at the v8 ω 0.6 condition, it increased to 183 MPa. As the ω/v ratio increased, shear strength decreased. For ZK30 alloy, the shear strength in the extruded sample was 147 MPa, and under HPTE at the v6 ω 0.6 condition, it increased to 176 MPa, showing a 20% improvement. The results indicate that HPTE improves the mechanical properties of both alloys due to grain refinement during the process.

Review History:

Received: Nov. 17, 2024
Revised: Mar. 30, 2025
Accepted: Apr. 04, 2025
Available Online: Apr. 12, 2025

Keywords:

Microstructural Evolution
High-Pressure Torsional Extrusion
Shear Punch Test
Severe Plastic Deformation
AZ80 and ZK30 Alloys

1- Introduction

In recent years, ultrafine-grained (UFG) and nanostructured metals have attracted considerable attention due to their superior mechanical properties such as high strength and improved ductility. Among various severe plastic deformation (SPD) techniques, processes like Equal Channel Angular Pressing (ECAP), High Pressure Torsion (HPT), and Accumulative Roll Bonding (ARB) have demonstrated great potential in refining grain size to the submicron and nanometer range, significantly enhancing material performance [1-5]. Despite the effectiveness of HPT in producing nanostructures, its limitation in sample size has restricted its industrial applications. To overcome this issue, the High-Pressure Torsion Extrusion (HPTE) process was introduced as a novel method combining HPT with cyclic expansion extrusion, enabling the processing of larger samples with higher accumulated strain [6]. In this study, the HPTE process is applied to two magnesium alloys, AZ80 and ZK30, to investigate its influence on microstructure and mechanical properties. Due to the hexagonal close-packed (HCP) structure of magnesium, plastic deformation is more challenging compared to FCC metals. The application of HPTE provides an effective route to refine the grain structure and enhance the mechanical behavior of these lightweight industrial alloys.

2- Methodology

2- 1- Sample Preparation

High-purity magnesium, aluminum, zinc, manganese, and zirconium (99.9%) were used to prepare AZ80 and ZK30 billets according to standard weight percentages. Magnesium was melted in a graphite crucible at 750 °C using a flux (Magrex 36) to prevent oxidation. After adding alloying elements and holding the melt for 20 minutes, the mixture was stirred and cast using a rotational casting method into preheated steel molds (200 °C) to minimize oxide contamination. The billets (Ø44 mm, 120 mm length) were air-cooled and then hot-extruded to Ø12 mm using a 60-ton hydraulic press at 380 °C and a speed of 15 mm/min with MoS₂ lubricant. Final billets were cut to Ø12 mm × 35 mm for HPTE processing.

2- 2- High-Pressure Torsion Extrusion (HPTE)

In HPTE, billets were deformed between two rotating and pressing dies, ensuring full filling of die cavities and inducing hydrostatic pressure through friction and geometry. The process introduces severe shear deformation along the entire length of the sample. The HPTE system (W. Klement GmbH, 150 tons) located at Karlsruhe Institute of Technology (KIT), can operate between 20–400 °C. During the process, torque–twist angle diagrams were recorded and temperature was

*Corresponding author's email: f.akbaripanah@gmail.com



controlled with ± 1 °C accuracy. Process parameters are listed in Table 1.

2- 3- Metallography

After HPTE, samples ($\varnothing 10.6$ mm $\times$ 0.8 mm thick) were ground, polished with diamond paste, and etched using a solution of 10 mg acetic acid, 4.2 g picric acid, 10 mL water, and 70 mL alcohol. Microstructure analysis was performed using a Scanning Electron Microscope (SEM) equipped with EBSD (NordlysNano, Oxford Instruments) at Charles University, allowing crystallographic orientation and grain structure examination.

2- 4- Punch Shear Test

To evaluate mechanical properties, punch shear tests were conducted at room temperature on $\varnothing 10.6$ mm $\times$ 0.8 mm discs using a Zwick test machine at KIT. Four samples of each alloy were tested. A cylindrical punch applied force until the sample failed. Force–displacement data were recorded to determine peak force and energy absorption.

2- 5- Microhardness Test

To determine the final hardness, Vickers Microhardness testing was carried out using a 100 g load for 10 seconds. Multiple indentations were made across each sample surface, and the average diagonal measurements of the imprints were used to calculate the final hardness

3- Conclusions

In this study, the behavior of AZ80 and ZK30 alloys was investigated using Vickers hardness tests, punch shear tests, and grain size analysis through Electron Backscatter Diffraction (EBSD). The results are as follows:

The grain size in all high-pressure torsion-extruded samples is finer compared to the extruded state. The average grain size of the extruded AZ80 alloy is 5.10 μm , which after the high-pressure torsion extrusion process, is reduced to 3.52 μm at the v5 ω 1 condition and 3.33 μm at the v1 ω 1 condition. In the v8 ω 0.6 condition, the average grain size is 2.40 μm , showing the minimum value. The results indicate that decreasing the ratio of ω/v reduces the grain size and improves the grain structure.

For the ZK30 alloy, after the high-pressure torsion extrusion process, the grain size becomes finer. The average grain size in the extruded sample is 30.87 μm , which decreases to 6.51 μm in the v6 ω 0.6 condition, demonstrating the positive impact of the high-pressure torsion extrusion process in improving the grain structure and achieving a finer microstructure.

For both alloys, the high-pressure torsion extrusion process leads to an increase in final shear strength. The final shear strength of the AZ80 alloy in the extruded sample is

157.65 MPa, and under high-pressure torsion extrusion, it increases to 183.63 MPa in the v8 ω 0.6 condition. For the ZK30 alloy, the final shear strength in the extruded sample is 147.95 MPa, and it increases to 176.33 MPa in the v6 ω 0.6 condition, showing an increase in final shear strength.

Processing magnesium alloy samples using high-pressure torsion extrusion results in higher saturation hardness compared to the channel angular pressing method. This difference is primarily due to the reduction in average grain size, which was measured using Electron Backscatter Diffraction. The high-pressure torsion extrusion process can produce similar microstructural and mechanical properties as high-pressure torsion, but it is also applicable to bulk samples. This process, by applying severe plastic deformation, increases dislocation density and reduces grain size to reach saturation hardness and strength. Therefore, the mechanical properties observed in thin disks after high-pressure torsion processing are expected to appear in ingots processed with high-pressure torsion extrusion. One of the advantages of this process is achieving a highly desirable microstructure and high hardness values with a single pass. These features make high-pressure torsion extrusion an efficient and suitable method for industrial applications, particularly in enhancing the strength of alloys and metals.

References

- [1] T.G. Langdon, The processing of ultrafine-grained materials through the application of severe plastic deformation, *Journal of Materials Science*, 42 (2007) 3388-3397.
- [2] B.E. Mehdi Shabanghazani, A Review of Various Severe Plastic Deformation (SPD) Techniques, (in Persian).
- [3] R.Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T.G. Langdon, M.J. Zechetbauer, Y.T. Zhu, Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation, *Jom*, 58 (2006) 33-39.
- [4] R.Z. Valiev, T.G. Langdon, Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, *Progress in materials science*, 51(7) (2006) 881-981.
- [5] G.F. Armin Siah-Sarani, Farshad Samadpour, Structural and Mechanical Study of Magnesium Alloy Produced by Hydrostatic Extrusion-Expansion Severe Plastic Deformation Technique, *Modares Journal of Mechanical Engineering*, 20(4) (2020) 925-932.(in Persian).
- [6] Y. Ivanisenko, R. Kulagin, V. Fedorov, A. Mazilkin, T. Scherer, B. Baretzky, H. Hahn, High pressure torsion extrusion as a new severe plastic deformation process, *Materials Science and Engineering: A*, 664 (2016) 247-256.



مطالعه و بررسی بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای منیزیم پس از فرایند اکستروژن پیچشی تحت فشار بالا

فرشاد اکبری پناه^{*}، بهنام خاکی پور

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

کلمات کلیدی:

تحولات ریز ساختاری

اکستروژن پیچشی فشار بالا

آزمون پانچ برشی

تغییر شکل پلاستیک شدید

آلیاژ AZ80 و ZK30

خلاصه: این پژوهش به بررسی تأثیر فرایند اکستروژن پیچشی تحت فشار بالا، به عنوان یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، بر خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژهای AZ80 و ZK30 پرداخته است و با ایجاد کرنش‌های بالا، موجب بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌ها شده است. ابتدا، آلیاژها با ریخته‌گری دورانی تولید و سپس در دمای اتاق تحت اکستروژن پیچشی فشار بالا قرار گرفتند. آزمون‌های پانچ برشی و سختی‌سنجی ویکرز برای بررسی خواص مکانیکی انجام شد و ساختار نمونه‌ها با پراش الکترون‌های بازگشتی بررسی شد. میانگین اندازه دانه برای آلیاژ AZ80 از مقدار اولیه $5/10 \mu m$ به مقدار $2/40 \mu m$ و $3/52 \mu m$ به $3/33 \mu m$ به ترتیب برای حالت‌های $v1\omega1$ و $v5\omega1$ و $v8\omega0.6$ تغییر یافت و برای آلیاژ ZK30 از مقدار اولیه $30/87 \mu m$ به $6/51 \mu m$ در حالت $v6\omega0.6$ کاهش یافته است. استحکام برش نهایی آلیاژ AZ80 در نمونه اکستروژن شده $157/65 MPa$ و تحت فرایند اکستروژن پیچشی فشار بالا در حالت $v8\omega0.6$ به $183/63 MPa$ می‌رسد و هرچه نسبت ω/v افزایش یابد، مقدار استحکام برش نهایی کاهش می‌یابد. برای آلیاژ ZK30 در نمونه اکستروژن شده $147/95 MPa$ و تحت فرایند اکستروژن پیچشی فشار بالا در حالت $v6\omega0.6$ به $176/33 MPa$ می‌رسد که ۲۰٪ افزایش یافته است. با توجه به نتایج، استحکام برش نهایی نمونه‌ها پس از فرایند اکستروژن پیچشی فشار بالا افزایش یافته و موجب بهبود خواص مکانیکی آلیاژها شده است که دلیل این امر ریزتر شدن اندازه دانه تحت فرایند اکستروژن پیچشی فشار بالا است.

۱- مقدمه

در یک دهه گذشته، مواد فلزی دارای اندازه دانه‌های کوچک‌تر از یک میکرومتر به شدت مورد توجه واقع شده است. اگر اندازه دانه‌ها در ریزساختار مواد فلزی در محدوده $100-1000 nm$ باشد، به آن‌ها مواد فوق ریز دانه و اگر کوچک‌تر از $100 nm$ باشد به آن‌ها مواد نانوساختار گفته می‌شود. اخیراً فرآوری این نوع مواد با استفاده از روش‌های اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید بطور قابل ملاحظه‌ای مورد علاقه محققین و دانشمندان علم مواد واقع شده است. فلزات و آلیاژهای فوق ریز دانه/نانوساختار که با روش‌های مختلف تغییر شکل پلاستیک شدید به دست می‌آیند، از خواص فیزیکی و مکانیکی عالی از قبیل استحکام بالا، چقرمگی زیاد، قابلیت فرم پذیری بیشتر و ... برخوردار می‌باشند. لذا این قبیل مواد دارای مصارف و کاربردهای خاص و مهمی می‌باشند [۱].

توسعه روش‌های فرآوری برای بهبود خواص مکانیکی مواد، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. بعضی از این روش‌ها مانند پرس در کانال‌های زاویه دار همسان، فورج چند جهته، پیچش فشار بالا و نورد تجمعی روش‌های کاملاً توسعه یافته‌ای برای تولید مواد فوق ریز دانه می‌باشند که با استفاده از این روش‌ها می‌توان به اندازه دانه‌هایی در حد 70 تا 500 نانومتر دست یافت [۲-۵]. دهقان و همکارانش [۶]، در پژوهشی پس از انجام ۱۳ پاس فرایند نورد تجمعی بر ورق آلومینیوم AA1050، بهبود ریزساختار ورق تا دستیابی به دانه‌هایی با ابعاد نانومتری بررسی کردند. با توجه به نتایج، چگونگی تغییر ناهمگنی خواص مکانیکی ورق طی پاس‌های مختلف فرایند به صورت سینوسی است و کم‌ترین میزان ناهمگنی در پاس‌های سوم، چهارم و سیزدهم به وقوع پیوست. با انجام آزمون میکروسختی ویکرز در طول ضخامت ورق سختی و استحکام ورق‌ها در پاس‌های ابتدایی فرایند افزایش می‌یابد، در پاس‌های میانی تقریباً ثابت است و در پاس‌های پایانی

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: f.akbaripannah@gmail.com



حدود ۱۱۰ میکرومتر به ۶۳ نانومتر کاهش یافت. تقویت استحکام عمدتاً به دلیل تقویت دانه‌های ریز و همچنین تقویت‌های ناشی از نابجایی‌ها، فاز دوم و نقص‌های چینه‌ای بود. تغییر شکل پلاستیک به وسیله تعامل سیستم‌های لغزش متعدد و تبلور فشاری هماهنگ شد.

در سال ۲۰۱۶ به منظور رفع مشکل اندازه نمونه‌ها در روش پیچش فشار بالا، روشی به نام اکستروژن پیچشی فشار بالا معرفی گردید که تکمیل کننده اکستروژن انبساطی چرخه‌ای است [۱۴]. در این روش با اعمال همزمان پیچش فشار بالا و اکستروژن چرخه‌ای انبساطی دانه‌بندی و میکروساختار بهبود می‌یابد. زیرا با اعمال همزمان این دو فرآیند کرنش مجموع بیش‌تری در اثر پیچش به قطعه وارد می‌شود و دانه‌بندی بهتر می‌شود. در فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا یک نمونه توسط پانچ (در حال حرکت با سرعت ۷) و همچنین توسط ظروف (یکی از آن‌ها با سرعت ω می‌چرخد) تغییر شکل می‌دهد. هنگامی که یک نمونه برای تمام طول پانچ اکستروژد می‌شود، فرآیند متوقف می‌شود، پانچ بلند می‌شود و نمونه بعدی در قالب بارگیری می‌شود. کل طول یک نمونه دچار تغییر شکل پیچشی می‌شود، زیرا یک نمونه به تدریج از منطقه برشی عبور می‌کند. انتهای دو بیلت متوالی به دلیل تغییر شکل و برش به هم متصل می‌شوند. بنابراین، میکروساختارها و خواص حاصله در جهت طولی همگن هستند. برای دستیابی به سطح مورد نیاز فشار هیدرواستاتیک در ناحیه برشی، می‌توان هندسه ظروف را تغییر داد. کانال‌های انبساط و اکستروژن دارای قطر D_1 در صفحه‌ای هستند که به هم می‌رسند. D_0 و D_2 به ترتیب قطر ورودی و خروجی کانال‌های قالب هستند. کرنش انباشته شده در یک نمونه پس از یک بار گذر با تنظیم نسبت قطر نمونه (D_1/D_2) و سرعت انتقالی (۷) و چرخشی (ω) حرکت ابزارها بر اساس معادله‌ی زیر کنترل می‌شود [۱۴]:

$$\varepsilon = 2 \ln(D_1/D_0) + 2 \ln(D_1/D_2) + (1/\sqrt{3}) \times ((\omega \times R)/v) \times (D_1/D_2) \quad (1)$$

برخی از محققین ریز ساختارهای فلزات را تحت فرآیند اکستروژن پیچش فشار بالا مورد بررسی قرار دادند [۱۵، ۱۶]. برای مثال، مطالعه روی سختی و رسانایی الکتریکی مس خالص فرآوری شده با پرس در کانال‌های زاویه‌دار همسان و اکستروژن پیچشی فشار بالا [۱۷]، مطالعه روی ساختار تکاملی آلیاژ سیکلانیک (Si-cu-Ni) که با پرس در کانال‌های زاویه‌دار همسان و اکستروژن پیچشی فشار بالا فرآوری شده است [۱۸] و مطالعات

نیز کمی کاهش می‌یابد. میزان ازدیاد طول نیز پس از افت ناگهانی در پاس اول، در پاس‌های بعدی فرآیند با شیب کمی افزایش می‌یابد. مقصودلو و همکارانش [۷]، پرس‌کاری گرم تیتانیوم خالص درجه ۲ در کانال همسان زاویه‌دار یا ایکپ مورد مطالعه قرار دادند. بر روی نمونه‌ها، آزمون کشش اجرا و مشخص شد پس از چهار مرحله پرسکاری، استحکام کششی نهایی ۵۷٪ افزایش و کاهش سطح مقطع تنها ۱۴٪ افت داشته است. همچنین مشاهده تصاویر مقطع شکست پس از چهار مرحله ایکپ نشان داد که، ایجاد حفره‌های ریز، کم عمق و با توزیع یکنواخت که نشان‌دهنده همگن شدن ساختار است. گاد فرد و همکارانش [۸] به بررسی فرآیند فشار زاویه‌ای کانال مساوی برای بهبود خواص مکانیکی آلیاژ ME21 پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که پس از ۱۶ مرحله پرس زاویه‌ای کانال مساوی، دانه‌های فوق‌ریز (۱ میکرومتر) به‌دست آمد و استحکام تسلیم آلیاژ ۲۵۱٪ افزایش یافته و به ۱۹۱/۴ مگاپاسکال رسید. سختی نیز با ۵۲٪ افزایش به HV ۶۰/۷ رسید، در حالی که شکل‌پذیری مناسبی معادل ۸/۱٪ حفظ شد. این بهبودها به دلیل تبلور مجدد دینامیکی، مرزهای دانه‌ای زاویه بالا و رسوبات ریز و یکنواخت Mg12Ce و Mn حاصل شدند. دای و همکارانش [۹]، به بررسی تأثیر فرآیندهای مختلف، از جمله نورد دوگانه، بر رفتار مکانیکی و ریزساختار آلیاژ Al-Zn-Mg-Cu پرداختند. نتایج نشان داد که نورد دوگانه استحکام کششی نهایی را به ۶۹۰ مگاپاسکال افزایش داده و با اصلاح بافت و کاهش اندازه دانه‌ها، مقاومت در برابر خم شدن و عمر خستگی آلیاژ را بهبود داده است.

پیچش فشار بالا یکی از کارآمدترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید در تولید مواد حجیم نانو ساختار می‌باشد [۱۰]. در روش پیچش فشار بالا نمونه اولیه معمولاً به شکل دیسک نازک با ضخامت ۲ تا ۵ میلی‌متر و قطر ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر بوده که به طور همزمان تحت فشار هیدرواستاتیک و تنش‌های برشی قرار می‌گیرد [۱۱]. یکی از بزرگ‌ترین مزایای این روش، قابلیت کنترل جداگانه میزان کرنش، فشار و نرخ کرنش اعمالی می‌باشد. این قابلیت‌ها باعث شده که این روش به عنوان روش آزمایشگاهی مناسب برای مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف بر روی ساختار فوق ریزدانه حاصله بکار گرفته شود [۱۲]. ایکسیو و همکارانش [۱۳]، به بررسی فرآیند پیچش با فشار بالا و تأثیر آن بر تکامل ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ Mg-9Gd-3.8Y-1.9Zn-0.5Zr پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد پیچش‌ها، چگالی نابجایی افزایش یافته و سختی میکروسکوپی آلیاژ به HV ۱۲۸ رسید. اندازه دانه‌ها از

در این مواد کمک می‌کند.

۲- آزمون‌های تجربی

۲-۱- آماده سازی نمونه

برای تهیه بیلت‌های آلیاژ AZ80 و ZK30 جهت فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا، از عناصر منیزیم، آلومینیوم، منگنز، روی و زیرکونیوم با خلوص بالا (۹۹/۹٪) مطابق با درصدهای وزنی استاندارد استفاده شد. منیزیم در بوته گرافیتی و با استفاده از کوره الکتریکی در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد ذوب شد. برای جلوگیری از اکسید شدن و سوختن منیزیم، فرآیند ذوب با استفاده از فلاکسی با نام تجاری مگرکس ۳۶^۴ انجام شد. میزان فلاکس مصرف شده تقریباً یک درصد وزنی بار ذوب بود. پس از ذوب کامل منیزیم، سایر عناصر آلیاژی به مذاب اضافه و به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. سپس مذاب به مدت ۳ دقیقه هم زده شد.

برای جلوگیری از ورود لایه های اکسیدی به داخل مذاب، از روش ریخته گری دورانی استفاده شد. قالب از جنس فولاد ساده کربنی با قطر ۴۴ میلی‌متر و طول ۱۲۰ میلی‌متر بود و قبل از ریخته‌گری تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد. پس از ریخته‌گری، نمونه‌ها از قالب خارج و در محیط اتاق به آرامی خنک شدند.

برای بهبود خواص مکانیکی و هم راستایی دانه‌ها، بیلت‌های استوانه‌ای از جنس آلیاژ AZ80 و ZK30 تحت فرآیند اکستروژن داغ قرار گرفتند. ابتدا برای حذف عیوب سطحی، ۲ میلی‌متر از سطح نمونه‌های ریخته گری شده با استفاده از دستگاه تراش برداشته شد. سپس از پرس هیدرولیکی ۶۰ تنی برای اکستروژن بیلت‌ها به قطر ۱۲ میلی‌متر با نسبت اکستروژن ۶/۷۵ در دمای ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱۵ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد. برای کاهش اصطکاک از روانکار مولیبدن دی سولفات^۵ استفاده گردید. در نهایت، بیلت‌های اکستروژن شده به استوانه‌هایی با قطر ۱۲ و طول ۳۵ میلی‌متر برای فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا برش داده شدند. فرایند اکستروژن پیچشی فشار بالا شامل مراحل مختلف است. در ابتدا، مجاری همه قالب‌ها باید کاملاً با مواد پر شوند. مواد اکستروژن شده به عنوان یک شاخه عمل می‌کند و اطمینان می‌دهد که دو ظرف در طول فرایند به طور کامل پر می‌مانند. کاهش قطر کانال و اصطکاک منجر به نیروهایی می‌شود که بر خلاف جهت اکستروژن عمل کرده و فشار هیدرواستاتیک را در ناحیه برشی ایجاد می‌کنند. بنابراین، یک نمونه توسط پانچ (در حال حرکت با سرعت ۱۷

روی تاثیر مد تغییر شکل پلاستیک شدید میکرو ساختارهای مس خالص انجام شده است [۱۹]. عمران‌پور و همکارانش [۲۰]، تأثیر تکنیک اکستروژن پیچشی تحت فشار بالا را بر مقاومت به سایش آلومینیوم AA105 بررسی کردند. نتایج نشان داد این روش باعث بهبود خواص مکانیکی و ایجاد مواد با دانه‌های فوق‌العاده ریز می‌شود. آزمون سایش نیز کاهش حجم جابه‌جایی و افزایش سختی مواد را تأیید کرد که موجب کاهش پلاستیسیته و بهبود رفتار سایش شده است. توکلی و همکارانش [۲۱]، تأثیر اکستروژن پیچشی تحت فشار بالا و پیرسازی مصنوعی (AA) را بر استحکام و هدایت الکتریکی آلیاژ Al-Mg-Si بررسی کردند. نتایج نشان داد که این فرآیندها استحکام نهایی را به ۳۸۰ مگاپاسکال و هدایت الکتریکی را به ۵۳٪ IACS افزایش می‌دهند. تحلیل‌های ریزساختاری با استفاده پراش پرتو ایکس^۱، پراش الکترون برگشتی، میکروسکوپ الکترونی عبوری^۲، و طیف‌سنجی انرژی پراکن اشعه ایکس^۳. نشان داد که رسوبات نانو و مناطق GP به‌طور یکنواخت در دانه‌ها توزیع شده‌اند.

فرآیند اکستروژن پیچشی تحت فشار بالا، به‌عنوان یکی از روش‌های پیشرفته تغییر شکل پلاستیک شدید، با ترکیب فشار بالا و پیچش کنترل شده قادر است ساختارهای فوق‌ریزدانه ایجاد کند. این فرآیند بهبود چشمگیری در خواص مکانیکی و فیزیکی مواد، از جمله افزایش سختی، استحکام، و مقاومت به خزش، به همراه دارد. در این پژوهش، برای نخستین بار، این روش بر روی آلیاژهای منیزیم اعمال شده است، در حالی که تحقیقات پیشین عمدتاً بر فلزاتی نظیر مس و آلومینیوم متمرکز بوده‌اند. نوآوری اصلی این پژوهش در اعمال فرآیند اکستروژن پیچشی تحت فشار بالا برای آلیاژهای منیزیم است، که تاکنون کم‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند. آلیاژهای منیزیم به دلیل ساختار کریستالی هگزاگونال فشرده و محدودیت‌های موجود در مکانیسم‌های تغییر شکل پلاستیک، در فرآیندهای تغییر شکل شدید پلاستیک چالش‌های خاصی را ایجاد می‌کنند. این پژوهش با بررسی تجربی این فرآیند بر روی آلیاژهای AZ80 و ZK30، به تحلیل اثرات کرنش‌های بالا بر ریزساختار و خواص مکانیکی این مواد می‌پردازد و نشان می‌دهد که فرآیند اکستروژن پیچشی تحت فشار بالا می‌تواند به طور مؤثری خواص آلیاژهای منیزیم را بهبود بخشد. این تحقیق علاوه بر اینکه گامی جدید در کاربرد فرآیند اکستروژن پیچشی تحت فشار بالا در آلیاژهای منیزیم است، به درک بهتر چالش‌ها و پتانسیل‌های فرآیندهای تغییر شکل شدید پلاستیک

1. XRD

2. TEM

3. EDX

4. Megarex 36

5. MoS2



شکل ۱. نمونه‌های آماده شده جهت فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا

Fig. 1. Prepared samples for the High-Pressure Torsion Extrusion (HPTE) process

جدول ۱. ویژگی‌ها حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده برای فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا

Table 1. Characteristics of different considered conditions for the High-Pressure Torsion Extrusion (HPTE) process

آلیاژ	T(°C)	ω (rpm)	V(mm/min)
رژیم ۱ AZ80	۲۰۰	۰/۶	۸
رژیم ۲ AZ80	۲۲۰	۱	۵
رژیم ۳ AZ80	۲۲۰	۱	۱
رژیم ۱ ZK30	۱۷۵	۰/۶	۶

۳۵ میلی‌متر را در بازه دمایی ۲۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد پردازش کند. در طول آزمایش، نمودار گشتاور در برابر زاویه پیچش ثبت می‌شود و دما با دقت ۱ درجه سانتی‌گراد کنترل می‌گردد. شرایط آزمون‌های اکستروژن پیچشی فشار بالا انجام شده در جدول ۱ آورده شده است. در نهایت آزمون‌هایی برای بررسی میکروساختار و خواص مکانیکی انجام گردید.

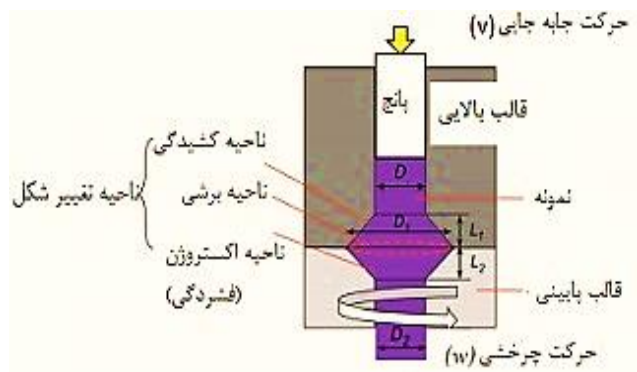
۲-۲- متالوگرافی

به منظور بررسی ریز ساختارهای آلیاژ AZ80 و ZK30 پس از فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا نمونه‌ها به قطر ۱۰/۶ میلی‌متر و ضخامت ۰/۸ میلی‌متر سنباده زنی شده، با الکل شسته می‌شود. سپس با نمد سیاه و نازک و خمیر الماس به مدت یک دقیقه پولیش داده می‌شود و سریعاً با الکل شسته می‌شود. به منظور اچ کردن نمونه‌ها در محلول ۱۰ میلی‌گرم اسید

و همچنین توسط قالب (یکی از آن‌ها با سرعت ω می‌چرخد) تغییر شکل می‌دهد. هنگامی که یک نمونه به‌طور کامل در طول پانچ اکستروژن می‌شود، فرآیند متوقف شده، پانچ بالا می‌رود و نمونه بعدی درون قالب قرار می‌گیرد. نمونه به تدریج از منطقه برشی عبور می‌کند و کل طول یک نمونه دچار تغییر شکل پیچشی می‌شود. انتهای دو بیلت متوالی به دلیل تغییر شکل و برش به هم متصل می‌شوند. دستگاه فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا و قالب‌های آن در شکل ۲-الف و ۲-ب نشان داده شده است. دستگاه اکستروژن پیچش تحت فشار^۱ در مؤسسه فناوری کارلسروهه توسط کامپیوتر کنترل می‌شود و ظرفیت ۱۵۰ تن دارد، توسط شرکت دلبیو. کلمنت جی‌ام‌بی‌اچ^۲ ساخته شده است. این دستگاه قادر است نمونه‌های میله‌ای با قطر ۱۲ میلی‌متر و طول

1. HPTE

2. W. Klement GmbH



شکل ۳. اجزای قالب اکستروژن پیچشی فشار بالا

Fig. 3. Components of the High-Pressure Torsion Extrusion (HPTE) die

شده است. در این پژوهش، ۴ نمونه از هردو آلیاژ AZ80 و ZK30 برای انجام تست با قطر ۱۰/۶ و ضخامت ۰/۸ میلی متر استفاده شده است. نمونه‌ها در دمای اتاق درون قالب‌های استوانه‌ای قرار می‌گیرند و در اثر اعمال فشار به وسیله پانچ نمونه مورد آزمایش سوراخ می‌گردد. با استفاده از حسگر، میزان نیرو در هر لحظه ثبت می‌شود تا به حداکثر مقدار خود برسد و این روند تا زمان سوراخ شدن نمونه ادامه می‌یابد. سپس با استفاده از داده‌های اولیه نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی فک به دست می‌آید.

۲-۴- آزمون سختی سنجی

برای اندازه‌گیری سختی نهایی آلیاژها تحت فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا آزمون سختی سنجی ویکرز انجام می‌شود. برای انجام این تست با استفاده از دستگاه میکرو سختی سنج هر نمونه تحت بار ۱۰۰ g در مدت زمان ۱۰ ثانیه قرار می‌گیرد. نقاطی از سطح تحت آزمون میکرو سختی قرار می‌گیرد. قطر لوزی‌های حاصل شده از اثر فرورونده بر سطح نمونه‌ها اندازه‌گیری شده و میانگین سختی‌های حاصل شده به عنوان سختی نهایی برای هر نمونه گزارش شده است.

۳- نتایج آزمون‌ها

۳-۱- بررسی میکرو ساختار

الگوی جهت‌گیری دانه‌ها برای لبه‌ی دیسک‌ها برای نمونه اکستروژن شده و پس از فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا با روش پراش الکترون‌های بازگشتی به دست آمده و در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج مربوط به میانگین دانه‌ها با توجه به اشکال ذکر شده در نمودار شکل ۴ آورده شده است. همانگونه



شکل ۲. دستگاه فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا در مؤسسه فناوری کارلسروهه^۱

Fig. 2. High-Pressure Torsion Extrusion (HPTE) device at the Karlsruhe Institute of Technology.

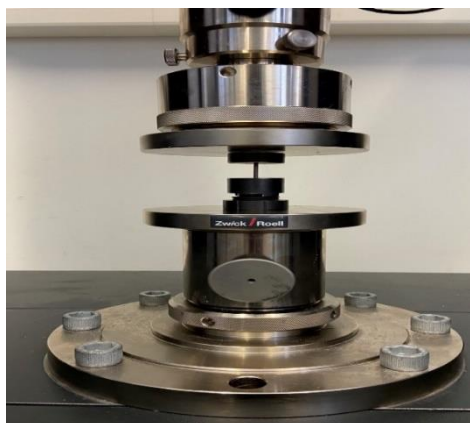
¹ Karlsruhe Institute of Technology

استیک، ۴/۲ گرم اسید پیکریک، ۱۰ میلی‌لیتر آب و ۷۰ میلی‌لیتر الکل قرار داده می‌شود. آزمایشگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی در مؤسسه پترولوژی و زمین‌شناسی ساختاری، دانشکده علوم دانشگاه چارلز مجهز به فناوری پیشرفته میکروسکوپ الکترونی روبشی از جمله سیستم پراش الکترونی برگشتی^۱ است. این سیستم مجهز به دتکتور نوردلیس‌نانو^۲ (ساخت شرکت ابزار دقیق آکسفورد^۳) همراه با نرم‌افزارهای ای‌زدتک^۴ و چنل فایو^۵ است و امکان تحلیل جهت‌گیری بلورشناسی و مطالعه ساختارهای تغییرشکل در مواد را فراهم می‌کند. در نهایت با میکروسکپ الکترونی مرزهای دانه بندی تحولات ریز ساختارها مشاهده و میانگین دانه‌ها اندازه‌گیری می‌شود.

۲-۳- آزمون سنبه برشی

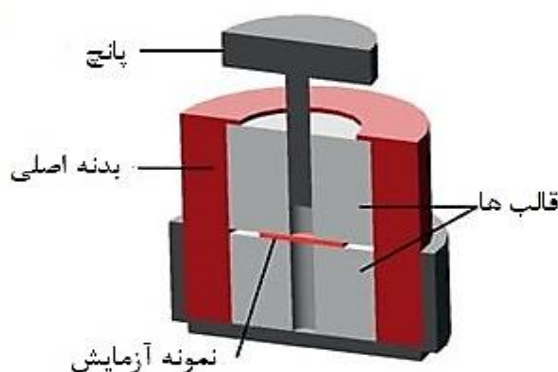
برای تعیین خواص مکانیکی تست سنبه برشی بر روی نمونه‌های آلیاژ منیزیم انجام می‌شود. از این رو، از دستگاه زوییک^۶ مؤسسه فناوری کارلسروهه برای انجام تست پانچ برشی در دمای اتاق که مجموعه ای از قالب‌ها و سنبه استوانه‌ای است، استفاده می‌شود که در شکل ۳ نشان داده

1. EBSD
2. NordlysNano
3. Oxford Instruments
4. AZtec
5. Channel 5
6. Zwick



شکل ۵. دستگاه زوییک برای انجام تست پانچ برشی در مؤسسه فناوری کارلسروهه

Fig. 5. Zwick machine for performing the punch shear test at the Karlsruhe Institute of Technology



شکل ۴. شماتیک قالبهای آزمون سنبه برشی

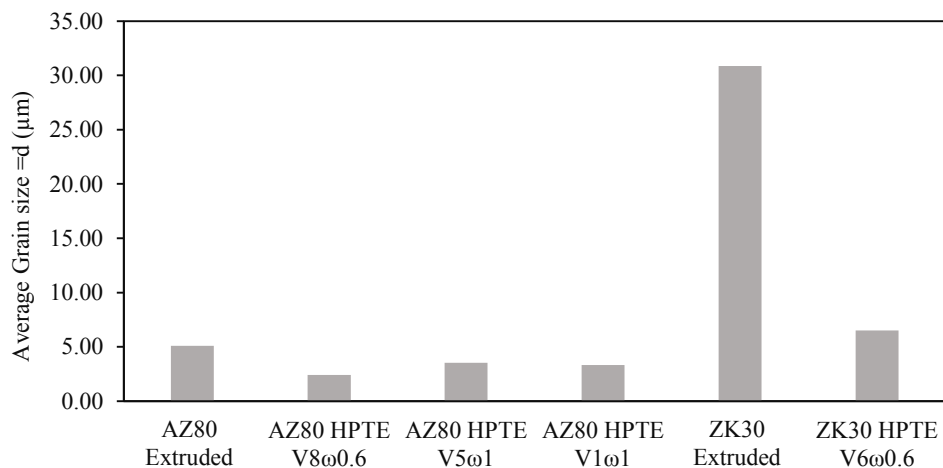
Fig. 4. Schematic of the punch shear test dies

دانه‌های به‌دست‌آمده توسط پراش الکترون‌های بازگشتی برای قسمت‌های لبه نمونه‌های آلیاژ ZK30 در فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا است. براساس شکل ۶-الف قبل از فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا، ساختار نمونه اکستروژن شده دانه‌های نسبتاً درشت با اندازه‌های متفاوت را شامل می‌شود. نمودار توزیع دانه‌ها نشان می‌دهد که اندازه دانه‌ها در یک بازه وسیعی با میانگین $30/87 \mu\text{m}$ قرار دارند که ساختار آلیاژ پس از فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا در حالت $v6\omega0.6$ نسبت به حالت اکستروژن شده ریزتر و میانگین اندازه دانه‌ها به $6/51 \mu\text{m}$ کاهش یافته است که نشان دهنده تاثیر مثبت فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا در بهبود دانه بندی و ایجاد ساختار ریزتر است.

۳-۲- نتایج آزمون پانچ برشی

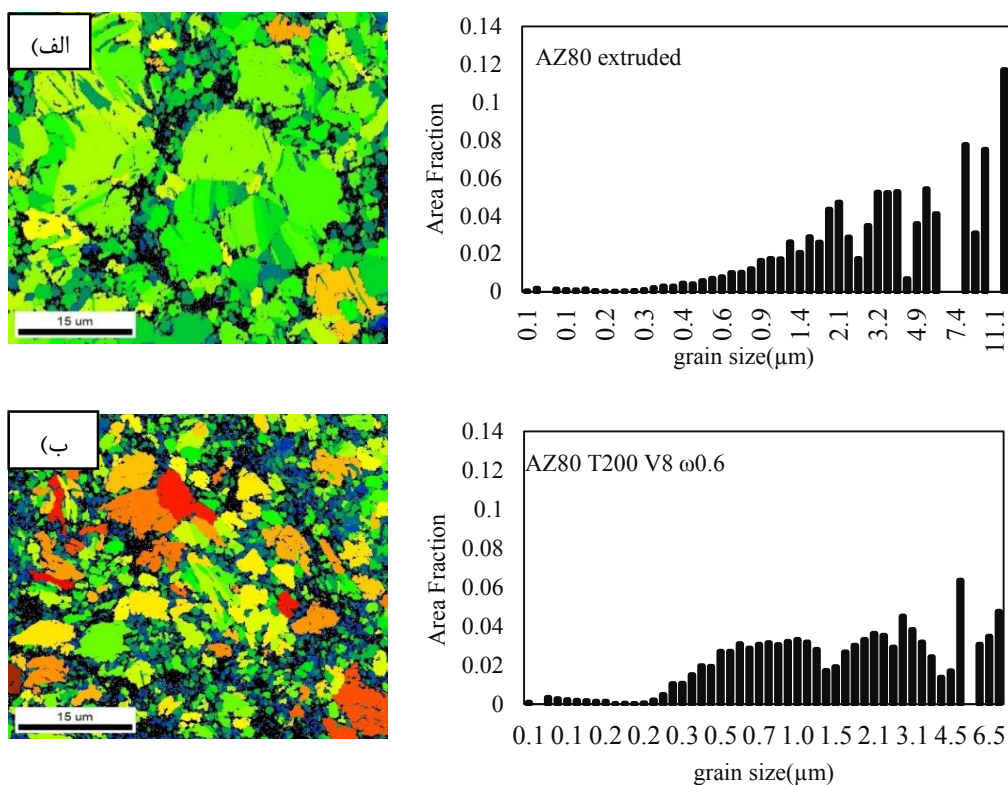
رفتار مکانیکی آلیاژهای AZ80 و ZK30 با استفاده از روش پانچ برشی مورد بررسی قرار گرفت. این روش برای آلیاژها (AA1050) [۲۲] و مس [۲۳، ۲۴] مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۹ نمودار تنش برشی بر اساس جابه‌جایی نرمالایز شده برای آلیاژ AZ80 است. مشاهده می‌شود که استحکام برش نهایی در جابه‌جایی نرمال شده $0/51$ برای $v8\omega0.6$ برابر $183/63$ مگاپاسکال است. بیش‌ترین میزان استحکام برش نهایی در نمونه اکستروژن شده $160/84 \text{ MPa}$ است. پس از فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا این مقدار در سرعت‌های $v8\omega0.6$ برابر با $183/63 \text{ MPa}$ و هرچه

که مشاهده می‌شود، توزیع اندازه دانه در تمامی نمونه‌هایی که تحت فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا قرار گرفتند نسبت به حالت اکستروژن شده همگن‌تر است و دانه‌های ریزتری حاصل شده است. ساختار آلیاژ AZ80 اولیه اکستروژن شده یکنواخت و متوسط اندازه دانه‌ها $5/10 \mu\text{m}$ است. برای آلیاژ AZ80 در حالت $v8\omega0.6$ میانگین اندازه دانه‌ها در لبه نمونه $2/40 \mu\text{m}$ است که میانگین اندازه دانه‌ها به حداقل مقدار رسیده است. میانگین اندازه دانه‌ها در حالت $v5\omega1$ $3/52 \mu\text{m}$ و برای حالت $v1\omega1$ $3/33 \mu\text{m}$ است. نسبت ω/v به معنای نسبت سرعت زاویه‌ای (ω) به سرعت محوری (v) است که می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر ریزساختار ماده داشته باشد. این نسبت نشان‌دهنده تعادل میان نرخ تغییر شکل و زمان موجود برای فرآیندهای حرارتی و بازآرایی ریزساختار است. با توجه به میانگین اندازه دانه‌ها مشاهده می‌شود که با کاهش نسبت ω/v اندازه دانه‌ها کاهش یافته و ساختار دانه‌بندی بهبود می‌یابد. این کاهش در اندازه دانه‌ها نشان‌دهنده تاثیر مثبت کاهش این نسبت بر فرآیند تبلور مجدد دینامیکی و اصلاح ساختار ماده است. اما میانگین اندازه دانه‌ها در نمونه‌ای که تحت رژیم $v5\omega1$ قرار گرفته است نسبت به حالت پیشین اندکی افزایش یافته که دلیل این افزایش می‌تواند به گرمای تولیدشده در طول فرآیند نسبت داده شود. این گرما احتمالاً باعث رشد جزئی دانه‌ها شده است، زیرا در دماهای بالاتر، تمایل به رشد دانه‌ها افزایش می‌یابد. به طور کلی، این نتایج نشان می‌دهند که کنترل نسبت ω/v و مدیریت حرارت ایجادشده در فرآیند، نقش کلیدی در دستیابی به ریزساختار بهینه دارد. شکل ۶ نشان‌دهنده نقشه‌های جهت‌گیری دانه‌ها و نمودار توزیع اندازه



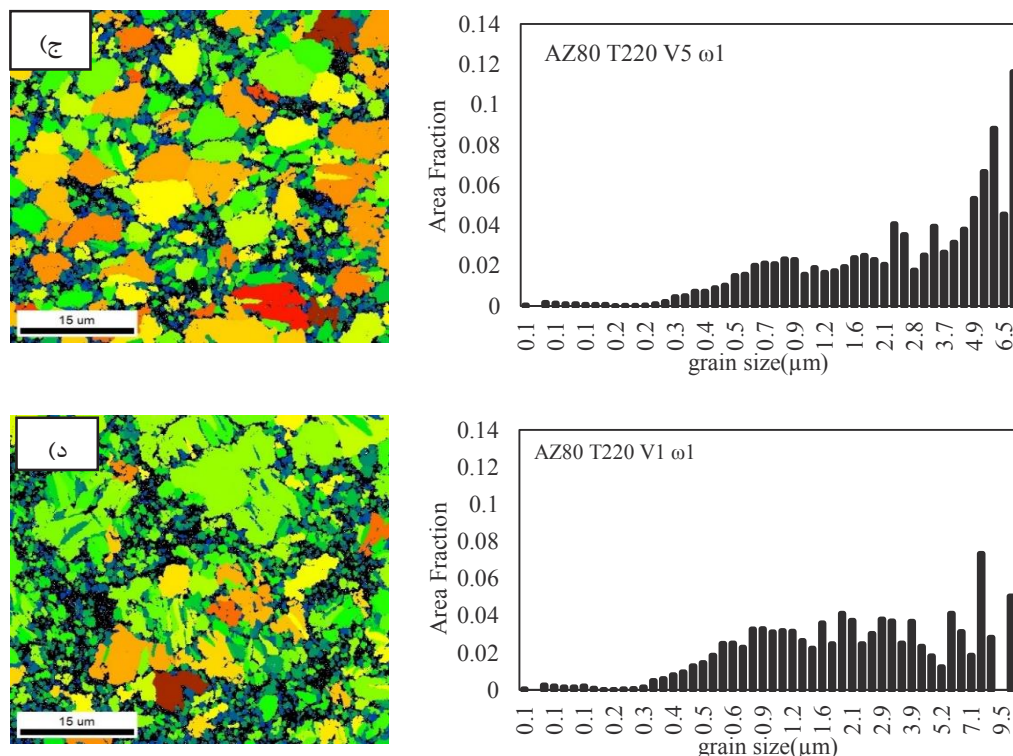
شکل ۶. نمودار اندازه دانه‌ها برای رژیم‌های مختلف در آلیاژ AZ80 و ZK30

Fig. 6. Grain size diagram for different regimes in AZ80 and ZK30 alloys



شکل ۷. نقشه‌های جهت گیری و توزیع اندازه دانه به دست آمده توسط EBSD برای قسمتهای لبه نمونه‌های آلیاژ AZ80 فرآیند یافته الف) نمونه اکستروژن شده ب) $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 8\text{ m/s}$, $\omega = 0.6\text{ rad/s}$ ج) $T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 5\text{ m/s}$, $\omega = 1\text{ rad/s}$ د) $T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 1\text{ m/s}$, $\omega = 1\text{ rad/s}$ (ادامه دارد)

Fig. 7. Orientation maps and grain size distribution obtained by EBSD for the edge regions of processed AZ80 alloy samples a) Extruded sample b) $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 8\text{ m/s}$, $\omega = 0.6\text{ rad/s}$ c) $T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 5\text{ m/s}$, $\omega = 1\text{ rad/s}$ d) $T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 1\text{ m/s}$, $\omega = 1\text{ rad/s}$. (Continued)

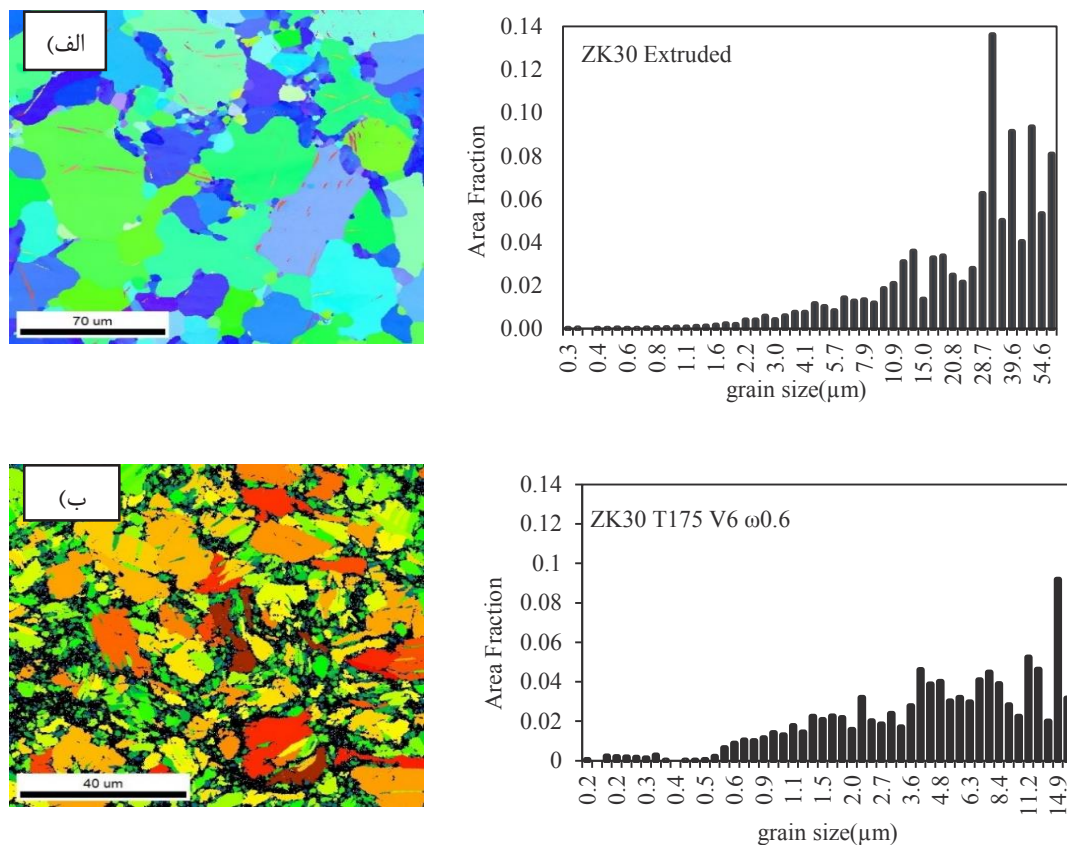


شکل ۷. نقشه‌های جهت گیری و توزیع اندازه دانه به دست آمده توسط EBSD برای قسمتهای لبه نمونه‌های آلیاژ AZ80 فرآیند یافته الف) نمونه اکستروژن شده ب) $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 8\text{ m/s}$, $\omega = 0.6\text{ rad/s}$ ج) $T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 5\text{ m/s}$, $\omega = 1\text{ rad/s}$ د) $T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 1\text{ m/s}$, $\omega = 1\text{ rad/s}$

Fig. 7. Orientation maps and grain size distribution obtained by EBSD for the edge regions of processed AZ80 alloy samples a) Extruded sample b) $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 8\text{ m/s}$, $\omega = 0.6\text{ rad/s}$ c) $T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 5\text{ m/s}$, $\omega = 1\text{ rad/s}$ d) $T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 1\text{ m/s}$, $\omega = 1\text{ rad/s}$.

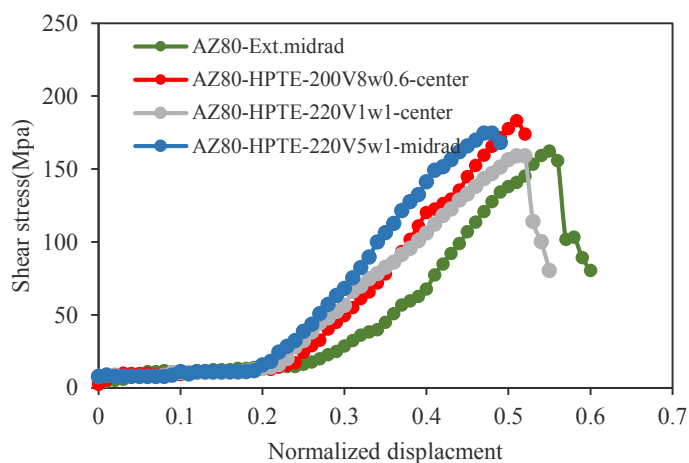
دما در فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا، منجر به کاهش تنش جریان ماده می‌شود. وقتی دما بیشتر می‌شود، مقاومت ماده در برابر تغییر شکل کاهش می‌یابد. این کاهش مقاومت باعث می‌شود تنش جریان (یعنی نیروی مورد نیاز برای تغییر شکل ماده در حین فرآیند) کاهش پیدا کند. در دماهای بالاتر، اتم‌های ماده انرژی بیشتری دارند و راحت‌تر در شبکه کریستالی جابه‌جا می‌شوند، بنابراین ماده نرم‌تر شده و فرآیند تغییر شکل پلاستیک با تنش کمتری انجام می‌شود. در نمودار دیده می‌شود که استحکام برش نهایی برای دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد ۱۸۳/۶۳ مگاپاسکال است و زمانی که دما تا ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد، استحکام برش نهایی کم‌تر می‌شود. در شکل ۱۰، نمودار تنش برشی بر حسب جابه‌جایی نرمال شده برای نمونه آلیاژ ZK30 اکستروژن شده و نمونه تحت فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا قرار گرفته، ترسیم شده است. با توجه به نمودار ۱۰ استحکام برش نهایی برای نمونه اکستروژن شده ۱۴۷/۹۵ MPa است و زمانی که تحت فرآیند اکستروژن

نسبت ω/v افزایش یابد مقدار استحکام برش نهایی کاهش می‌یابد به طوری که در $v5\omega1$ برابر با ۱۷۳/۳۹ MPa و $v1\omega1$ برابر با ۱۵۹/۵۹ MPa است. افزایش نسبت ω/v باعث کاهش استحکام برش نهایی می‌شود، زیرا گرمای تولیدشده در اثر تغییر شکل چرخشی افزایش یافته و نرم‌شدگی ماده را تسریع می‌کند، که منجر به کاهش چگالی نابجایی‌ها و کارسختی می‌شود. همچنین، این نسبت بالا موجب ناهمگنی در توزیع کرنش و تشکیل دانه‌های بزرگ‌تر می‌گردد که استحکام کلی را کاهش می‌دهد. گرادیان کرنش شدیدتر ناشی از این نسبت، بازآرایی و نابودی نابجایی‌ها را تسهیل کرده و مکانیسم‌های نرم‌تری مانند لغزش بین‌دانه‌ای را فعال می‌کند، که در مجموع به کاهش مقاومت برشی ماده منجر می‌شود. همچنین با بررسی نمودارها در یک دما ثابت می‌توان دریافت که با افزایش نسبت ω/v کشیدگی نمودارها بیش‌تر می‌شود. لذا در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود که $v1\omega1$ نسبت به $v5\omega1$ دارای میزان کشیدگی بیش‌تر است. افزایش



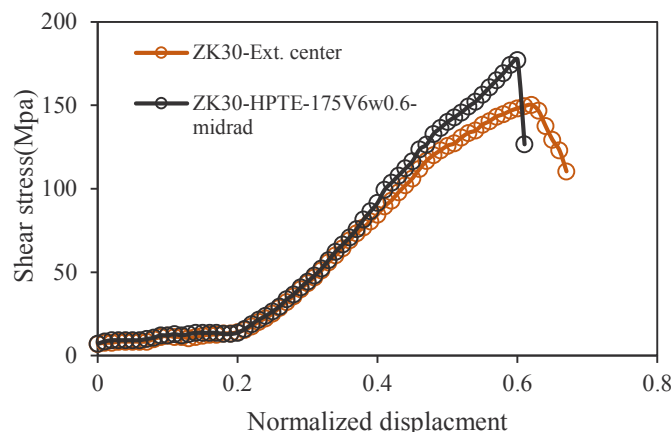
شکل ۸. نقشه‌های جهت گیری و توزیع اندازه دانه یه دست آمده توسط EBSD برای قسمتهای لبه نمونه‌های آلیاژ ZK30
فرایند یافته الف) نمونه اکستروژن شده ب) $T = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 6\text{ m/s}$, $\omega = 0.6\text{ rad/s}$

Fig. 8. Orientation maps and grain size distribution obtained by EBSD for the edge regions of processed ZK30 alloy samples: a) Extruded sample b) $T = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 6\text{ m/s}$, $\omega = 0.6\text{ rad/s}$



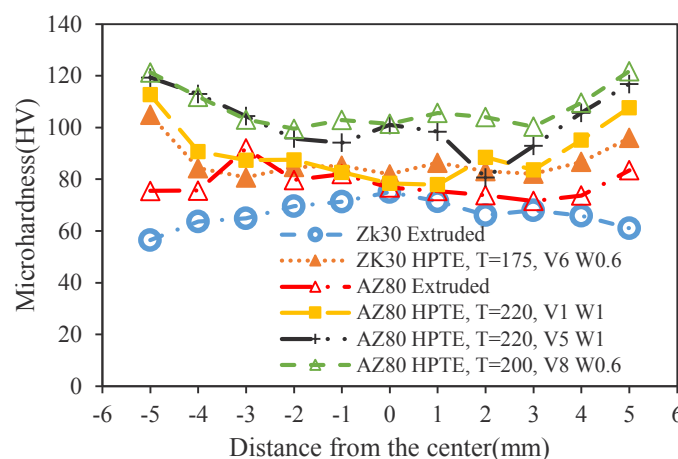
شکل ۹. نمودار تنش برشی براساس جابه‌جایی نرمال شده برای نمونه‌های آلیاژ AZ80 که تحت فرایند اکستروژن پیچشی فشار بالا قرار گرفته‌اند

Fig. 9. Shear stress vs. normalized displacement diagram for AZ80 alloy samples processed by HPTE



شکل ۱۰. نمودار تنش برشی براساس جابجایی نرمال شده برای نمونه آلیاژ ZK30 اکستروژن شده و تحت فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا قرار گرفته

Fig. 10. Shear stress vs. normalized displacement diagram for the extruded and HPTE-processed ZK30 alloy sample



شکل ۱۱. توزیع ریز سختی مرکز به لبه برای نمونه ها تحت فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا

Fig. 11. Microhardness distribution from center to edge for samples processed by High-Pressure Torsion Extrusion (HPTE)

باعث افزایش مقاومت ماده در برابر تغییر شکل می‌شود. این افزایش با توزیع یکنواخت‌تر سختی در ماده همراه است، که در نمودار میکروسختی (شکل ۱۱) نیز تأیید شده است. دلیل این توزیع یکنواخت‌تر و استحکام بالاتر، توزیع مجدد و تثبیت نابجایی‌ها در مرزهای دانه و کاهش اندازه دانه‌هاست که منجر به بهبود خواص مکانیکی ماده می‌شود.

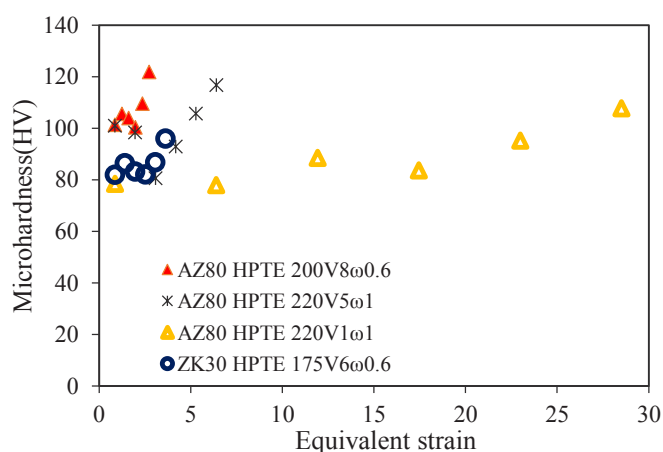
فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا افزایش سختی غیریکنواختی را برای آلیاژ AZ80 از سختی اولیه HV ۷۶/۸ به ۷۸/۴ ~، ۱۰۱ ~ و HV

پیچشی فشار بالا قرار می‌گیرند تا ۱۷۶/۳ MPa افزایش می‌یابد که نشان دهنده افزایش ۲۰ درصدی استحکام برشی است. افزایش استحکام برشی نهایی پس از اعمال فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا به دلیل تغییرات عمده‌ای است که این فرآیند در ساختار میکروسکوپی ماده ایجاد می‌کند. در فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا تغییر شکل پلاستیک شدید اعمال می‌شود که منجر به خرد شدن دانه‌ها و ایجاد ساختار فوق‌ریزدانه می‌شود. این ساختار، به دلیل مرزهای دانه با زاویه زیاد و تراکم بالای نابجایی‌ها،

جدول ۲. سختی میانگین برای آلیاژ AZ80 و ZK30

Table 2. Average hardness values for AZ80 and ZK30 alloys

سختی میانگین (HV)	
AZ80 Extruded	۷۸/۱۴
AZ80 T220,v1, ω1	۹۰/۲۱
AZ80 T220,v5, ω1	۱۰۱/۹۸
AZ80 T200,v8,ω0.6	۱۰۷/۴۰
ZK30 Extruded	۶۶/۶۹
ZK30 T175,v6, ω0.6	۸۶/۹۱



شکل ۱۲. مقدار میکرو سختی اندازه‌گیری با اعمال نیروی ۱۰۰g بر اساس کرنش معادل برای هردو آلیاژ AZ80 و ZK30 در حالت‌های مختلف

Fig. 12. Measured Microhardness under 100 g load as a function of equivalent strain for both AZ80 and ZK30 alloys under different conditions

آلیاژ AZ80 به وضوح مشاهده می‌شود که با افزایش میزان سختی، کرنش نیز افزایش می‌یابد. هرچه نسبت ω/v کمتر شود میزان سختی نیز افزایش می‌یابد و با افزایش این نسبت، سختی به سمت اشباع پیش می‌رود. برای آلیاژ ZK30 طبق جدول ۲ دیده می‌شود که مقدار سختی میانگین در نمونه اکستروژن شده HV ۶۶/۶۹ است و پس از فرآیند اکستروژن پیشی فشار بالا این مقدار به HV ۸۶/۹۱ می‌رسد که نشان دهنده افزایش ۳۰ درصدی سختی نمونه است. همچنین توزیع سختی این آلیاژ برای هردو

۱۰/۱۴ در مرکز و تا ۵۱، ۶۴ و ۶۷ HV در لبه به ترتیب برای نمونه‌های $v1w1$ ، $v5w1$ و $v8w0.6$ نشان داد. همچنین باید توجه داشت که نمونه اکستروژن پیشی فشار بالا $v8w0.6$ نه تنها بالاترین مقدار سختی را در همه مناطق (از مرکز تا لبه) نشان داد، بلکه بیش‌ترین توزیع سختی همگن را در میان نمونه‌های اکستروژن پیشی فشار بالا نشان داد. شکل ۱۲ نمودار میکرو سختی براساس کرنش معادل است و نتایج کرنش معادل طبق معادله (۱) محاسبه می‌شود. با توجه به نمودارها، در

نمونه اکستروژن شده و اکستروژن پیچشی فشار بالا در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در نمونه اکستروژن شده مشاهده می‌شود که سختی در مرکز نمونه بیش‌تر است در نمونه اکستروژن شده، توزیع سختی نشان‌دهنده سختی بیش‌تر در مرکز نمونه است. این ویژگی به این دلیل است که در فرآیند اکستروژن معمولی، تنش و تغییر شکل بیشتر در مرکز ماده متمرکز می‌شود، در حالی که لبه‌ها تحت تأثیر تغییر شکل کم‌تری قرار می‌گیرند. این الگوی توزیع سختی، ناشی از عدم یکنواختی تنش و تغییر شکل در طول نمونه است. زمانی که نمونه تحت فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا قرار می‌گیرد، توزیع سختی دچار تغییر می‌شود. در فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا، علاوه بر فشار بالا، پیچش کنترل‌شده‌ای به نمونه اعمال می‌شود که باعث ایجاد تغییر شکل شدید و یکنواخت در تمام حجم ماده می‌شود. این تغییر شکل منجر به خرد شدن دانه‌ها، توزیع مجدد نابیایی‌ها و افزایش سختی در نواحی خارجی یا لبه‌های نمونه می‌شود. دلیل افزایش سختی در لبه‌ها این است که در فرآیند پیچش، برش و تغییر شکل بیشتری در این نواحی رخ می‌دهد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

۴-۱- بررسی میکرو ساختار و خواص مکانیکی

اثر فرآیند اکستروژن پیچشی با فشار بالا بر روی توزیع سختی آلیاژهای AZ80 و ZK30 در شکل ۱۱ نشان داده شده است. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که توزیع سختی برای نمونه $v8w0.6$ در مرکز $8/76 \text{ HV}$ و در لبه تا $104/1 \text{ HV}$ افزایش یافته است این درحالی است که در این مناطق کرنش معادل نزدیک به صفر می‌باشد (طبق معادله (۱)) در نمودار ۱۲ نیز به وضوح دیده می‌شود. این تناقض آشکار به دو عامل قابل توجه منتسب می‌شود که شامل: سخت شدن نمونه‌ها به دلیل فشار بالا در ابتدای فرآیند و انتشار تغییر شکل پلاستیک از مناطق کناری نمونه به سمت مناطق مرکزی در جایی که میزان کرنش اسمی در مناطق کناری صفر نمی‌باشد. به عبارت دیگر نابیایی‌ها (اختلالات در شبکه بلوری ماده) که در فاصله‌ای از مرکز نمونه تشکیل می‌شوند، تأثیر تنش‌های ایجادشده توسط آن‌ها محدود به همان محل نیست. بلکه این تنش‌ها به ناحیه مرکزی نمونه نیز منتقل می‌شوند (تنش دوربرد). این انتقال تنش باعث می‌شود نابیایی‌های موجود در مرکز نیز تحت تأثیر قرار گیرند، به حرکت درآیند، و حتی تعداد نابیایی‌ها در این منطقه افزایش یابد (تکثیر نابیایی‌ها). این فرایند می‌تواند منجر به تغییرات در ساختار میکروسکوپی ماده، مانند افزایش چگالی نابیایی و در نتیجه افزایش سختی یا تغییر دیگر ویژگی‌های مکانیکی ماده شود. این باعث کاهش میانگین اندازه‌دانه‌ها آلیاژ AZ80 از $5/10 \mu\text{m}$ به $2/40 \mu\text{m}$

در حالت $v8w0.6$ می‌شود و سختی مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. و با توجه به نمودار ۶ مشاهده می‌شود که هرچه نسبت w/v کم‌تر شود میزان سختی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش این نسبت، سختی به سمت اشباع پیش می‌رود. هرچه نسبت w/v کم‌تر شود سختی همگن‌تر زیرا هرچه تغییر شکل نمونه‌ها افزایش می‌یابد و میزان سختی در لبه به دلیل اشباع افزایش نمی‌یابد اما در مرکز نمونه‌ها سختی افزایش می‌یابد و پس از آن با تغییر شکل میکروساختار در مرکز توسعه می‌یابد. با توجه به شکل ۱۱ دیده می‌شود که حتی در حالت $v8w0.6$ توزیع سختی کاملاً همگن نشده و این موضوع به دلیل اندازه دانه متفاوت در لبه و مرکز دیسک است.

برای آلیاژ ZK30 نیز در شکل ۱۱ دیده می‌شود که توزیع سختی برای نمونه $v6w0.6$ در مرکز 75 HV و در لبه تا $81/9 \text{ HV}$ افزایش یافته است. این درحالی است که در این مناطق کرنش معادل نزدیک به صفر می‌باشد (طبق معادله (۱)) این موضوع در نمودار ۱۲ نیز به وضوح دیده می‌شود. در نمونه اکستروژن شده دیده می‌شود که سختی نمونه در مرکز بیش‌تر است اما زمانی که تحت فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا قرار می‌گیرد لبه‌های نمونه بیش‌تر در معرض تغییر شکل قرار می‌گیرند لذا دانه‌بندی ریزتر شده و سختی در لبه نمونه‌ها از مرکز بیش‌تر شده است. به طور کلی دلیل این افزایش سختی پس از اعمال فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا ریزتر شده اندازه دانه‌ها می‌باشد.

با انجام آزمون سنبه برشی در دمای اتاق مشخص گردید که استحکام برش نهایی آلیاژ AZ80 در حالت $v8w0.6$ نسبت به نمونه اکستروژن شده افزایش چشم‌گیری داشته و بعد از آن با افزایش نسبت w/v استحکام برش نهایی کاهش یافته است. این مقادیر در جدول ۳ نشان داده شده است. برای آلیاژ ZK30 نیز دیده می‌شود که استحکام برش نهایی نمونه که تحت فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا قرار گرفته است از نمونه اکستروژن شده بیش‌تر است. به طور کلی برای هر دو آلیاژ فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا موجب افزایش استحکام برش نهایی می‌گردد.

۴-۲- مقایسه فرآیندهای مختلف با فرایند اکستروژن پیچشی فشار بالا برای آلیاژ AZ80

در سال‌های اخیر علاقه به آلیاژ منیزیم به دلیل استحکام بالا و چگالی کم آن نسبت به فلزها و آلیاژهای سازه‌ای دیگر افزایش یافته است. کاهش وزن یک عامل مهم در مصرف سوخت است، بنابراین آلیاژهای منیزیم به دلیل وزن کم برای استفاده در صنعت حمل و نقل مناسب هستند [۲۵]. به عنوان مثال استفاده از آلیاژ منیزیم AZ80 برای بدنه اتوبوس‌های الکتریکی

اکستروژن پیچشی فشار بالا در این پژوهش حدود HV ۱۰۷/۴۰ که به طور قابل توجهی بیش تر از سختی اشباع به دست آمده توسط پرس در کانال های زاویه دار همسان (حدود HV ۸۳/۱۴، ۸۴/۷۱ برای حالت های مختلف که در جدول ۴ آورده شده) است.

فرآیند پیچش فشار بالا به دلیل تحمل فشار هیدرواستاتیک گسترده در طول فرآیند به عنوان یک روش موفق در پردازش آلیاژهای منیزیم AZ31 [۳۹]، AZ80 [۳۰] و AZ91 [۳۱] در دماهای پایین ثابت شده است. با این حال، پیچش فشار بالا فقط می تواند دیسک های نازک تولید کند. در حالی که اکستروژن پیچشی فشار بالا می تواند مواد حجیم تولید کند. پردازش مواد ترد با اکستروژن پیچشی فشار بالا ممکن است به دلیل فشارهای نسبتاً کم دشوار باشد، که می تواند منجر به مشکلاتی در پردازش مواد با استحکام بالا شود. با این حال، افزایش دمای پردازش می تواند به حل این مشکلات کمک کند.

سختی اشباع به دست آمده توسط اکستروژن پیچشی فشار بالا در این مطالعه در لبه دیسک حدوداً HV ۱۲۱ با سختی اشباع پیچش فشار بالا آلیاژ AZ80 که در جدول ۵ آورده شده، قابل مقایسه است. روش اکستروژن پیچشی فشار بالا می تواند سطح اشباع مشابهی در ریزساختار و سختی مانند پیچش فشار بالا را ارائه دهد. بنابراین، انتظار می رود خواص مکانیکی که در دیسک های نازک پس از پردازش پیچش فشار بالا به دست می آید، در شمش های پردازش شده با اکستروژن پیچشی فشار بالا نیز ظاهر شود. مزیت دیگر اکستروژن پیچشی فشار بالا این است که ریزساختار بسیار ریز و مقادیر سختی بالا تنها در یک پاس قابل دستیابی است که آن را به یک تکنیک مقرون به صرفه تبدیل می کند. از این رو، اکستروژن پیچشی فشار بالا فرصت های بزرگی برای کاربردهای عملی دارد، به ویژه برای بهبود استحکام در فلزات و آلیاژها است.

۵- صحت سنجی نتایج آزمون ها

برای اثبات صحت و درستی نتایج آزمون ها آلیاژهای AZ80 و ZK30، این نتایج را با پژوهش های پیشین در مورد فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا در آلومینیوم [۲۲] مقایسه شده است. در این راستا، بررسی روند سختی و اندازه دانه در این مواد و تأثیر فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا ضروری است که این نتایج در جدول ۶ آورده شده است.

در تمامی مواد (آلومینیوم، AZ80 و ZK30) کاهش اندازه دانه منجر به افزایش سختی می شود. این مطابق با قانون هال-پچ است که نشان

جدول ۳. استحکام برش نهایی برای دو آلیاژ AZ80 و ZK30

Table 3. Ultimate shear strength for AZ80 and ZK30 alloys

	USS(MPa)
AZ80 Extruded	۱۵۷/۶۵
AZ80 T220, v1, $\omega 1$	۱۵۹/۵۹
AZ80 T220, v5, $\omega 1$	۱۷۳/۳۹
AZ80 T200, v8, $\omega 0.6$	۱۸۳/۶۳
ZK30 Extruded	۱۴۷/۹۵
ZK30 T175, v6, $\omega 0.6$	۱۷۶/۳۳

[۲۶]. با این حال، به دلیل ساختار بلوری بسته نزدیک به شکل هگزاگونال و سیستم های محدود لغزش، آلیاژ منیزیم در دمای اتاق انعطاف پذیری ندارد. در این دما، دو روش مهم می تواند عملکرد داشته باشد: لغزش در سطح پایه و مکانیزم دوقلوبی شدن [۲۷، ۲۸]. آلیاژ منیزیم سه سیستم لغزش در صفحه پایه دارد که دو تا از آن ها مستقل هستند، اما برای رسیدن به تغییر شکل همگن بدون ترک، باید پنج سیستم لغزش مستقل وجود داشته باشد. به همین دلیل، تغییر شکل همگن در منیزیم در دمای اتاق بدون ترک دار شدن دشوار است و این باعث محدودیت استفاده آن را در بسیاری از کاربردها می شود.

جداول ۴ و ۵ خلاصه ای از مقادیر سختی و میانگین اندازه دانه گزارش شده در دیگر مقالات برای آلیاژ AZ80 پردازش شده با روش های تغییر شکل پلاستیک شدید مانند پرس در کانال های زاویه دار همسان و پیچش فشار بالا را ارائه می دهند. پردازش نمونه های آلیاژ منیزیم AZ80 با اکستروژن پیچشی فشار بالا منجر به سختی اشباع بالاتر نسبت به فرآیند پرس در کانال های زاویه دار همسان می شود. این افزایش سختی به دلیل کاهش اندازه دانه بعد از فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا در آلیاژ منیزیم AZ80 است که توسط پراش الکترون های بازگشتی تعیین شده است. همانطور که گفته شد سختی اشباع برای منیزیم AZ80 پردازش شده با

جدول ۴. مقادیر سختی و میانگین اندازه دانه آلیاژ AZ80 تحت فرآیند پرس کانال زاویه دار

Table 4. Hardness values and average grain size of AZ80 alloy processed by ECAP

مرجع	پارامتر فرآیند	تعداد پاس	میانگین اندازه دانه (μm)	دما	مقدار سختی گزارش شده (HV)	فرآیند	مواد	
[32]	$\varphi = 90^\circ$ $\psi = 30^\circ$	۴	۶/۳۵	۵۹۸ K	۸۴/۷۱	ECAP	AZ80	۱
[32]	$\varphi = 110^\circ$ $\psi = 30^\circ$	۴	۹/۷۷	۵۹۸ K	۸۳/۱۴	ECAP	AZ80	۲

جدول ۵. مقادیر سختی تحت فرآیند اکستروژن پیشی^۱

Table 5. Hardness values under HPT processing

مرجع	فشار (GPa)	دما	مقدار سختی گزارش شده برای لبه دیسک (HV)	تعداد دور	فرآیند	مواد	
[30]	۶	R.T	۱۲۰	N=۱۰	HPT	AZ80	۱
[33]	۶	۲۹۶ K	۱۲۰	N=۱۰	HPT	AZ80	۲
[33]	۶	۴۷۳ K	۱۱۰	N=۱۰	HPT	AZ80	۳

جدول ۶. نتایج سختی و میانگین اندازه دانه آلیاژهای آلومینیوم AZ80 و ZK30

Table 6. Hardness and average grain size results for AZ80 and ZK30 aluminum alloys

آلیاژ	رژیم	سختی (HV)	میانگین اندازه دانه
aluminum	v7w1	۵۱	۱/۲
aluminum	v1w1	۶۴	۰/۷
aluminum	v1w3	۶۷	۰/۷
AZ80	Extruded	۷۸/۱۴	۵/۱۰
AZ80	v8w0.6	۹۰/۲۱	۲/۴۰
AZ80	v5w1	۱۰۱/۹۸	۳/۵۲
AZ80	v1w1	۱۰۷/۴	۳/۳۳
ZK30	Extruded	۶۶/۶۹	۳۰/۸۷
ZK30	v6w0.6	۸۶/۹۱	۶/۵۱

^۱ HPT

نمونه اکستروژن شده $157/65$ MPa و تحت فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا در حالت $v8w0.6$ برابر $183/63$ MPa است و برای آلیاژ ZK30 در نمونه اکستروژن شده $147/95$ MPa و تحت فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا در حالت $v6w0.6$ برابر $176/33$ MPa است که استحکام برش نهایی افزایش یافته است.

- پردازش نمونه‌های آلیاژ منیزیم با استفاده از اکستروژن پیچشی فشار بالا، سختی اشباع بیشتری را نسبت به روش پرس در کانال‌های زاویه‌دار همسان ایجاد می‌کند. این تفاوت عمدتاً به دلیل کاهش میانگین اندازه دانه‌ها است که با استفاده از روش پرش الکترون‌های بازگشتی اندازه‌گیری شده است. فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا می‌تواند خواص ریزساختاری و مکانیکی مشابه پیچش فشار بالا ایجاد کند، با این تفاوت که اکستروژن پیچشی فشار بالا برای نمونه‌های حجیم نیز قابل اجرا است. این فرآیند با اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید، چگالی نابجایی‌ها را افزایش و اندازه دانه‌ها را کاهش می‌دهد تا به سطح اشباع سختی و استحکام برسد. به همین دلیل، انتظار می‌رود خواص مکانیکی مشاهده شده در دیسک‌های نازک پس از پردازش پیچش فشار بالا، در شمش‌های پردازش‌شده با اکستروژن پیچشی فشار بالا نیز ظاهر شود. از مزایای دیگر این فرآیند می‌توان به دستیابی به ریزساختار بسیار مطلوب و مقادیر بالای سختی تنها با یک پاس اشاره کرد. این ویژگی‌ها اکستروژن پیچشی فشار بالا را به روشی کارآمد و مناسب برای کاربردهای صنعتی، به‌ویژه در بهبود استحکام آلیاژها و فلزات، تبدیل کرده است.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

V سرعت، (mm/min)

T دما، ($^{\circ}\text{C}$)

علائم یونانی

ω سرعت چرخشی، (rpm)

ε کرنش نباشته شده

می‌دهد کاهش اندازه دانه مقاومت مواد در برابر تغییر شکل پلاستیک را افزایش می‌دهد. آلومینیوم توانایی بیشتری در دستیابی به اندازه دانه‌های بسیار کوچک‌تر (~ 0.7 میکرون) دارد. این موضوع نشان‌دهنده صحت نتایج است، زیرا آلیاژهای AZ80 و ZK30 به دلیل ترکیب شیمیایی و سختی پایه بالاتر، توانایی کم‌تری در رسیدن به اندازه دانه‌های مشابه آلومینیوم دارند. نتایج آزمایش آلیاژهای AZ80 و ZK30 با روندهای مشاهده شده در آلومینیوم و اصول علمی مانند قانون هال-پچ سازگار است. بنابراین، صحت این نتایج تأیید می‌شود و تفاوت‌ها را می‌توان به ترکیب شیمیایی و رفتار متفاوت مواد در فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا نسبت داد.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از آزمون‌های سختی سنجی ویکرز و پانچ برشی و همچنین بررسی دانه بندی با استفاده از پرش الکترون‌های بازگشتی رفتار آلیاژهای AZ80 و ZK30 مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج آن به شرح زیر می‌باشد:

- اندازه دانه در تمامی نمونه‌های اکستروژن پیچشی فشار بالا نسبت به حالت اکستروژن شده ریزتر است. میانگین اندازه دانه‌ها برای نمونه اکستروژن شده آلیاژ AZ80، $5/10 \mu\text{m}$ است که پس از فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا میانگین اندازه دانه‌ها در حالت $v5w1$ $3/52 \mu\text{m}$ و برای $v1w1$ $3/33 \mu\text{m}$ در حالت $v8w0.6$ میانگین اندازه دانه‌ها $2/40 \mu\text{m}$ است و در این حالت میانگین اندازه دانه‌ها حداقل مقدار است. با توجه به میانگین اندازه دانه‌ها مشاهده می‌شود که با کاهش نسبت ω/v اندازه دانه‌ها کم‌تر شده و بهبود دانه بندی مشاهده شده است.
- دانه‌بندی برای آلیاژ ZK30 پس از فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا ریزتر شده به‌طوری که در نمونه اکستروژن شده میانگین اندازه دانه از $30/87 \mu\text{m}$ و پس از فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا در حالت $v6w0.6$ میانگین اندازه دانه‌ها به $6/51 \mu\text{m}$ کاهش یافته است که نشان دهنده تاثیر مثبت فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا در بهبود دانه‌بندی و ایجاد ساختار ریزتر است.

- برای هردو آلیاژ فرآیند اکستروژن پیچشی فشار بالا موجب افزایش استحکام برش نهایی می‌شود. استحکام برش نهایی آلیاژ AZ80 در

- Wang, M.A. Afifi, J. Li, Effect of hot extrusion, novel stepwise-rolling, and heat treatment on microstructure, mechanical properties, and precipitate chemistry of ultra-high strength Al-Zn-Mg-Cu alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 1010 (2025) 177910.
- [10] S.Q. Khayavi Emadeddin, Plastic Deformation Behavior of Aluminum Alloy 5452 Disks Under Unconstrained High-Pressure Torsion Process and the Effect of Rotational Speed and Applied Pressures on Their Critical Radius, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 3(3) (2017) 40-47. (in Persian).
- [11] Kohdar, Investigation of Microstructure and Pseudoelastic Behavior in Fe-10Ni-7Mn (wt.%) Alloy Before and After High-Pressure Torsion Process, *Journal of Metallurgical Engineering*, 24(3) (2021) 216-227.(in Persian).
- [12] Y.T. Zhu, T.C. Lowe, T.G. Langdon, Performance and applications of nanostructured materials produced by severe plastic deformation, *Scripta Materialia*, 51(8) (2004) 825-830.
- [13] K. Xue, Z. Luo, S. Xia, J. Dong, P. Li, Study of microstructural evolution, mechanical properties and plastic deformation behavior of Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy prepared by high-pressure torsion, *Materials Science and Engineering: A*, 891 (2024) 145953.
- [14] Y. Ivanisenko, R. Kulagin, V. Fedorov, A. Mazilkin, T. Scherer, B. Baretzky, H. Hahn, High pressure torsion extrusion as a new severe plastic deformation process, *Materials Science and Engineering: A*, 664 (2016) 247-256.
- [15] R.Z. Valiev, Y. Estrin, L.S. Toth, T.C. Lowe, Bulk nanostructured materials, *Advanced Engineering Materials*, 17(12, SI) (2015) 1708-1709.
- [16] H. Höppel, M. Kautz, C. Xu, M. Murashkin, T. Langdon, R. Valiev, H. Mughrabi, An overview: Fatigue behaviour of ultrafine-grained metals and alloys, *International Journal of Fatigue*, 28(9) (2006) 1001-1010.
- [17] K. Edalati, K. Imamura, T. Kiss, Z. Horita, Equal-channel angular pressing and high-pressure torsion of pure copper: Evolution of electrical conductivity and
- [1] T.G. Langdon, The processing of ultrafine-grained materials through the application of severe plastic deformation, *Journal of Materials Science*, 42 (2007) 3388-3397.
- [2] G.F. Hesam Torabzadeh, A Review of Methods for Producing Ultrafine-Grained and Nanostructured Tubes via Severe Plastic Deformation (SPD, *Modares Mechanical Engineering Journal*, 16(6) (2016) 271-282., (in Persian).
- [3] R.Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T.G. Langdon, M.J. Zechetbauer, Y.T. Zhu, Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation, *Jom*, 58 (2006) 33-39.
- [4] R.Z. Valiev, T.G. Langdon, Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, *Progress in materials science*, 51(7) (2006) 881-981.
- [5] G.F. Armin Siah-Sarani, Farshad Samadpour, Structural and Mechanical Study of Magnesium Alloy Produced by Hydrostatic Extrusion-Expansion Severe Plastic Deformation Technique, *Modares Journal of Mechanical Engineering*, 20(4) (2020) 925-932.(in Persian).
- [6] F.G. Dehghan Qods Effect of Reverse Accumulative Roll Bonding Process on the Microstructure, Mechanical Properties, and Property Heterogeneity of AA1050 Aluminum Alloy, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 48(2) (2016) 197-206. (in Persian).
- [7] S.H.G.G. Hamed Makhsoodloo Development of a Novel Lubrication System to Improve the Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Titanium Produced by Hot Pressing in a Forward-Backward Rod-Extrusion Channel, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 51(5) (2019) 1047-1056.(in Persian).
- [8] G. Arhin, A.-b. Ma, J.-h. Jiang, E.K. Taylor, D. Song, Microstructure evolution and mechanical properties of Mg-Mn-RE alloy processed by equal channel angular pressing, *Materials Today Communications*, 38 (2024) 107744.
- [9] S. Dai, M.A. Khan, L. Liao, X. Zhang, D. Zhao, H.

- Journal of materials processing technology, 117(3) (2001) 381-385.
- [26] D. Zhao, Z. Wang, M. Zuo, H. Geng, Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of extruded AZ80 magnesium alloy, *Materials & Design* (1980-2015), 56 (2014) 589-593.
- [27] T. Al-Samman, G. Gottstein, Room temperature formability of a magnesium AZ31 alloy: Examining the role of texture on the deformation mechanisms, *Materials Science and Engineering: A*, 488(1) (2008) 406-414.
- [28] K. Kainer, F. Von Buch, The current state of technology and potential for further development of magnesium applications, *Magnesium-alloys and technology*, 2003 pp. 1-22.
- [29] Y. Huang, R.B. Figueiredo, T. Baudin, F. Brisset, T.G. Langdon, Evolution of Strength and Homogeneity in a Magnesium AZ31 Alloy Processed by High-Pressure Torsion at Different Temperatures, *Advanced Engineering Materials*, 14(11) (2012) 1018-1026.
- [30] S.A. Alsubaie, P. Bazarnik, M. Lewandowska, Y. Huang, T.G. Langdon, Evolution of microstructure and hardness in an AZ80 magnesium alloy processed by high-pressure torsion, *Journal of Materials Research and Technology*, 5(2) (2016) 152-158.
- [31] A. Al-Zubaydi, R.B. Figueiredo, Y. Huang, T.G. Langdon, Structural and hardness inhomogeneities in Mg-Al-Zn alloys processed by high-pressure torsion, *Journal of Materials Science*, 48 (2013) 4661-4670.
- [32] G.M. Naik, S. Narendranath, S.S. Kumar, Effect of ECAP die angles on microstructure mechanical properties and corrosion behavior of AZ80 Mg alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28 (2019) 2610-2619.
- [33] S.A. Alsubaie, Y. Huang, T.G. Langdon, Hardness evolution of AZ80 magnesium alloy processed by HPT at different temperatures, *Journal of Materials Research and Technology*, 6(4) (2017) 378-384.
- hardness with strain, *Materials Transactions*, 53(1) (2012) 123-127.
- [18] A.Y. Khereddine, F.H. Larbi, M. Kawasaki, T. Baudin, D. Bradai, T.G. Langdon, An examination of microstructural evolution in a Cu-Ni-Si alloy processed by HPT and ECAP, *Materials Science and Engineering: A*, 576 (2013) 149-155.
- [19] J. Li, F. Li, C. Zhao, H. Chen, X. Ma, J. Li, Experimental study on pure copper subjected to different severe plastic deformation modes, *Materials Science and Engineering: A*, 656 (2016) 142-150.
- [20] B. Omranpour, L. Kommel, F. Sergejev, J. Ivanisenko, M. Antonov, M.A. Hernandez-Rodriguez, E. Garcia-Sanchez, Analysis of the reciprocal wear testing of Aluminum AA1050 processed by a novel mechanical nanostructuring technique, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2021, pp. 012051.
- [21] V. Tavakkoli, E. Boltynjuk, T. Scherer, A. Mazilkin, Y. Ivanisenko, T. Ungar, C. Kübel, Precipitate-mediated enhancement of mechanical and electrical properties in HPTE-processed Al-Mg-Si alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2024 pp. 146556.
- [22] B. Omranpour, Y. Ivanisenko, R. Kulagin, L. Kommel, E.G. Sanchez, D. Nugmanov, T. Scherer, A. Heczal, J. Gubicza, Evolution of microstructure and hardness in aluminum processed by High Pressure Torsion Extrusion, *Materials Science and Engineering: A*, 762 (2019) 138074.
- [23] D. Nugmanov, A. Mazilkin, H. Hahn, Y. Ivanisenko, Structure and tensile strength of pure Cu after high pressure torsion extrusion, *Metals*, 9(10) (2019) 1081.
- [24] A. Bareggi, P. Boffi, S. Chinosi, S. Franchi Bononi, L. Guizzo, G. Lavecchia, M. Marzinotto, G. Mazzanti, G. Pozzati, Current and future applications of HPTE insulated cables systems, *Cigrè Science & Engineering*, 13 (2019) 34-44.
- [25] E. Aghion, B. Bronfin, D. Eliezer, The role of the magnesium industry in protecting the environment,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Akbaripناه , B. Khakipour, Microstructural evolution and mechanical properties of Mg alloys after processing by HPTE technique, Amirkabir J. Mech Eng., 56(12) (2025) 1643-1662.

DOI: [10.22060/mej.2025.23670.7798](https://doi.org/10.22060/mej.2025.23670.7798)

