



Effect of Multidirectional Forging on Microstructures and Mechanical Properties of Nano-SiC Reinforced AZ31 Nanocomposites

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mozafary H.¹ MA,
Akbaripناه F.*¹ PhD,
Nourbakhsh S.H.² PhD

How to cite this article

Mozafary H, Akbaripناه F, Nourbakhsh S.H. Effect of Multidirectional Forging on Microstructures and Mechanical Properties of Nano-SiC Reinforced AZ31 Nanocomposites. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(4):981-989.

¹Mechanical Engineering Department, Malayer University, Malayer, Iran

²Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Malayer University, Malayer, Iran. Postal Code: 9586365719

Phone: -

Fax: -

f.akbaripناه@malayeru.ac.ir

Article History

Received: June 24, 2018

Accepted: October 29, 2018

ePublished: April 06, 2019

ABSTRACT

In this study, 1.5vol.% of SiC nanoparticles was added to AZ31 magnesium alloy via a stir-casting method. Next, the as-cast ingots were extruded at 400°C with the ratio of 3.78. After extruding, the materials were subjected to multidirectional forging (MDF) at 320°C for 2, 4, 6, and 8 passes. In order to evaluate the mechanical properties of extruded and MDFed materials, shear punch (SPT) and Vickers microhardness tests were applied. The results of these tests showed that hard ceramic nanoparticles improved the shear strength and hardness of the matrix alloy. The shear yield strength, ultimate shear strength, and hardness of extruded alloy were 86.70 MPa, 119.43 MPa, and 52.55 HV, respectively, while in extruded AZ31/SiCp nanocomposite, these values increased by 9.91%, 5.48%, and 13.99%, respectively. It was also observed that nanocomposites processed with multi-directional forging offer better mechanical properties than non-MDFed materials. The results indicated that after the first two passes, there was a significant improvement in the mechanical properties of the nanocomposites, such that the shear yield strength, ultimate shear strength, and hardness were improved in contrast with the extruded state by 27.12%, 17.95%, and 16.03%, respectively. Mechanical properties during the next passes were periodically reduced and increased. Microstructural observations also showed that the average grain size variations were periodic during the increase of MDF passes. After the second pass, the grains were finer than the extruded state, and their size increased in the next two passes. From 4th to 6th pass, the grain size decreased and the smallest grains were obtained in this case, while in the last two passes, the grains grew slightly. Despite the smaller and homogeneous structure created by the 6th and 8th passes, the best mechanical properties were obtained in the second pass, which means, in addition to the microstructural changes, also modifications in the material texture during the MDF process had an impact on mechanical properties.

Keywords Stir-Casting; SiC Nanoparticles; Multidirectional Forging; Mechanical Properties; Grain Size

CITATION LINKS

[1] Review of recent studies in magnesium matrix ... [2] Improving microstructural and mechanical response of new AZ41 and AZ51 magnesium alloys through simultaneous addition ... [3] Magnesium alloys and technologies [4] Influence of nano-alumina and sub-micron copper on mechanical ... [5] The microstructure, tensile, and shear deformation behavior of an AZ31 magnesium alloy after extrusion and ... [6] Microstructure and mechanical properties of Mg/SiC and AZ80/SiC nano-composites fabricated ... [7] Microstructure and mechanical properties of isothermal multi-axial forging ... [8] Enhanced properties of Mg-based nano-composites reinforced ... [9] Microstructure evolution and mechanical properties of nano-SiCp/AZ91 composite processed by extrusion and equal channel ... [10] Influence of SiC nanoparticles addition on the microstructural evolution and mechanical properties of AZ91 alloy during isothermal multidirectional forging [11] Microstructure and mechanical properties of SiCp/AZ91 composite deformed through a ... [12] Effect of multidirectional forging on microstructures and tensile properties of a particulate ... [13] Microstructure and mechanical properties of SPD-processed an as-cast AZ91D+Y magnesium alloy by equal channel ... [14] Microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy processed by ... [15] The effects of extrusion and Multi-Directional Forging (MDF) processes on microstructure, shear strength and ... [16] Finite element analysis of shear punch ... [17] Evaluation of mechanical properties using ... [18] Multidirectional forging of AZ91 magnesium alloy and ... [19] Multidirectional forging of magnesium matrix composites: Effect ... [20] Isothermal forging of AZ91 reinforced with 10 ... [21] Advanced AZ31 Mg alloy composites reinforced by WS2 ... [22] Microstructure and superior mechanical properties of a multi-axially ...

اثر فرآیند فورج چندجهته روی ریزساختار و خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های AZ31 تقویت‌شده با نانوذرات SiC

حامد مظفری MA

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

فرشاد اکبری‌پناه PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

سیدحسین نوربخش PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

چکیده

در این پژوهش ۱/۵٪ حجمی از نانوذرات SiC از طریق روش ریخته‌گری گردابی به آلیاژ منیزیم AZ31 افزوده شد. سپس شمش‌های ریخته‌گری در دمای ۴۰۰°C با نسبت اکستروژن ۳/۷۸ اکستروژن شدند. پس از اکستروژن، مواد برای ۲، ۴، ۶ و ۸ عبور در معرض فرآیند فورج چندجهته در دمای ۳۲۰°C قرار گرفتند. به‌منظور ارزیابی خواص مکانیکی مواد اکستروژن و MDF شده، از آزمون‌های سنبه برشی (SPT) و میکروسختی ویکرز استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده از این آزمون‌ها نشان دادند که نانوذرات سرامیکی سخت باعث بهبود استحکام برشی و سختی آلیاژ زمینه شده‌اند. مقادیر استحکام برشی تسلیم، استحکام برشی نهایی و سختی آلیاژ اکستروژن‌شده به‌ترتیب ۸۶/۴۸٪، ۱۳/۹۹٪ و ۱۷/۹۵٪ افزایش یافتند. همچنین ملاحظه شد که نانوکامپوزیت‌های فرآوری‌شده با فرآیند فورج چندجهته خواص مکانیکی بهتری نسبت به مواد MDF نشده ارائه می‌دهند. نتایج مشخص کردند که پس از دو عبور اول، بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی نانوکامپوزیت پدید آمده است، به‌طوری‌که استحکام برشی تسلیم، استحکام برشی نهایی و سختی نسبت به حالت اکستروژن‌شده به‌ترتیب ۲۷/۱۲٪، ۱۷/۹۵٪ و ۱۶/۰۳٪ افزایش یافته‌اند. خواص مکانیکی طی عبورهای بعدی به‌صورت تناوبی با کاهش و افزایش همراه بودند. مشاهدات ریزساختاری نیز نشان دادند که روند تغییرات متوسط اندازه دانه، طی افزایش عبورهای MDF تناوبی بوده است. پس از عبور دوم دانه‌ها نسبت به حالت اکستروژن ریزتر شدند و در دو عبور بعدی اندازه آنها افزایش یافت. از عبور چهارم تا عبور ششم اندازه دانه‌ها کاهش پیدا کرد و کمترین اندازه دانه در این حالت به دست آمد، در حالی که در دو عبور آخر دانه‌ها کمی رشد کردند. با وجود ساختار ریزتر و همگن‌تری که در عبورهای ششم و هشتم ایجاد شد اما بهترین خواص مکانیکی در عبور دوم حاصل شد و این یعنی افزون بر تغییرات ریزساختاری تحولات ایجادشده در بافت ماده طی فرآیند MDF نیز خواص مکانیکی را تحت تأثیر قرار داده است.

کلیدواژه‌ها: ریخته‌گری گردابی، نانوذرات SiC، فورج چندجهته، خواص مکانیکی، اندازه دانه

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۴/۰۳

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۷

نویسنده مسئول: f.akbaripناه@malayeru.ac.ir

۱- مقدمه

آلیاژهای منیزیم به‌علت وزن پایین‌شان به‌طور فزاینده‌ای در صنایع خودروسازی، راه‌آهن و هوافضا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. چگالی منیزیم تقریباً دوسوم آلومینیوم، یک‌چهارم روی و یک‌پنجم فولاد است. از این رو بین آلیاژهای مرسوم مهندسی، استحکام مخصوص بسیار بالایی ارائه می‌دهند^[1]. جدول ۱ استحکام مخصوص برخی از آلیاژهای منیزیم را نشان می‌دهد^[1-4]. همچنین آلیاژهای منیزیم ظرفیت میرایی خوب، قابلیت ریخته‌گری عالی و قابلیت ماشین‌کاری بالایی دارند، اما در مقایسه با فلزات دیگر، استحکام مطلق نسبتاً پایینی را به‌خصوص در دماهای بالا نشان می‌دهند^[1]. همچنین به‌علت داشتن ساختار کریستالی شش‌وجهی فشرده (HCP) با تعداد محدود سیستم‌های لغزش فعال، شکل‌پذیری

دمای اتاق این آلیاژها در مقایسه با دیگر مواد مانند آلومینیوم و فولاد ضعیف است^[5-7]. بنابراین برای استفاده بیشتر از مواد منیزیمی، باید خواص آنها بهبود داده شود.

جدول ۱) خواص مکانیکی مواد مختلف بر پایه منیزیم^[1-4]

Specific YS	Specific UTS	Materials
۵۸	۱۴۸	Mg
۱۴۵	۱۹۷	AZ91
۱۲۲	۱۶۱	AZ41
۱۲۴	۱۶۹	AZ51
۱۱۶	۱۵۳	AZ31
۱۹۹	۱۶۶	ZK60A-T5
۱۵۳	۲۱۱	AZ80-T5
۱۲۷	۱۷۶	AZ61A-F

آلیاژسازی با Al، Zn، Mn، Ca و دیگر عناصر، یک روش متداول برای بهبود خواص منیزیم است، اما تحقیقات نشان می‌دهند که افزودن ذرات تقویت‌کننده به زمینه‌های منیزیم، تأثیر بیشتری در بهبود برخی از خواص مکانیکی آنها از جمله استحکام دارد^[6-8]. از این رو، کامپوزیت‌های زمینه منیزیم به‌علت خواص منحصربه‌فردشان که شامل ترکیبی از مزایای فلزات و سرامیک‌هاست، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند.

کارایی کامپوزیت زمینه منیزیم وابسته به انتخاب تقویت‌کننده، ترکیب آلیاژ زمینه و روش فرآوری آن است^[9]. با توسعه نانو فناوری، تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از نانوذرات سرامیکی می‌تواند به‌طور همزمان استحکام و شکل‌پذیری منیزیم را بهبود دهد، به‌طوری‌که افزایش وزن دانه‌های آن ناچیز باشد^[10]. در میان فرآیندهای متنوعی که برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMC) به کار می‌روند، ریخته‌گری گردابی به‌دلیل سادگی، هزینه کم و قابلیت تولید شکل‌های پیچیده در نرخ تولید بالا به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد^[11].

حبیب‌نژاد-کورایم و همکاران گزارش کرده‌اند که افزودن نانوذرات آلومینا به منیزیم خالص و آلیاژ AZ31، منجر به ریزدانه‌گی و بهبود قابل توجه سختی و خواص کششی آنها شده است^[8]. متین و همکاران ریزساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های Mg/SiC و AZ80/SiC فرآوری‌شده با فرآیند ریخته‌گری گردابی را بررسی و گزارش کردند که نانوذرات SiC در زمینه‌های منیزیم به‌صورت همگن توزیع شده و باعث کاهش اندازه دانه‌های زمینه و بهبود مقادیر سختی و استحکام کششی شده‌اند^[6].

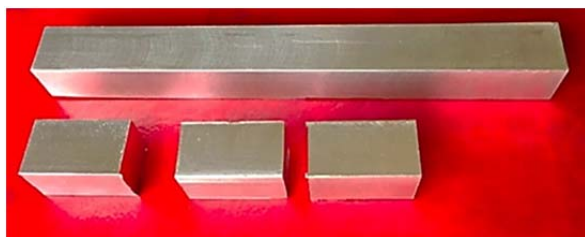
علی‌رغم این که پژوهش‌های گسترده‌ای روی ساخت نانوکامپوزیت‌های زمینه منیزیم انجام شده، اما مطالعات کمی روی فرآوری ترمومکانیک آنها صورت گرفته است^[10]. تحقیقات نشان می‌دهند که به‌کارگیری فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک از قبیل اکستروژن، نورد و فورج منجر به بهبود استحکام و شکل‌پذیری کامپوزیت‌ها می‌شوند. در حال حاضر، فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) از جمله پرس در کانال زاویه‌دار همسان (ECAP)، فورج چندجهته (MDF)، پیچش تحت فشار (HPT) و اتصال نورد انباشتی (ARB) که روش‌های جدیدی برای تبدیل مواد بالکی درشت‌دانه به مواد فوق ریزدانه (UFG) هستند، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند^[12, 13]. در میان فرآیندهای SPD، MDF نسبتاً کم‌هزینه بوده و می‌تواند برای تولید نمونه‌های حجمی در مقیاس بزرگ به کار رود، از این رو برای کاربردهای صنعتی مناسب است^[7, 12, 14].

۲-۲- فرآیند اکستروژن

به منظور تولید مواد همگن ریزدانه و حذف عیوب ریخته‌گری مانند تخلخل، نمونه‌های ریختگی در معرض فرآیند اکستروژن قرار گرفتند. در این فرآیند، بیلت‌های ریختگی در دمای 400°C با نسبت اکستروژن $3/78$ اکستروژن شدند. تصویر نمونه اکستروژن شده در شکل ۱ مشاهده می‌شود. سپس برای تهیه نمونه‌های لازم برای انجام فرآیند MDF، بیلت‌های اکستروژن شده تحت عملیات ماشین‌کاری قرار گرفتند و به میله‌هایی با مقطع مربعی تبدیل شدند. پس از آن، همان گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، توسط دستگاه سیم برش به نمونه‌هایی با ابعاد $13 \times 13 \times 20$ میلی‌متر بریده شدند.



شکل (۱) نمونه اکستروژن شده

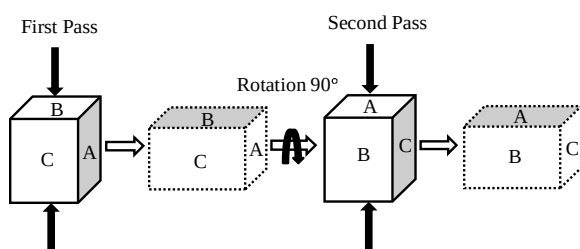


شکل (۲) نمونه ماشین‌کاری شده

۲-۳- فرآیند فورج چندجهته

فرآیند MDF تحت دمای ثابت 320°C و سرعت پرس 1 mm/min صورت گرفت و قبل از انجام فرآیند، قالب MDF به 320°C پیش‌گرم شد. شمشیرهای فرآیند MDF برای ۲ عبور اول فرآیند در شکل ۳ نشان داده شده است. در ادامه روند مشابهی برای عبورهای بعدی طی شد. در این پژوهش از نوار تفلون به عنوان روان‌کار استفاده شد [15]. نسبت‌های ابعادی نمونه‌ها طی فرآیند MDF به صورت $1:1:1/54$ ثابت باقی ماند، در حالی که برای بارگذاری از یک عبور به عبور بعدی 90° درجه تغییر می‌کرد.

نمونه‌ها به تعداد ۲، ۴، ۶ و ۸ عبور در معرض فرآیند MDF قرار گرفتند و طی فرآیند، کرنش عبوری معادل $0/43$ به نمونه‌ها اعمال می‌شد. شکل ۴ تصویری از نمونه‌های فرآوری شده با عبورهای مختلف MDF را نشان می‌دهد.



شکل (۳) نمودار شمشیرهای فرآیند فورج چندجهته

ژائو و همکاران به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ ریختگی AZ91+Y فرآوری شده با فرآیندهای ECAP و MDF پرداختند. دسته‌ای از بیلت‌ها ECAP و تعدادی دیگر MDF شدند. دانه‌های هر دو دسته از بیلت‌ها پس از اعمال اولین عبور، به میزان قابل ملاحظه‌ای ریزتر شدند. ریزساختار بیلت‌های فرآوری شده با فرآیندهای SPD مذکور، در ابتدا غیریکنواخت بود، اما با افزایش تعداد عبورها همگن شد. آزمون‌های مکانیکی نیز افزایش مقادیر سختی، استحکام تسلیم (YS) و استحکام کششی نهایی (UTS) را با اعمال عبورهای بیشتر ECAP و MDF نشان دادند [13].

وو و همکاران به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت AZ91/SiCp تغییر شکل یافته از طریق ترکیب فرآیندهای فورج و اکستروژن پرداخته و گزارش داده‌اند که ذرات ریز SiC، رشد دانه‌های تبلور مجدد دینامیک یافته (DRX) را طی فرآیند اکستروژن داغ محدود می‌کنند و منجر به ریزشدن قابل توجه دانه‌ها می‌شوند. علاوه بر این، نتایج نشان دادند که با اعمال فرآیند دومرحله‌ای (فورج و اکستروژن)، YS و UTS کامپوزیت AZ91/SiCp به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد [11]. نی و همکاران نیز تاثیر افزودن نانوذرات SiC روی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ AZ91 را طی فرآیند فورج چندجهته هم‌دمای بررسی کرده و نتیجه گرفته‌اند که علاوه بر ریزدانه‌گی، افزایش قابل ملاحظه‌ای در استحکام کششی، بعد از عبورهای مختلف MDF در مقایسه با نمونه ریختگی حاصل می‌شود [10].

به طور خلاصه می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت نانوکامپوزیت‌ها با به کارگیری فرآیندهای ترمومکانیک به خصوص فرآیندهای SPD، بهبود بیشتری پیدا کرده و خواص مکانیکی بهتری حاصل شده است.

هدف پژوهش حاضر، بررسی تاثیر فرآیند فورج چندجهته روی ریزساختار و خواص مکانیکی (استحکام برشی و سختی) نانوکامپوزیت زمینه منیزیم AZ31/SiCp فرآوری شده به وسیله فرآیند ریخته‌گری گردابی است. در این راستا، رابطه بین ریزساختار و خواص مکانیکی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ریخته‌گری و تهیه آلیاژ

در پژوهش حاضر، آلیاژ منیزیم AZ31 به عنوان آلیاژ زمینه و پودر ذرات سرامیکی SiC با کسر حجمی $1/5\%$ و اندازه متوسط 38 nm به عنوان تقویت‌کننده مورد استفاده قرار گرفتند. ترکیب شیمیایی آلیاژ AZ31 در جدول ۲ آورده شده است.

جدول (۲) ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) آلیاژ AZ31

AZ31	Al	Zn	Mn	Mg
Alloy	۳	۱	۰/۲	Bal.

پس از آماده‌سازی پودر ذرات تقویت‌کننده، مقادیر مناسبی از آلیاژ AZ31 در بوته گرافیتی داخل کوره قرار داده شد. پس از رسیدن دمای مذاب به 720°C ، نانوذرات تقویت‌کننده با دمش گاز آرگون با دبی 3 ml/s به مذاب اضافه شد و به مدت 10 min عملیات تزریق ادامه یافت تا این که پودرها به آرامی و به تدریج وارد مذاب شدند. در این هنگام، همزن استیل با سرعت 500 rpm شروع به هم‌زدن مذاب نمود. عمل هم‌زدن تا مرحله ریخته‌گری ادامه یافت و در نهایت دوغاب کامپوزیتی به داخل قالب تخلیه شد.

میکروسختی سنج باریس مدل VTE 6046 تحت بار اعمالی ۱۰۰ گرم و مدت زمان ۳۰S انجام شد. ۱۰۰ نقطه از هر نمونه روی سطحی به مساحت ۱۰×۱۰ میلی‌متر مربع تحت آزمون میکروسختی قرار گرفت. قطر لوزی‌های حاصل از اثر فرورونده بر سطح نمونه‌ها توسط نرم‌افزار CLEMEX، اندازه‌گیری و میانگین سختی‌های حاصل به‌عنوان سختی نهایی برای هر نمونه گزارش شد.

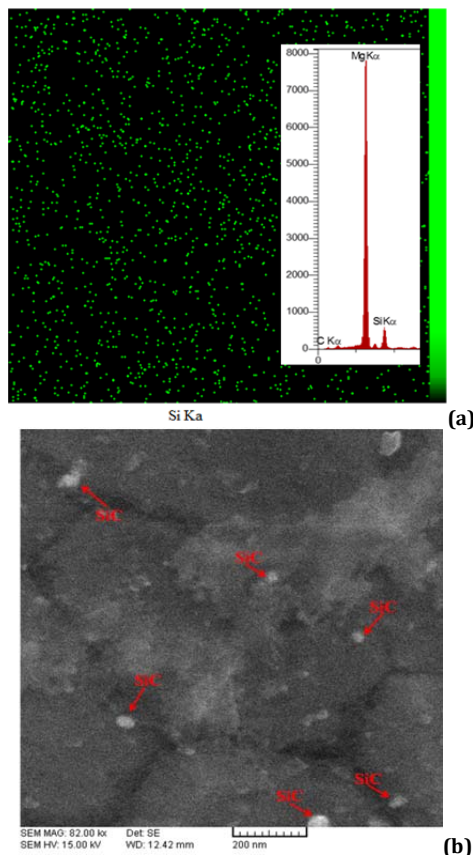
۲-۶- متالوگرافی

به‌منظور مشاهده تغییرات ریزساختاری، مشابه آزمون میکروسختی از تمامی نمونه‌های فرآوری‌شده از هر حالت یک نمونه ۳ میلی‌متری مانت شد. نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌های درجه ۳۲۰، ۸۰۰ و ۲۰۰۰، سه مرحله مورد سنباده‌زنی قرار گرفتند و بعد از هر مرحله، به‌سرعت با الکل شسته شدند. پس از آن، با نمد سیاه‌رنگ نازک و نو و خمیر الماس به‌مدت یک دقیقه پولیش و سریعاً با آب و الکل شست‌وشو داده شدند. سپس نمونه‌ها به‌مدت ۶ تا ۱۰ ثانیه در محلول ۱۰ میلی‌لیتر اسیداستیک، ۴/۲ گرم اسیدپیکریک به‌همراه ۱۰ میلی‌لیتر آب و ۷۰ میلی‌لیتر الکل اتانول اچ شدند. در نهایت با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، تحولات ریزساختار نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت و میانگین اندازه دانه‌ها با استفاده از نرم‌افزار CLEMEX اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج متالوگرافی

در شکل ۶ نتایج آنالیزهای SEM، MAP و EDS نمونه‌های کامپوزیتی نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶- b می‌توان مشاهده کرد که توزیع نانوذرات SiC در زمینه، از نظر همگن بودن قابل قبول است.



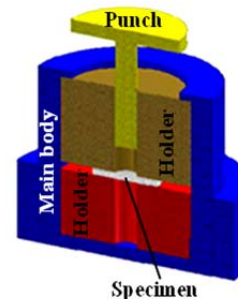
شکل ۶ (a) آنالیز SEM، MAP و EDS نانوکامپوزیت (SiC/33MDF)؛ (b) آنالیز EDS و توزیع نانوذرات SiC با بزرگ‌نمایی بالا



شکل ۴) نمونه‌ها پس از عبورهای مختلف MDF

۲-۴- آزمون سنبه برشی (SPT)

آزمون سنبه برشی یک آزمون سودمند برای تعیین خواص مکانیکی مانند استحکام تسلیم، استحکام ماکزیمم و توان کرنش سختی با استفاده از حجم‌های خیلی کوچک از ماده است. روش آزمون سنبه برشی شامل پانچ‌کردن یک نمونه نازک مهارشده بین مجموعه‌ای از قالب‌ها با استفاده از سنبه استوانه‌ای تخت در یک سرعت ثابت و پایین است [16, 17]. شماتیکی از دستگاه سنبه برشی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵) شماتیکی از تجهیزات آزمون سنبه برشی

به‌منظور بررسی تغییرات استحکام، نمونه‌های MDF شده توسط دستگاه سیم برش به نمونه‌هایی با ابعاد ۱۳×۱۳×۱ میلی‌متر برش یافتند و به‌وسیله سنباده‌های درجه ۸۰۰ و ۱۰۰۰ به‌منظور حذف اثرات برش، به ضخامت ۰/۷ رسیدند [15]. آزمون با استفاده از دستگاه سنتام انجام شد. به‌دلیل این که هدف پژوهش حاضر، بررسی خواص دما اتاق مواد فرآوری شده مذکور است، از این رو سرعت حرکت فک روی ۰/۲۵mm/min تنظیم شد. به‌منظور اطمینان از صحت نتایج، آزمون SPT حداقل روی سه نمونه از هر حالت انجام شد. نمودار حاصل از این آزمون، نیرو-جابجایی است که با استفاده از روابط ۱ و ۲ به نمودار تنش-جابجایی بی‌بعد تبدیل می‌شود که بسیار مشابه با منحنی به‌دست‌آمده در آزمون متداول کشش تک‌محوره است.

$$\tau = \frac{P}{2\pi r t} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{d_c}{t} \quad (2)$$

در رابطه ۱، τ تنش برشی، P بار اعمال‌شده و r متوسط شعاع سنبه و قالب است (که در اینجا ۳/۲ میلی‌متر است). همچنین t ضخامت نمونه را بیان می‌کند. در رابطه ۲، δ بیانگر جابه‌جایی بی‌بعدشده و d_c جابه‌جایی است [16, 17].

۲-۵- آزمون توزیع میکروسختی

به‌منظور تعیین سختی نمونه‌های اکستروود و MDF شده و مقایسه مقادیر سختی آنها با یکدیگر از آزمون توزیع میکروسختی ویکرز استفاده شد. از این رو از هر حالت، نمونه‌ای به ضخامت ۳ میلی‌متر، مانت و سطح آنها توسط سنباده‌های درجه ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ آماده شد. این آزمون با استفاده از دستگاه

اندازه دانه‌های تبلور مجدداً یافته که در نزدیکی ذرات SiC قرار گرفته‌اند، کمتر از دانه‌های دورتر از ذرات هستند. بنابراین، عدم توزیع مناسب ذرات SiC در زمینه منیزیم باعث می‌شود که اندازه دانه در نواحی خالی از ذره افزایش یابد، چرا که ذرات SiC می‌توانند رشد دانه‌ها را طی فرآیند تبلور مجدد محدود کنند و باعث ریزش آنها شوند. از این رو استنباط می‌شود که سهم غالب نانوذر در ریزش ساختار زمینه، طی DRX ناشی از قفل شدن مرزهای دانه توسط آنها است [12, 18, 19].

۲- دمای انتخاب شده برای انجام فرآیند MDF: انتخاب دمای بالا برای انجام فرآیندهای SPD باعث می‌شود که طی افزایش تعداد عبورها، نمونه‌ها تحت گرمایش مجدد قرار گیرند و حرارت زیادی به آنها منتقل شود. تجمع حرارت در ماده باعث می‌شود که تبلور مجدد استاتیک و رشد دانه‌ها (به علت تحرک مرزهای دانه) رخ دهد. بنابراین دمای انتخاب شده برای فرآوری ترمومکانیک کامپوزیت‌ها توسط فرآیندهای SPD، تاثیر قابل توجهی روی اندازه دانه آلیاژ زمینه دارد [12, 18, 19].

از عبور چهارم تا عبور ششم، دانه‌ها ریزتر و همگن‌تر شدند. در مقایسه با دیگر حالات، کمترین اندازه دانه در عبور ششم به دست آمد و همگن‌ترین توزیع اندازه دانه نیز مربوط به همین حالت بود (شکل ۷- d؛ نمودار ۱- d). پس از آن، در ۲ عبور آخر، اندازه دانه‌ها افزایش جزیی داشت و توزیع آنها نیز کمی ناهمگن‌تر شد (شکل ۷- e؛ نمودار ۱- e). جدول ۳ نحوه تغییرات اندازه دانه را در شرایط مختلف نشان می‌دهد.

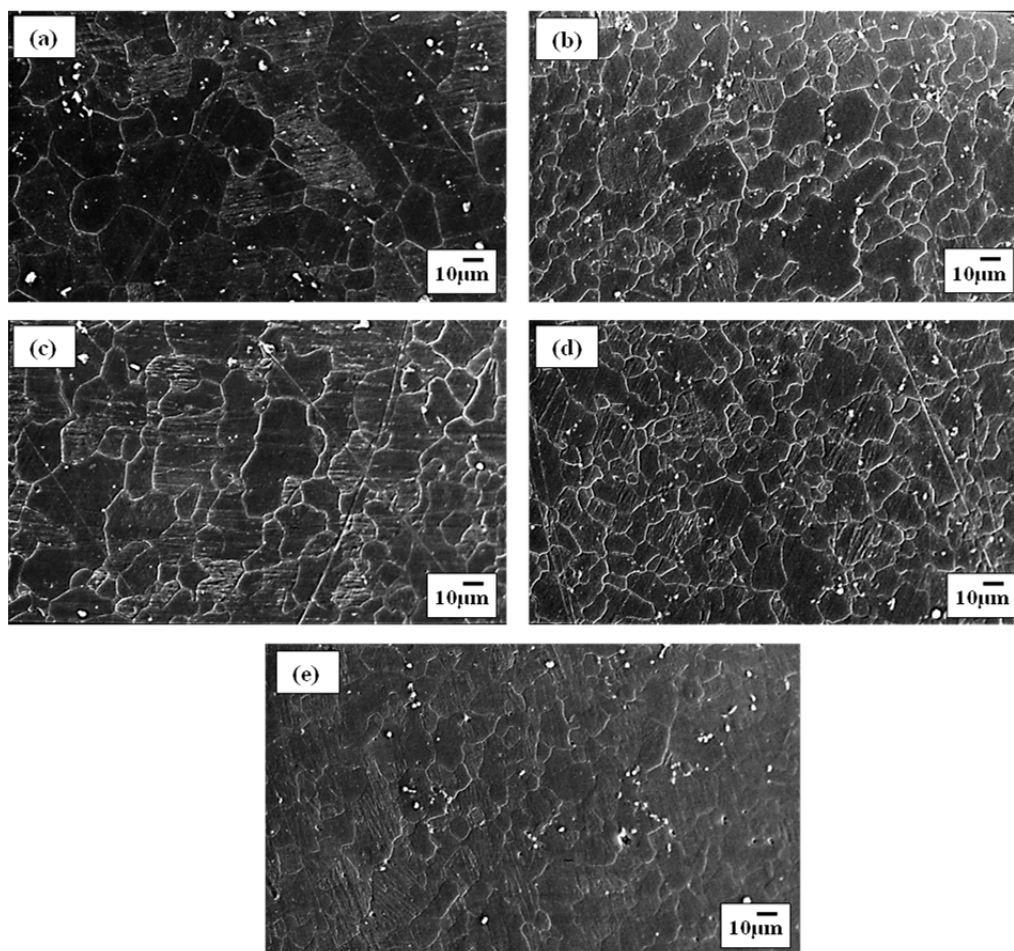
شکل ۷ تحولات ریزساختاری نمونه‌های کامپوزیتی اکستروود و MDF شده در دمای فرآوری ۳۲۰°C را نشان می‌دهد و نمودار ۱ نیز بیانگر توزیع اندازه دانه نمونه‌هاست. با اعمال ۲ عبور اول، دانه‌ها ریزتر شدند و توزیع اندازه دانه‌ها در مقایسه با نمونه اکستروود شده، همگن‌تر شد (شکل ۷- b؛ نمودار ۱- b). با افزایش تعداد عبورهای MDF از ۲ به ۴، اندازه دانه‌ها افزایش پیدا کرد و توزیع اندازه دانه‌ها نیز ناهمگن‌تر شد (شکل ۷- c؛ نمودار ۱- c).

از مهم‌ترین دلایل افزایش اندازه دانه در کامپوزیت‌های فرآوری شده با فرآیند MDF می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

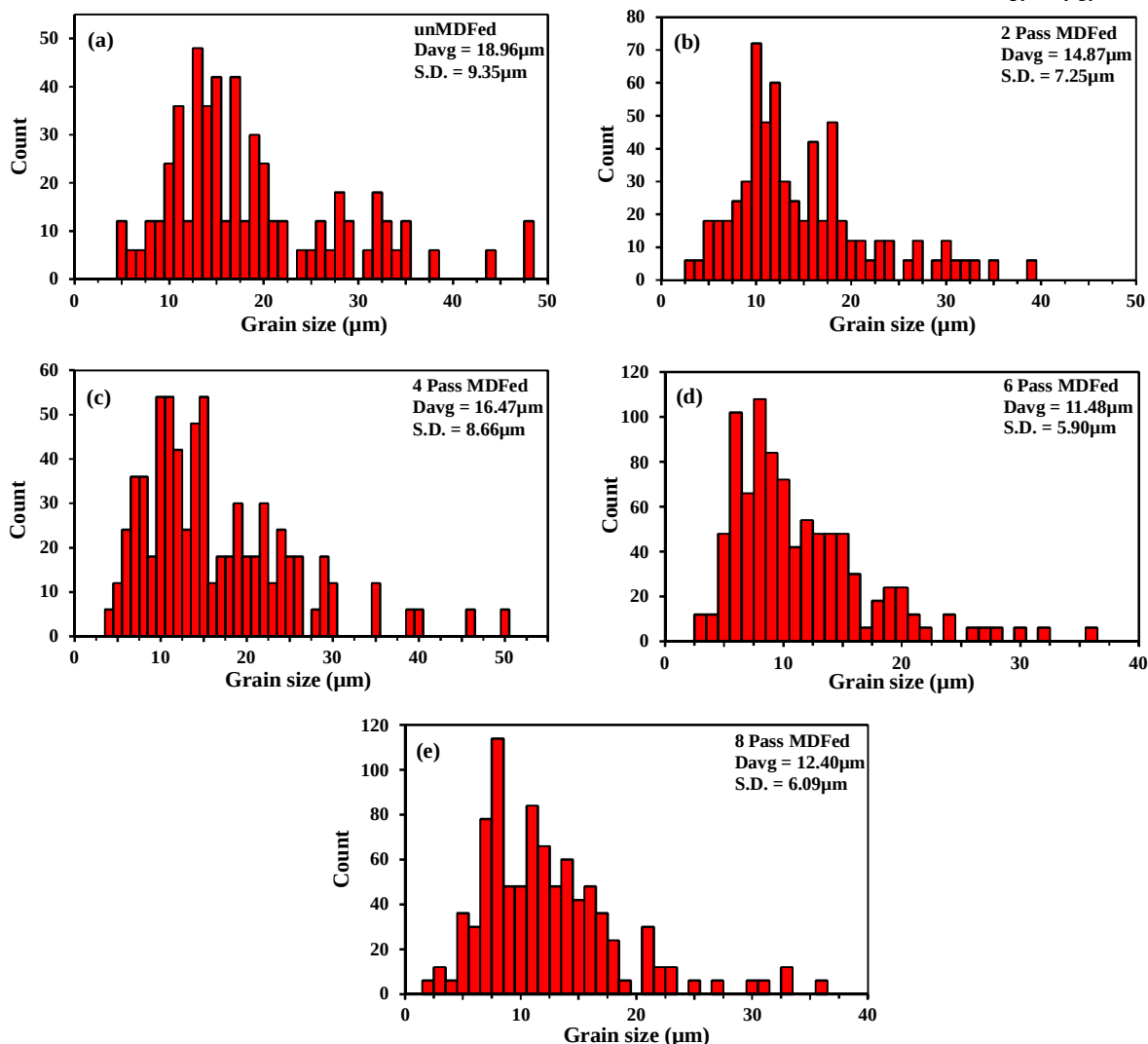
۱- توزیع ناهمگن ذرات: تعدادی از پژوهش‌های آزمایشگاهی و بررسی‌های المان محدودی، تغییر شکل ناهمگن را در کامپوزیت‌ها طی فرآیندهای SPD گزارش کرده‌اند [12].

در واقع، توزیع ناهمگن ذرات به علت عدم مطابقت تغییر شکل پلاستیک بین ذرات تقویت‌کننده و آلیاژ زمینه است. طی MDF، آلیاژ زمینه به دلیل این که سرعت سیلان، بیشتر از سرعت سیلان ذرات تقویت‌کننده است، می‌تواند به سمت خوشه‌های ذرات SiC جریان پیدا کند و باعث پراکنده شدن ذرات در زمینه و بهبود توزیع آنها شود. به دلیل این که طی فرآیند MDF برای بارگذاری از هر عبور به عبور بعدی، ۹۰ درجه تغییر می‌کند، بنابراین جهت سیلان ذرات SiC به طور مداوم در حال تغییر است و از این رو توزیع ناهمگن ذرات پس از اعمال عبورهای مختلف ایجاد می‌شود [12, 18, 19].

چگالی نابه‌جایی‌ها در نزدیکی ذرات SiC بیشتر است. همچنین



شکل ۷ تحول ریزساختاری نمونه‌های کامپوزیتی AZ31/SiCp در حالت‌های مختلف: (a) اکستروود، (b) پس از ۲ عبور MDF، (c) پس از ۴ عبور MDF، (d) پس از ۶ عبور MDF، (e) پس از ۸ عبور MDF



نمودار (۱) توزیع اندازه دانه نانوکامپوزیت‌های زمینه منیزیم AZ31/SiCp در حالت‌های مختلف: (a) اکستروژ، (b) پس از ۲ عبور MDF، (c) پس از ۴ عبور MDF، (d) پس از ۶ عبور MDF، (e) پس از ۸ عبور MDF

تحت اعمال بارهای خارجی به کامپوزیت‌های دارای توزیع همگن ذرات، تنش داخلی بزرگی بین زمینه و ذرات ایجاد می‌شود که می‌تواند لغزش زمینه را محدود کند و منجر به افزایش استحکام کامپوزیت شود^[20]. دنگ و همکاران در پژوهش خود دریافتند که طی تغییر شکل پلاستیک کامپوزیت زمینه منیزیم تقویت‌شده با میکروذرات SiC، ذرات تقویت‌کننده مانع لغزش دانه‌های آلیاژ زمینه می‌شوند^[20]. در نانوکامپوزیت حاضر، نانوذرات SiC تاثیر مشابهی روی آلیاژ AZ31 دارند.

مکانیزم‌های استحکام‌دهی در نانوکامپوزیت‌های زمینه عبارت از مکانیزم اوروان، مکانیزم هال-پیچ، عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی و اثر انتقال بار هستند.

مکانیزم اوروان: در این مکانیزم، برهم‌کنش ناهمگونی‌ها با نانوذرات، استحکام نمونه‌های کامپوزیتی را افزایش می‌دهد. هر اندازه که پراکندگی ذرات در زمینه بیشتر باشد، استحکام نانوکامپوزیت، بهبود بیشتری پیدا می‌کند.

مکانیزم هال-پیچ: افزایش استحکام ناشی از مکانیزم هال-پیچ این گونه شرح داده می‌شود که وقتی تقویت‌کننده‌ها به زمینه مذاب وارد می‌شوند، می‌توانند به‌عنوان محل‌های جوانه‌زنی ناهمگن طی انجماد عمل کنند و منجر به ریزش و هم‌محوری دانه‌ها شوند. بنابراین زمانی که فرآیندهای ثانویه از جمله اکستروژن گرم انجام

جدول (۳) تغییرات اندازه دانه نمونه‌های اکستروژ و MDF شده

شرایط فرآوری	اکستروژ	عبور دوم	عبور چهارم	عبور ششم	عبور هشتم
اندازه دانه	۱۸/۹۶	۱۴/۸۷	۱۶/۴۷	۱۱/۴۸	۱۲/۴۰

در پژوهشی از نی و همکاران نتایج مشابهی حاصل شد. بدین صورت که اندازه دانه‌های نانوکامپوزیت‌ها پس از اولین عبور MDF کاهش یافتند. از عبور اول تا عبور سوم دانه‌ها بزرگ‌تر و پس از عبور چهارم کوچک‌تر شدند و از عبور چهارم تا عبور ششم، اندازه دانه‌ها افزایش پیدا کرد^[12].

۳-۲- نتایج آزمون سنبه برشی

نتایج آزمون سنبه برشی نشان داد که استحکام تسلیم برشی (SYS) و استحکام برشی نهایی (USS) نانوکامپوزیت AZ31/SiCp نسبت به آلیاژ AZ31 تقویت‌نشده، بهبود یافته‌اند. مقادیر SYS و USS در آلیاژ AZ31 اکستروژ شده به ترتیب ۸۶/۷ و ۱۱۹/۴۳ MPa به دست آمدند، در صورتی که در نانوکامپوزیت AZ31/SiCp اکستروژ شده، خواص مذکور به ترتیب به ۹۵/۲۹ و ۱۲۵/۹۸ MPa افزایش یافتند. دلیل این را می‌توان ناشی از حضور نانوذرات سخت SiC در زمینه دانست که از طریق برهم‌کنش با ناهمگایی‌ها و متوقف کردن حرکت آنها موجب استحکام یافتن زمینه می‌شوند.

اثر فرآیند فورج چندجهته روی ریزساختار و خواص مکانیکی نانو کامپوزیت های AZ31 ... ۹۸۷
فرآوری شده، تحت شرایط متفاوت را نشان می دهد. اگر چه در ۴ عبور آخر، ساختار در مقایسه با عبور دوم ریزتر و همگن تر بود، اما نمونه ها استحکام برشی پایین تری نشان دادند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که علاوه بر تغییرات ریزساختاری، عامل دیگری نیز وجود دارد که استحکام مواد را طی عبورهای مختلف تحت تاثیر قرار می دهد.

جدول ۴ تغییرات تنش تسلیم برشی و استحکام برشی نهایی نمونه های اکستروژن و MDF شده

ماده	USS (MPa)	درصد تغییرات USS نسبت به حالت اکستروژن شده (%)	SYS (MPa)	درصد تغییرات SYS نسبت به حالت اکستروژن شده (%)
AZ31/SiC/Ex	۱۲۵/۹۸	-	۹۵/۲۹	-
AZ31/SiC/2P asses	۱۴۸/۵۹	۱۷/۹۵	۱۲۱/۱۳	۲۷/۱۲
AZ31/SiC/4P asses	۱۴۰/۵۰	۱۱/۵۲	۱۰۸/۲۱	۱۳/۵۶
AZ31/SiC/6P asses	۱۴۳/۷۴	۱۴/۱	۱۱۷/۹	۲۳/۷۳
AZ31/SiC/8P asses	۱۴۲/۱۰	۱۲/۸	۱۱۳/۰۶	۱۸/۶۵

در پژوهش کیانو و همکاران، خواص مکانیکی نمونه های کامپوزیتی ECAP شده در مقایسه با حالت های ریختگی و اکستروژن شده بهبود پیدا کرد. اما نتایج نشان داد که UTS و YS طی ۳ عبور از فرآیند ECAP، از عبور اول تا عبور سوم کاهش یافته است. آنها دلیل این کاهش را انحراف تدریجی صفحه پایه از جهت اکستروژن دانستند [9].

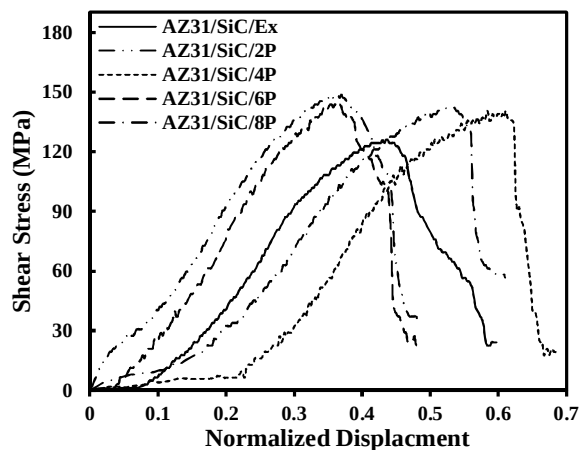
در پژوهش نی و همکاران، تاثیر فرآیند MDF (تا ۶ عبور) روی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ AZ91 و نانو کامپوزیت های ریختگی SiCp/AZ91 بررسی شد. نتایج آزمون کشش در مورد آلیاژ AZ91 نشان داد که با افزایش عبورهای MDF، YS نمونه های فرآوری شده با روند افزایشی همراه بود، اما UTS تا عبور سوم افزایش و سپس کاهش پیدا کرد. آنها دلیل کاهش UTS را حضور مقدار کمی از فازهای درشت ثانویه در امتداد مرزهای دانه دانستند. در ادامه، نتایج آزمون کشش در مورد نانو کامپوزیت های MDF شده، افزایش UTS تا ۶ عبور را نشان داد، اما YS تا ۳ عبور اول افزایش و سپس کاهش یافت. آنها دلیل این کاهش را اصلاح شدید دانه ها و چرخش صفحات پایه (۲۰۰۰) دانستند [10].

علاوه بر موارد فوق، در برخی مواقع آلیاژهای تقویت نشده نیز نتایج مشابهی را نشان داده اند. به عنوان مثال در پژوهش سالندری رابری و همکاران که فرآیند فورج چندمحوره تا ۵ عبور در دمای ۴۰۰°C روی آلیاژ منیزیم WE اعمال شد، نتایج به این صورت بود که خواص مکانیکی YS و UTS نسبت به حالت اکستروژن بهبود پیدا کرد. اما روند تغییرات خواص با افزایش عبورهای MAF این گونه تفسیر شد که با اعمال اولین عبور، بهبود قابل توجهی در خواص پدید می آید، اما با اعمال عبورهای بعدی تغییرات چشمگیری در خواص حاصل نمی شود. در واقع خواص از عبور اول تا سوم کاهش پیدا کرد و در ۲ عبور آخر به صورت جزئی بهبود یافت. در ادامه، مشاهدات بافتی نشان داد که پس از اعمال عبور اول، بافتی شامل صفحات پایه عمود بر محور فورج، حاصل شده، در حالی که بافت به وسیله اعمال عبورهای بعدی تضعیف شده است [22].

بنابراین با توجه به نتایجی که پژوهش های مشابه به آن دست یافته اند، استنباط می شود که تحولات ایجاد شده در بافت کریستالی ماده طی عبورهای مختلف MDF، عاملی بوده که خواص مکانیکی

می شود، رشد دانه طی تبلور مجدد، به علت قفل شدن مرزهای دانه توسط تقویت کننده ها متوقف می شود. عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی: معمولاً زمینه و تقویت کننده، دارای اختلاف ضریب انبساط حرارتی (CTE) هستند. در نتیجه، تنش های حرارتی طی فرآوری (به طور مثال هنگام خنک سازی طی فرآیند ریخته گری) ایجاد می شوند. چنین سطوح تنشی برای افزایش چگالی ناهنجاری به اندازه کافی بزرگ هستند، به ویژه در فصل مشترک زمینه/تقویت کننده که منجر به استحکام های تسلیم بالاتر می شود.

اثر انتقال بار: انتقال بار از زمینه نرم به نانو تقویت کننده های سرامیکی سخت طی کشش، به ویژه هنگامی که فصل مشترک خوب و یکپارچه ای بین دو فاز وجود دارد، اثر انتقال بار نامیده می شود که در افزایش استحکام نانو کامپوزیت سهیم است [6, 8, 21]. نمودار ۲ منحنی های تنش برشی- جابه جایی بی بعد شده مربوط به نانو کامپوزیت های AZ31/SiCp فرآوری شده با تعداد عبورهای مختلف MDF را نشان می دهد. با مقایسه مواد MDF شده و مواد فرآوری نشده با فرآیند MDF مشاهده می شود که فرآیند فورج چندجهته در افزایش استحکام برشی تسلیم و استحکام برشی نهایی تاثیر قابل توجهی داشته است.



نمودار ۲ منحنی های تنش برشی- جابه جایی بی بعد شده مربوط به نمونه های اکستروژن و MDF شده

با انجام ۲ عبور اول از فرآیند MDF، استحکام برشی تسلیم و نهایی کامپوزیت ها نسبت به حالت اکستروژن شده، به ترتیب افزایش ۲۷/۱۲ و ۱۷/۹۵٪ داشتند که در مقایسه با دیگر عبورها، بیشترین مقادیر بوده اند که می توان ناشی از اصلاح شدن ساختار و ریزش دانه ها دانست.

به طور کلی خواص مکانیکی مواد منیزیمی، وابستگی زیادی به اندازه دانه و تغییرات ریزساختاری دارد. به عنوان مثال، طبق معادله کلاسیک هال-پچ ($\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$) که در آن σ_0 و k_y ثوابت ماده و d متوسط اندازه دانه است، مقدار k_y وابسته به تعداد سیستم های لغزش ماده بوده و برای فلزات با ساختار کریستالی HCP بیشتر از فلزات FCC و BCC است. از آنجایی که منیزیم فلزی با ساختار کریستالی HCP است، بنابراین تغییر اندازه دانه مقدار استحکام تسلیم را بیشتر تحت تاثیر قرار می دهد [19, 22].

با انجام ۲ عبور بعدی همراه با افزایش اندازه دانه ها، روند تغییر استحکام برشی تسلیم و نهایی، نزولی شد. خواص مذکور از عبور چهارم تا عبور ششم افزایش یافتند و در ۲ عبور آخر، SYS و USS کاهش پیدا کردند. جدول ۴ تغییرات SYS و USS مربوط به مواد

۴- نتیجه‌گیری

اثر فرآیند فورج چندجهته روی ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های AZ31/SiCp فرآوری‌شده با فرآیند ریخته‌گری گردابی بررسی شد. نتایج مهم این پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱- استحکام برشی تسلیم، استحکام برشی نهایی و سختی نانوکامپوزیت اکستروژنه‌شده، نسبت به آلیاژ اکستروژنه‌شده به‌ترتیب ۹/۹۱، ۵/۴۸ و ۱۳/۹۹٪ افزایش یافتند. این را می‌توان به اثر استحکام‌دهی نانوذرات سرامیکی پراکنده‌شده در زمینه کامپوزیت نسبت داد.

۲- نتایج آزمون‌های مذکور روی کامپوزیت‌های فرآوری‌شده با عبورهای مختلف MDF نشان داد که خواص مکانیکی مواد MDF شده طی عبورهای مختلف، در مقایسه با حالت اکستروژنه‌شده بهبود پیدا کرده است. بهترین خواص مکانیکی در ۲ عبور اول حاصل شد که طی آن مقادیر استحکام برشی تسلیم، استحکام برشی نهایی و سختی به‌ترتیب ۲۷/۱۲، ۱۷/۹۵ و ۱۶/۰۳٪ نسبت به حالت اکستروژنه‌شده بهبود یافتند. پس از آن با افزایش عبورهای MDF، خواص مکانیکی به‌صورت تناوبی با افزایش و کاهش همراه بود.

۳- بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که پس از اعمال فرآیند MDF، ریزساختار ماده همگن‌تر شد و اندازه دانه‌ها در تمامی حالات، نسبت به حالت اکستروژنه‌شده کاهش پیدا کردند. مقدار متوسط اندازه دانه (D_{avg}) نانوکامپوزیت در حالت اکستروژنه، $18/96 \mu m$ به دست آمد. با اعمال فرآیند MDF تا ۸ عبور، مقادیر متوسط اندازه دانه به‌صورت تناوبی تغییر کرد و کمترین اندازه دانه در عبور ششم به دست آمد، به‌طوری که در این حالت مقدار D_{avg} $5/9 \mu m$ بود.

۴- با بررسی نتایج خواص مکانیکی ملاحظه می‌شود که علی‌رغم ساختار ریزتر و همگن‌تری که در عبورهای آخر حاصل شده، اما مطلوب‌ترین خواص برای عبور دوم به دست آمده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عامل دیگری در تغییر خواص کامپوزیت‌های MDF شده موثر است و این عامل می‌تواند ناشی از تغییرات بافتی ایجاد به‌وسیله فرآیند MDF باشد.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

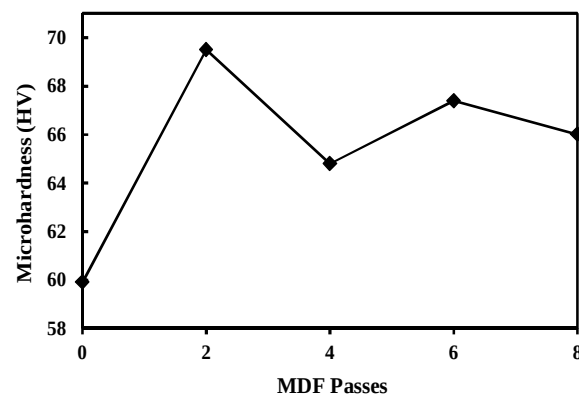
منابع

- 1- Ye HZ, Liu XY. Review of recent studies in magnesium matrix composites. Journal of materials science. 2004;39(20):6153-6171.
- 2- Alam ME, Hamouda AMS, Nguyen QB, Gupta M. Improving microstructural and mechanical response of new AZ41 and AZ51 magnesium alloys through simultaneous addition of nano-sized Al_2O_3 particulates and Ca. Journal of Alloys and Compounds. 2013;574:565-572.
- 3- Kainer KU. Magnesium alloys and technologies. Hoboken: John Wiley & Sons; 2006.
- 4- Nguyen QB, Tun KS, Lim CYH, Wong WLE, Gupta M. Influence of nano-alumina and sub-micron copper on

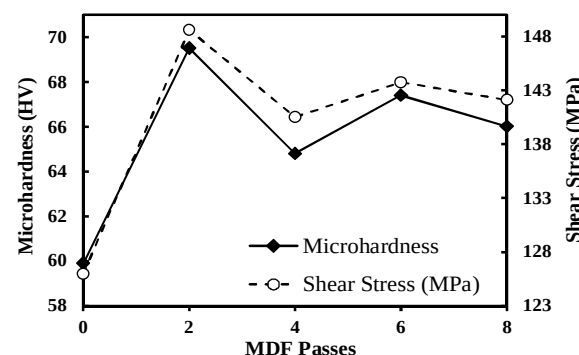
۳-۳ نتایج آزمون توزیع میکروسختی

نتایج آزمون توزیع میکروسختی ویکرز نمونه‌های فرآوری‌شده با فرآیندهای اکستروژن و MDF در نمودار ۳ نشان داده شده است. همان گونه که از نمودار ۳ مشخص است، مقدار سختی متوسط سطح نمونه اکستروژنه‌شده پس از اعمال ۲ عبور اول از فرآیند MDF، جهش قابل توجهی داشته، به‌طوری که این مقدار از ۵۹/۹ به ۶۹/۵HV بهبود پیدا کرده است. این مقدار از عبور دوم تا چهارم به ۶۴/۸HV تنزل یافت. پس از آن، با افزایش عبورهای MDF تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقدار میکروسختی حاصل نشد، به‌گونه‌ای که از عبور چهارم تا ششم، مقدار میکروسختی افزایش ۲/۶ ویکرزی داشته و به مقدار ۶۷/۴HV رسید و این مقدار در ۲ عبور آخر به ۶۶HV کاهش پیدا کرد.

همان طور که در نمودار ۴ مشاهده می‌شود، روند تغییرات مقادیر سختی و استحکام برشی نهایی، طی عبورهای مختلف یکسان است. بنابراین، به همان دلایلی که قبلاً ذکر شد، ریزساختار همگن‌تر و ریزتر عبورهای ششم و هشتم باعث نشد که بیشترین مقدار سختی حاصل شود، زیرا تحولات بافتی ماده نیز بر میزان سختی و استحکام اثرگذار است. البته ذکر این نکته نیز ضروری است که سختی آلیاژ AZ31 اکستروژنه‌شده، ۵۲/۵۵HV اندازه‌گیری شده است که با مقایسه آن با مقادیر فوق استنباط می‌شود که تولید کامپوزیت‌های زمینه منیزیمی، راهکار مناسبی برای بهبود خواص مکانیکی منیزیم و آلیاژهای آن است. همچنین می‌توان به این باور رسید که فرآوری مواد مذکور با فرآیندهای شکل‌دهی شدید از جمله MDF می‌تواند تاثیر بسزایی در افزایش کیفیت قطعات فرآوری‌شده و توسعه کاربرد آنها داشته باشد.



نمودار ۳) منحنی تغییرات مقادیر میکروسختی نمونه‌های فرآوری‌شده با عبورهای مختلف MDF



نمودار ۴) منحنی مقایسه تغییرات استحکام برشی نهایی و میکروسختی بر حسب تعداد عبورهای فرآیند MDF

AZ91D+Y magnesium alloy by equal channel angular extrusion and multi-axial forging. *Materials & Design*. 2009;30(10):4557-4561.

14- Huang H, Zhang J. Microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy processed by multi-directional forging at different temperatures. *Materials Science and Engineering: A*. 2016;674:52-58.

15- Akbari Panah F, Salavati MA, Mahmudi R. The effects of extrusion and Multi-Directional Forging (MDF) processes on microstructure, shear strength and microhardness of AM60 magnesium alloy. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;16(11):409-416. [Persian]

16- Goyal S, Karthik V, Kasiviswanathan KV, Valsan M, Sankara Rao KB, Raj B. Finite element analysis of shear punch testing and experimental validation. *Materials & Design*. 2010;31(5):2546-2552.

17- Guduru RK, Darling KA, Kishore R, Scattergood RO, Koch CC, Murty KL. Evaluation of mechanical properties using Shear-Punch testing. *Materials Science and Engineering: A*. 2005;395(1-2):307-314.

18- Nie KB, Deng KK, Wang XJ, Xu FJ, Wu K, Zheng MY. Multidirectional forging of AZ91 magnesium alloy and its effects on microstructures and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2015;624:157-168.

19- Nie KB, Wu K, Wang XJ, Deng KK, Wu YW, Zheng MY. Multidirectional forging of magnesium matrix composites: Effect on microstructures and tensile properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2010;527(27-28):7364-7368.

20- Deng KK, Wang XJ, Gan WM, Wu YW, Nie KB, Wu K, et al. Isothermal forging of AZ91 reinforced with 10 vol.% silicon carbon particles. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528(3):1707-1712.

21- Huang SJ, Ho CH, Feldman Y, Tenne R. Advanced AZ31 Mg alloy composites reinforced by WS₂ nanotubes. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;654:15-22.

22- Salandari-Rabori A, Zarei-Hanzaki A, Fatemi SM, Ghambari M, Moghaddam M. Microstructure and superior mechanical properties of a multi-axially forged WE magnesium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;693:406-413.

mechanical properties of magnesium alloy AZ31. *Composites Part B: Engineering*. 2013;55:486-491.

5- Masoudpanah SM, Mahmudi R. The microstructure, tensile, and shear deformation behavior of an AZ31 magnesium alloy after extrusion and equal channel angular pressing. *Materials & Design*. 2010;31(7):3512-3517.

6- Matin A, Fereshteh Saniee F, Abedi HR. Microstructure and mechanical properties of Mg/SiC and AZ80/SiC nano-composites fabricated through stir casting method. *Materials Science and Engineering: A*. 2015;625:81-88.

7- Xia X, Chen Ming, Lu Y, Fan F, Zhu C, Huang J, Deng T, et al. Microstructure and mechanical properties of isothermal multi-axial forging formed AZ61 Mg alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013;23(11):3186-3192.

8- Habibnejad-Korayem M, Mahmudi R, Poole W. Enhanced properties of Mg-based nano-composites reinforced with Al₂O₃ nano-particles. *Materials Science and Engineering: A*. 2009;519(1):198-203.

9- Qiao XG, Ying T, Zheng MY, Wei ED, Wu K, Hu XS, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of nano-SiCp/AZ91 composite processed by extrusion and equal channel angular pressing (ECAP). *Materials Characterization*. 2016;121:222-230.

10- Nie KB, Deng KK, Wang XJ, Wang T, Wu K. Influence of SiC nanoparticles addition on the microstructural evolution and mechanical properties of AZ91 alloy during isothermal multidirectional forging. *Materials Characterization*. 2017;124:14-24.

11- Wu K, Deng K, Nie K, Wu Y, Wang X, Hu X, et al. Microstructure and mechanical properties of SiCp/AZ91 composite deformed through a combination of forging and extrusion process. *Materials & Design*. 2010;31(8):3929-3932.

12- Nie KB, Wang XJ, Hu XS, Wu YW, Deng KK, Wu K, et al. Effect of multidirectional forging on microstructures and tensile properties of a particulate reinforced magnesium matrix composite. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528(24):7133-7139.

13- Zhao Z, Chen Q, Hu C, Shu D. Microstructure and mechanical properties of SPD-processed an as-cast