

ارائه زاویه ساچمه زنی بهینه در عملیات شات پینینگ آلیاژ منیزیم AZ31

سید نبی الدین شریفی شیرمردی^۱، رضا عابدین زاده^۲

^۱ گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران (نویسنده مسئول)

^۲ گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

چکیده

منیزیم به عنوان سبک ترین فلز با ویژگی های منحصر به فرد کاربردهای وسیعی در صنایع مختلف دارد و به دلیل ویژگی های برجسته روز به روز به کاربرد این فلز افزوده می شود. پایداری ابعاد در برابر تغییرات حرارتی یکی دیگر از ویژگی های این آلیاژ می باشد. اما در مقابل ویژگی های جذاب، این فلز، محدودیت هایی نیز دارد که می توان به مقاومت در برابر خوردگی و مقاومت سایشی ضعیف آن اشاره نمود. این آلیاژ در دماهای بالا به شدت استحکام خود را از دست می دهد که می توان این مشکل را با آلیاژ خاص با رسوبات مقاوم به حرارت و تولید کامپوزیت های پایه با ذرات تقویت شده مکانیک حل نمود. عوامل محدود کننده این آلیاژ مقاومت به خوردگی و سایش هستند. ساچمه زنی موثرترین روش برای اصلاح ساختار به واسطه کرنش پلاستیک بر روی سطح آلیاژ می باشد. با عملیات ساچمه زنی مقاومت به سایش بیشتر می شود که در این پژوهش عملیات ساچمه زنی بر روی آلیاژ AZ۳۱ با تغییر پارامترهایی نیر زمان و زاویه برخورد ساچمه بررسی شده است و نتایج حاصل از آنالیز سایش به منظور بررسی رفتار سایشی نمونه ها، سختی سنجی جهت اندازه گیری سختی نمونه ها، زبری سنجی و آنالیز پراش پرتو ایکس به منظور تعیین زاویه بهینه ساچمه زنی نمونه ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده بهبود خواص آلیاژ AZ۳۱ در ساچمه زنی با زاویه ۳۰ درجه است.

واژه های کلیدی: زاویه ساچمه زنی، پراش پرتو ایکس، آلیاژ AZ۳۱، شات پینینگ

۱. مقدمه

منیزیم به عنوان سبک ترین فلز با ویژگی های منحصر به فرد کاربردهای وسیعی در صنایع مختلف دارد و به دلیل ویژگی های برجسته روز به روز به کاربرد این فلز افزوده می شود. منیزیم با چگالی $1/7$ گرم بر سانتی متر مکعب، سبک ترین فلز با قابلیت تولید قطعات صنعتی است. چگالی منیزیم ۳۰ درصد از آلومینیوم کمتر (چگالی آلومینیوم $2/7$ گرم بر سانتی متر مکعب) و تنها ۲۰ درصد چگالی آهن است (چگالی آهن $7/8$ گرم بر سانتی متر مکعب). این ویژگی منحصر به فرد جذابیت فراوانی برای استفاده از این فلز در تولید قطعات متحرک و صنعت حمل و نقل ایجاد کرده است. این ویژگی های برجسته جذابیت فراوانی برای استفاده از این فلز در تولید قطعات متحرک و صنعت حمل و نقل ایجاد کرده است. همراه چگالی پایین این آلایژ استحکام قابل توجهی از خود نشان می دهد. این ویژگی سبب افزایش نسبت استحکام به وزن این فلز شده است. بر همین اساس در صنعت هوایی و خودرو سازی از آن استفاده های زیادی می شود. از ویژگی های دیگر این فلز می توان به قابلیت جذب ارتعاشات اشاره کرد. علاوه بر این، قابلیت میرایی ارتعاشات سپری قوی در برابر امواج الکترومغناطیس یکی دیگر از ویژگی های این فلز است که از این ویژگی در تلفن های همراه و تجهیزات الکترونیکی نظامی و تولید سیم های انتقال اطلاعات نیز استفاده می کنند. پایداری ابعاد در برابر تغییرات حرارتی یکی دیگر از ویژگی های این آلایژ می باشد. اما در مقابل ویژگی های جذاب، این فلز، محدودیت هایی نیز دارد که می توان به مقاومت در برابر خوردگی و مقاومت سایشی ضعیف آن اشاره نمود. این آلایژ در دماهای بالا به شدت استحکام خود را از دست می دهد که می توان این مشکل را با آلایژ خاص با رسوبات مقاوم به حرارت و تولید کامپوزیت های پایه با ذرات تقویت شده مکانیک حل نمود. عوامل محدود کننده این آلایژ مقاومت به خوردگی و سایش هستند. ساچمه زنی موثرترین روش برای اصلاح ساختار به واسطه کرنش پلاستیک بر روی سطح آلایژ می باشد. با عملیات ساچمه زنی مقاومت به سایش بیشتر می شود که در این پژوهش عملیات ساچمه زنی بر روی آلایژ AZ31 با تغییر پارامترهایی نیز زمان و زاویه برخورد ساچمه بررسی شده است [۱].

۲. تکنیک شات پینینگ

شات پینینگ یک عملیات سرد کاری است که در آن سطح قطعه توسط اجسام ریز کروی، که به آن ها ساچمه گفته می شود، بمباران می گردد. هر یک از این ساچمه ها مانند یک چکش کوچک ضربه ای را بر سطح قطعه وارد می کند که باعث ایجاد یک گودی یا فرورفتگی بر روی سطح فلز می شود. به منظور ایجاد این فرورفتگی ها باید لایه های سطحی فلز بر اثر برخورد ساچمه ها به تنش تسلیم برسند. پس از برخورد ساچمه و ایجاد فرورفتگی بر روی سطح، در لایه های زیر سطحی دانه ها به هم فشرده شده و تلاش می کنند که سطح را به شکل اولیه خود باز گردانند لذا در سطح نیمکره بوجود آمده عملیات کارسرد صورت می گیرد که این موضوع باعث ایجاد تنش های فشاری می گردد.

عملیات شات پینینگ در دهه ۱۹۳۰ تا ۱۹۴۰ میلادی برای کاربردهای خاص استفاده شد و برای اولین بار به صورت صنعتی، توسط شرکت جنرال موتور آمریکا مورد استفاده قرار گرفت. تلاش ها برای افزایش عمر خستگی قطعات هواپیما در جنگ جهانی دوم منجر به ایجاد روش های جدید بوسیله نیروی هوایی و دریایی ارتش و همچنین اتحادیه خودروسازان آمریکا شد. البته لازم به ذکر است که عملیات شات پینینگ از عملیات شات بلاست (که در فصل سوم مورد ارزیابی قرار گرفته است) مشتق شده است اما اکنون فرآیندی کاملاً مستقل و با کاربردهای متفاوت نسبت به شات بلاست می باشد. به همین دلیل است که در اولین مقاله های ارائه شده در این زمینه از شات پینینگ سخنی گفته نشده است و در طی زمان این فرآیند از شات بلاست مستقل گردید [۲].

۱.۲. استانداردهای اصلی ساچمه پاشی

استاندارد ۴۴۲- SAEJ

در این استاندارد، ملزومات اولیه برای کنترل فرآیند ساچمه پاشی که شامل: نوارهای آلمن، نگهدارنده^۱، بلاک صفر کردن^۲، سنججه می باشد؛ مورد بررسی قرار می گیرد. در واقع، کنترل عملکرد یک ماشین ساچمه پاشی به منزله کنترل خواص یک جریان سیال از ساچمه ها بر روی سطح قطعه است؛ ذکر شده که چنانچه نوار باریکی از یک فلز (نوار آلمن) در معرض جریانی از ساچمه ها قرار گیرد؛ تحذب یا انحنایی در آن ایجاد می شود؛ که مقدارش بسته به میزان تنش های پسماند فشاری ذخیره شده، متفاوت خواهد بود. همچنین خواص جریان ساچمه ها شامل: جنس، شکل، سرعت و سختی آن ها، و ضمناً وضعیت قطعه نسبت به پاشنده، میزان انحناء نوار آلمن را متأثر می سازد. ارتفاع قوس برحسب میلی متر یا اینچ، که شاخص کمی کردن میزان انحناء است.

استاندارد ۴۴۳- SAEJ

در این استاندارد به استناد تجهیزات معرفی شده در استاندارد قبلی، روند استفاده از آنها برای تعیین شدت پاشش، حد اشباع و همچنین تکرارپذیری عملکرد ماشین ساچمه پاشی، مورد بررسی قرار می گیرد. علاوه برآن، چگونگی رسم منحنی اشباع و نحوه تعیین حد اشباع بحث می شود.

پارامترهای شناخته شده زیادی وجود دارند که تاثیر مهمی روی کارایی عملیات ساچمه زنی می گذارند. این پارامترها را می توان در سه گروه تقسیم بندی کرد [۳]:

پارامترهای مربوط به ساچمه: نوع ابعاد، شکل، چگالی، سختی، استحکام تسلیم، سفتی.
پارامترهای مربوط به قطعه کار: سختی، استحکام تسلیم، سفتی، کارسختی، ترکیب شیمیایی، شرایط پیش تنش
پارامترهای جریان ساچمه ها: نرخ جریان جرم، سرعت، زاویه برخورد، فاصله نازل تا قطعه کار.

۳. پیشینه پژوهش

ستونه اول در سال ۱۳۹۸ به بررسی تنش پسماند، زبری و اندازه دانه ها برای ساچمه زنی با پوشش ۱۰۰٪ پرداخت. تایج حاصل از پژوهش نشان می دهد که زمانی که تنها پارامتر متغیر شدت ساچمه زنی باشد که در عمل به معنای تغییر سرعت است، عمق نفوذ تنش پسماند با افزایش شدت به صورت قابل ملاحظه ای بیشتر می شود و همچنین مقدار ماکزیمم تنش پسماند فشاری نیز به مقدار کمی افزایش می یابد که این نتایج قابل انتظار بود. نتایج نشان می دهد که با پوشش ۱۰۰٪ نمی توان دانه های سطح را به ابعاد نانو برد و بایستی برای این هدف از پوشش دهی بالاتری استفاده کرد. اما نتایج نشان می دهد کرنش پلاستیک در شدت A1۸ از شدت A1۴ بیشتر است که مورد انتظار نیز بود. از طرفی با مقایسه ی کرنش معادل پلاستیک بین دو برخورد A1۴ با ساچمه های S100 و S230 مشاهده می شود که PEEQ برای برخورد با ساچمه ی S110 بالاتر است و دلیل این مسئله این است که در ساچمه ی کوچک تر سرعت برخورد بالاتر است و نشان می دهد که سرعت برخورد در کرنش پلاستیک معادل تاثیر زیادی دارد [۴]. امانی و اکبری در سال ۱۳۹۸ به بررسی تاثیر ساچمه زنی بر

^۱ - Holder^۲ - Zero Block

مقاومت به سایش فولادهای زنگ نزن آستینیتی L304 پرداختند. نتایج آزمایش های سایش در قالب کاهش وزن نشان داد که ساچمه زنی باعث کاهش میزان ماده ساییده شده و بهبود مقاومت به سایش از ۲۹٪ تا ۵۴٪ می شود. میزان بهبود در مقاومت به سایش و کاهش وزن با نیروی اعمالی رابطه معکوس دارد. به طوری که بیشترین افزایش مقاومت به سایش در کمترین بار اعمالی حاصل می شود. دلیل چنین رفتاری به ضخامت لایه کارسخت شده بر می گردد و انتظار می رود با افزایش ضخامت لایه کارسخت شده، میزان افزایش مقاومت به سایش در نیروهای اعمالی بالاتر نیز بیشتر شود [۵]. بردبار و همکاران در سال ۱۳۹۷ به بررسی بررسی تجربی اثر تغییر در سطح ساچمه زنی بر عملکرد نیروئی و طول عمر فنر خورشیدی کلاچ خودرو پرداختند. بدین منظور تعداد ۶ عدد فنر خورشیدی انتخاب و قبل و پس از انجام عملیات شات پین در نواحی مختلف تحت تست قرار داده شد. نتایج نشان داد که تغییر در سطح شات شده، بسته به محل شات می تواند تا ۱۷٪ سبب تغییر در پارامترهای نیرویی شود. فنرها پس از شات به منظور بررسی عمر خستگی تبدیل به محصول کامل شده و در دستگاه تست عمر نهائی قرار گرفت. نتایج نشان داد میزان تاثیرپذیری طول عمر هر قطعه از محل عملیات شات پین رابطه مستقیمی با میزان تمرکز تنش در آن ناحیه دارد [۶]. اتقانی و معینی فر در سال ۱۳۹۷ به بررسی تحلیل تنش های پسماند در فرایند ساچمه زنی آلیاژ آلومینیوم A357 پرداختند. در این پژوهش تاثیرات ساچمه زنی بر بعضی از خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ریخته گری A357 با بهره گیری از شبیه سازی نرم افزاری انجام گرفته است. شبیه سازی فرایند ساچمه زنی جهت استخراج عوامل موثر بر تنش پسماند مورد بررسی قرار گرفته است. خواص ساچمه زنی مورد بررسی برای سه شرایط مختلف متفاوت از لحاظ شدت و نوع ساچمه می باشد. از آنجایی که در عمل برخورد ساچمه ها با سطح بصورت تصادفی است و این مسئله در شبیه سازی های گذشته مد نظر قرار داده نشده بود. از اینرو چینش ساچمه ها به صورت تصادفی بالای سطح برخورد انجام شده است. تطابق خوبی از نتایج حاصله با پژوهش های گذشته وجود دارد. برای تخمین تنش پسماند با تقریب بسیار خوبی می توان از ساچمه صلب استفاده کرد و دلیل این امر این است که تنش تسلیم آلیاژ آلومینیوم A357 بالا نمی باشد و در زمان برخورد ساچمه تغییر شکل آن بسیار بیشتر از ساچمه می باشد. هر چه ساچمه زنی شدیدتر باشد عمق نفوذ تنش پسماند بیشتر خواهد شد [۷].

۴. روش تحقیق

در پژوهش حاضر آلیاژ منیزیم AZ31 با استفاده از زوایای ۳۰ و ۴۵ درجه در دو زمان ۲۰ و ۸۰ دقیقه مورد ساچمه پاشی قرار گرفته است. روش تحقیق پژوهش حاضر به صورت گام به گام به شرح ذیل است: ۱- تهیه آلیاژ منیزیم AZ31 -۲ انجام عملیات ساچمه زنی بر روی آلیاژ منیزیم AZ31 -۳ برشکاری نمونه مورد نیاز بعد از عملیات ساچمه زنی جهت بررسی ریزساختار -۴ بررسی رفتار سایشی از طریق آزمون پین روی دیسک در دمای محیط -۵ بررسی سطح ساییده شده توسط میکروسکوپ الکترونی -۶ بررسی سختی سنجی نمونه AZ31 به روش ویکرز.

۱.۴. آماده سازی نمونه ها

در پژوهش حاضر به منظور آماده سازی نمونه ها، ابتدا با کاغذ سنباده ۵۰۰۰، ۲۴۰۰، ۱۲۰۰ نمونه ها سنباده زنی شد.



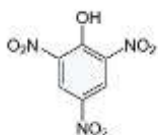
شکل ۱- نمونه کاغذ سنباده های مورد استفاده در آزمایش متالوگرافی

پس از آن با پارچه نرم و خمیر الماس پولیش نهایی شدند.



شکل ۲- خمیر الماس جهت پولیش نهایی سطح

پس از آن نمونه ها با استفاده از محلول با ترکیب اسید پیکریک $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$ ، H_2SO_4 ، HNO_3 ، آب CCl_4 ، اتانول CCl_4 ، اچ گردید. اسید پیکریک با فرمول شیمیایی $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$ یک ترکیب شیمیایی با شناسه پابکم ۶۹۵۴ است. که جرم مولی آن 123.07 g/mol می باشد. شکل ظاهری این ترکیب، جامد زرد بی رنگ است. این ترکیب یکی از مشتقات فنول می باشد که از جایگزینی گروه های سولفونیک اسید توسط گروه نیترو ساخته می شود.



شکل ۳- پیوندهای شیمیایی پیکریک اسید

برای بررسی ساختار از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM مدل XL30 ساخت هلند در بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر استفاده شده.



شکل ۴- از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM مورد استفاده در پژوهش

۲.۴. زبری سنجی

زبری سطح^۴ که گاهی زبری نیز گفته می شود، یکی از مولفه های بافت سطح است. زبری سطح به صورت انحرافات یک سطح حقیقی در جهت بردار نرمال، از مقدار ایده آل آن تعریف می شود. اگر مقدار این انحرافات زیاد باشد، سطح زبر است و اگر مقدار این انحرافات کوچک باشد، سطح صاف است. در متروولوژی سطح، زبری، مولفه طول موج-کوتاه و فرکانس- بالای یک سطح اندازه گرفته شده می باشد [۸]. زبری یکی از مولفه های مهم در تعیین نحوه واکنش اجسام واقعی با محیط اطراف است. در تریبولوژی، سطوح زبر، زودتر ساییده می شوند و ضریب اصطکاک بیشتری نسبت به سطوح صاف دارند. زبری یک از مولفه های مهم در تعیین عمر قطعات مکانیکی است، چرا که ناهمواری های سطح معمولاً محل ایجاد و شروع ترک و شکست قطعه هستند. زبری می تواند باعث بهبود قدرت چسبندگی دو سطح به یکدیگر یا به جزئی دیگر شود. کاهش زبری سطح در تولید یک قطعه معمولاً باعث افزایش قیمت تولید می شود و معمولاً برای تعیین میزان آن، بین زبری سطح و تأثیر آن بر عملکرد قطعه مصالحه ای انجام می شود. زبری را می توان به صورت دستی و با مقایسه سطح مورد بررسی با یک سطح که زبری آن معین است، تعیین کرد اما اینکار دقت خوبی ندارد و برای کاربردهای معمول و با دقت بالاتر از دستگاهی به نام پروفیلومتر استفاده می گردد. پروفیلومترها می توانند از نوع تماسی (معمولاً دارای سوزنی الماسی) یا از نوع نوری (برای مثال یک تداخل سنج نور سفید یا میکروسکوپ اسکن لیزر کانفوکال) باشند. این کمیت رول مهمی در تعیین اثر متقابل اشیاء با هم داشته و با دانستن آن بسیاری رفتارهای اجزاء مکانیکی قابل پیش بینی خواهد بود. برای مثال اشیاء زبر بیشتر در معرض خوردگی و ترک دار شدن هستند. برای اندازه گیری زبری از روش های تماسی و غیر تماسی مختلفی استفاده می کنند. در تجهیزات معمول برای اندازه گیری زبری که به زبری سنج^۵ معروف هستند از روش تماسی استفاده می کنند و یک هد نظیر سوزن های گرامافون بر روی سطح حرکت کرده با توجه به تعدد نوسانات و حداکثر جابجائی می تواند زبری سطح را مشخص کند [۹].



شکل ۵- انواع زبری سنج

در پژوهش حاضر آزمون زبری سنجی با میکرومتر زبری سنجی در فاصله طولی ۶.۵ mm بر روی چهار نمونه صورت گرفته است.

۳.۴. آزمون متالوگرافی^۶

متالوگرافی مطالعه ساختار فلزات و آلیاژها است. در این نوع بررسی ساختار فلزات زیر میکروسکوپ با بزرگنمایی بالا مورد مطالعه قرار می گیرد. در صنایع، کنترل کیفیت قطعات تولیدی توسط مطالعه ریزساختار به منظور بررسی و تعیین عیوب داخلی و خارجی صورت می گیرد. تجزیه و تحلیل ریزساختار در پیش بینی و بهبود خواص مکانیکی و خوردگی قطعات به

^۴ Surface roughness^۵ Roughness tester^۶ Metallography

خصوص در مواردی که به دلیل محدودیت نمونه برداری امکان تهیه نمونه در ابعاد مناسب جهت انجام آزمون مخرب وجود نداشته باشد حائز اهمیت است. همچنین تحلیل سطوح شکست و یا سطوحی که دچار خوردگی شده اند می تواند مهندسين را در شناسایی روش های جلوگیری از شکست و یا خوردگی راهنمایی کند [۱۰].

بعد از انتخاب نمونه مناسب برای کار، متخصصان این امر مراحل را برای رسیدن به سطحی مناسب طی می کنند که به طور کلی شامل مواردی مثل مقطع زدن، مانع کردن، سمباده کشیدن، پولیش کردن و اچ می شود. در پایان قطعه آماده شده برای آنالیز میکروسکوپی فرستاده می شود. مراحل آماده سازی نمونه ها در این روش به شرح ذیل است:

۴.۴. مقطع زدن

درست است که در مراحل آماده سازی، گاهی اوقات نمونه در اندازه مناسبی قرار دارد ولی اکثر مواقع به مقطع زدن نیاز خواهد داشت. پس از برش معمولاً در نمونه آسیب هایی به وجود می آید ولی این آسیب ها می توانند به حداقل برسند؛ که این به عواملی مثل نوع ماده ای که نمونه از آن ساخته شده و تکنیک های بکار رفته در برش بستگی دارد. در این میان به مواردی چون فشار، دما، سرعت بریدن، توسعه ترک، تولید گرما، دقت عمل و ... که هر یک به نوعی می توانند بر خواص قطعه تأثیر بگذارند نیز باید توجه شود اگر نمونه کوچک باشد برش با تجهیزاتی که در آزمایشگاه های متالوگرافی وجود دارد مثل ماشین های برش، انواع اره های نواری و مویی واره الماسی و دیگر دستگاه ها انجام می شود.

روش های مکانیکی مقطع زدن :

۱. شکستن: مشکل برش با اره ها یعنی تولید گرما و خراب شدن سطح برش را ندارد و بعد از شکستن باید سطح را صیقل داد و روی آن پرداخت کرد. این فرایند برای برخی فولادهای ترد، سرامیک ها و کاربیدها بکار می رود.

۲. قیچی کردن: معمولاً ورقه های فولاد کم کربن و دیگر مواد نازک و نرم با این روش قابل برش هستند. با توجه به اینکه مقداری گرما تولید می شود، قیچی کردن تغییر قابل ملاحظه ای در سطح ایجاد می کند و برای موادی که به تغییر شکل های مکانیکی حساسند توصیه نمی شود. اما در کل این نوع برش، ساده، سریع و پربازده است.

۳. اره کردن: برای موادی که نرمی آنها از ۳۵۰ hb بیشتر است استفاده می شود. انواع اره ها می توان به اره های مویی یا سیمی، آهن بر، الماسی و نواری اشاره کرد.

۴. برش با دستگاه تراش: رایج ترین روش مقطع زدن است و محبوبیتش بخاطر کیفیت سطح تولید شده و گستره سختی نمونه هایی است که می تواند برش دهد. در این دستگاه دیسک گردان نازک، ساخته شده از یک ساینده مناسب استفاده می شود. برای خنثی کردن اثر گرمای تولید شده بر سطح مقطع از آب و صابون و دیگر روان سازها استفاده می شود. در این روش حتی کل فرایند برش را زیر روغن مخصوص انجام می دهند خوبی این کار این است که روغن به هیچ وجه در شکاف ایجاد شده نمی سوزد و اثر مخرب بر سطح ندارد.

به غیر از برش های مکانیکی موارد زیر نیز انجام می شوند:

- **برش با قوس الکتریک:** این روش اغلب برای آلیاژهای بسیار سخت استفاده می شود.

از روش های دیگر می توان به برش با میکرو فرز و برش الکتروشیمیایی که همزمان از اسیدها و اره ها استفاده می کند اشاره کرد.

۵.۴. پرداخت اولیه با سمباده

کاغذهای سمباده دایره ای از جنس کلسیم کاربید روی سطح یک چرخ دوار افقی و تخت چسبانیده می شود و سپس نمونه روی آن گذاشته می شود. البته باید نمونه را با فشاری کنترل شده روی سطح قرار داد در این مدت از آب به عنوان روان ساز استفاده می شود تا ذرات جدا شده از سطح نمونه را با خود حمل کند و صحنه را تمییز نگه دارد و گرما را کاهش دهد. در هر یک از مراحل سایش، نمونه به شکلی حرکت داده می شود که خراش ها فقط در یک جهت ایجاد شود و در سایش بعدی، جهت آن عوض می شود.

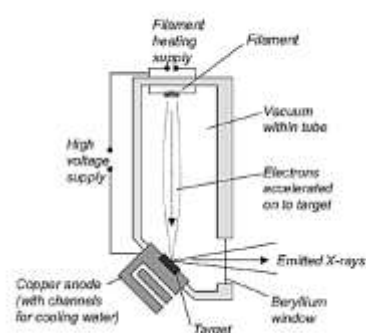
۶.۴. پرداخت نهایی یا نرم

در حال حاضر ماده ساینده مورد استفاده برای عملیات پرداخت، پودر الماس است. پودری که در خمیری قابل حل در روغن نگهداری و حمل و نقل می شود، در هنگام استفاده مقدار کمی از این خمیرها بر روی سطح یک چرخ دوار قرار می گیرد که روانساز آن روغنی مخصوص است. سپس نمونه روی محلی خاص و ثابت روی چرخ با فشار زیاد فشرده می شود و همزمان مخالف جهت چرخش چرخ می گردد. ذرات الماس خاصیت برشی شدیدی دارند و در جدا کردن لایه عمیق تغییر شکل یافته ناشی از سایش های اولیه بسیار مؤثراند. سطح ما بعد از عملیات به شدت صیقلی می شود و اگر با میکروسکوپ نوری آن را بنگریم حالت آینه ای دارند. پرداخت الکتریکی یا الکترو پولیش، نوعی خاص از پرداخت نهایی در فلزاتی نظیر فولاد ضدزنگ، تیتانیوم و زیر کونیم که از بین بردن لایه های سطحی اعوجاج یافته بسیار مشکل است پولیش مکانیکی مناسب نیست بنابراین اغلب این مواد توسط روش پرداخت الکتریکی در آخرین مرحله پرداخت می شوند در این حالت نمونه به عنوان آند و یک ماده غیرقابل حل به عنوان کاتد در یک حمام الکتrolیتی به صورت مناسب قرار می گیرند چنانچه از دانسیته جریان مناسب استفاده شود می توان سطح نمونه را به صورتی حل کرد که یک سطح پرداخت مناسب تولید شود. این روش معمولاً زمانی بکار می رود که نمونه توان پرداخت بیشتر و یا اچ کردن را ندارد یا اینکه ما قصد اچ کردن نداریم و می خواهیم قطعه را زود آزمایش کنیم [۱۱].

۷.۴. پراش پرتوی X

پراش (تفرق) اشعه ایکس روشی برای مطالعه ساختار مواد بلوری است که در سال ۱۹۱۲ میلادی توسط فون لاهه کشف شد و توسط ویلیام هنری براگ و ویلیام لورنس براگ برای بررسی بلورها بکار گرفته شد. پراش پرتو X یا XRD به منظور آنالیز فازی و بررسی اندازه دانه ها و ذرات نانو مواد استفاده می شود. این کار از طریق پردازش و آنالیز پرتو X- بازگشتی از سطح نمونه امکان پذیر است. این روشی است که روزالیند فرانکلین از آن برای تصویربرداری از دی ان ای استفاده کرد. اشعه های ایکسی که برای پراش استفاده می شوند، معمولاً طول موجی در حدود ۰/۵ الی ۲/۵ آنگستروم دارند. این روش بر پایه خاصیت موجی اشعه ایکس استوار است. هسته اتم ها در یک شبکه کریستالی به فاصله کمی (در حدود چند آنگستروم) از یکدیگر قرار

گرفته‌اند. بازتاب اشعه ایکس از این صفحات متوالی منجر به تداخل سازنده یا ویرانگر امواج ایکس می‌شود. در صورتی که امواج تداخل سازنده داشته باشند، با استفاده از فرمول براگ می‌توان فاصله صفحات کریستالی و در نتیجه اندازه و نوع سلول واحد را بدست آورد. استفاده از اشعه ایکس روش بسیار مناسبی برای مطالعه ساختمان اتم‌ها و مولکول‌ها که ناشی از عکس‌العمل اشعه الکترومغناطیس و تأثیر آن بر روی ساختمان‌هایی که اندازه آن‌ها مساوی اندازه طول موج ایکس است می‌باشد. اگر ساختمان در یک شبکه کریستالی مرتب شده باشد برخورد اشعه ایکس با اتم‌ها یا مولکول‌ها به صورت تیز بوده بنابراین پخش اشعه تحت شرایط خاص امکان‌پذیر است و اطلاع از چگونگی این شرایط خاص می‌تواند اطلاعاتی در مورد مشخصات هندسی ساختمان بدهد. طول موج اشعه ایکس قابل مقایسه با فاصله‌های داخلی اتمی در کریستال‌ها بوده و اطلاعات بدست آمده از پخش زاویه بزرگ می‌تواند مرتب شدن بخصوص هر کریستالی را تعیین کند و پخش اشعه ایکس تحت زاویه کوچک مناسب برای مطالعه پرپوده‌های بزرگتر است که مربوط به حفره‌ها یا لایه‌های کریستالی می‌باشد.



شکل ۶- شماتیک منبع پرتوی X آزمایشگاهی

بعد از عملیات شات‌پینینگ برای بررسی ساختار از XRD الگوی پراش X استفاده گردید. در این آزمایش با زاویه برخورد ۲ درجه بر روی لایه‌های سطح برای بررسی اندازه کریستالیت صورت گرفت.

۸.۴. آزمون سختی سنجی

در پژوهش حاضر از دستگاه میکروهاردنس به روش ویکرز مدل Micromet و ساخت شرکت بهلر ساخت ژاپن، به منظور انجام آزمون سختی سنجی استفاده شده است. سختی در فاصله ۲۵ میکرومتر و ۵۰ میکرومتر اندازه گیری شدند.



شکل ۷- دستگاه میکروهاردنس

روش ویکرز^۱ اولین بار توسط اسمیت و ساندلند در ویکرز لیمیتد در سال ۱۹۲۲ معرفی گردید. معمولاً برای مواد بسیار سخت بکار می‌رود. این روش شامل سوراخ کردن جسم توسط یک هرم مربع القاعده که دندانه الماسه کوچک دارد می‌باشد. زاویه نوک آن ۱۳۶ درجه است. بار اعمالی معمولاً بین ۱۰ تا ۱۵ ثانیه اعمال می‌شود. قطر مربع بویسله میکروسکوپ اندازه‌گیری می‌شود. اثر این روش لوزی شکل است. رابطه ای بین سختی برینل و ویکرز وجود دارد. عدد سختی ویکرز (HV) برابر نیروی اعمالی بخش بر سطح اثر است [۱۲]. مزایای این روش عبارتند از [۱۲]: ۱- مناسب برای امور تحقیقاتی است زیرا با یک بار معین می‌توان سختی را اندازه گرفت. (در روش‌های برینل یا راکول باید بار در نقطه ای از مقیاس تغییر کند یا امکان رنج سختی گرفتن وجود داشته باشد. به همین علت هم نمی‌توان بین دو مورد مقایسه کرد) ۲- نتیجه‌گیری درست ۳- از طریق این روش می‌توان سختی فلزات خیلی سخت تا خیلی نرم را اندازه گرفت.

۹.۴. آزمون سایش

سایش^۸ فرسایش یک سطح جامد ناشی از تماس با سطحی دیگر است. این فرایند در اثر تماس مکانیکی دو سطح با یکدیگر رخ می‌دهد. سایش، عبارت است از کاهش تدریجی ماده از سطح جسمی که نسبت به جسم دیگر حرکت نسبی دارد. لذا از بین رفتن تدریجی سطوح فلزی در شرایط کاری، معمولاً به پدیده سایش نسبت داده می‌شود. متغیرهای متالورژیکی نظیر سختی، چقرمگی و ساختار میکروسکوپی و ترکیب شیمیایی و همچنین مواد در حال تماس (نظیر ساینده ها و مشخصات آنها) نوع و روش بارگذاری، سرعت، دما، زمان، خشونت سطحی، روانکاری و خوردگی بروی پدیده سایش تاثیر گذار هستند [۱۳]. در این دستگاه نمونه با شرایط مشخصی آماده شده و روی هلدرد دستگاه نصب می‌گردد و با اعمال نیروی از پیش تعیین شده نمونه روی دیسک استاندارد سائیده میشود و با کمک نرم افزار مربوطه نمودارهای نیرو- زمان، تنش - زمان، و ضریب اصطکاک- مسافت ارائه می‌گردد. تجهیزات دستگاه شامل یک دیسک گردان است که یک گلوله /پین بر روی آن با نیروی مشخصی با نمونه تماس دارد. طبق استاندارد ASTM G-۹۹ برای آزمون سایش بکار می‌رود. جهت تعیین ضریب اصطکاک، نیرو و تنش و همچنین کاهش وزن ناشی از سایش حین کار و یا تست، از این دستگاه استفاده نمود.



شکل ۸- دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک

در پژوهش حاضر نیروی اعمالی gr۲۳۰ و در مسافت ۱۰۰۰ بوده است.

^۱Vickers

^۸Wear

۵. ارائه نتایج و بحث

در ادامه نتایج حاصل از بررسی های آزمایشگاهی به تفکیک بیان گردیده است.

۱.۵. زبری سنجی

زبری یکی از مولفه های مهم در تعیین نحوه واکنش اجسام واقعی با محیط اطراف است. در تریبولوژی، سطوح زبر، زودتر ساییده می شوند و ضریب اصطکاک بیشتری نسبت به سطوح صاف دارند. زبری یک از مولفه های مهم در تعیین عمر قطعات مکانیکی است، چرا که ناهمواری های سطح معمولاً محل ایجاد و شروع ترک و شکست قطعه هستند. در پژوهش حاضر آزمون زبری سنجی با میکرومتر زبری سنجی در فاصله طولی 6.5 mm بر روی چهار نمونه صورت گرفته است که در جدول ذیل نتایج آن ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج زبری سنجی

شماره نمونه	زاویه شات (درجه)	طول زمان شات (دقیقه)	زبری
A4520	۴۵	۲۰	۹/۰۲
A4580	۴۵	۸۰	۱۴/۴۶
A3020	۳۰	۲۰	۸/۱
A3080	۳۰	۸۰	۱۴/۱

همانطور که در جدول ۱ مشخص است، در نمونه هایی که با زاویه ۳۰ درجه شات شده است در هر دو زمان ۲۰ و ۸۰ دقیقه، زبری سطح نسبت به نمونه هایی که تحت زاویه ۴۵ درجه شات شده است، کاهش یافته است. سطوح زبر، زودتر ساییده می شوند و ضریب اصطکاک بیشتری نسبت به سطوح صاف دارند. زبری یک از مولفه های مهم در تعیین عمر قطعات مکانیکی است، چرا که ناهمواری های سطح معمولاً محل ایجاد و شروع ترک و شکست قطعه هستند. از اینرو می توان دریافت عمر قطعات و مقاومت شکست و ترک در نمونه هایی که با زاویه ۳۰ درجه ساچمه پاشی شده است بیشتر از نمونه هایی است که با زاویه ۴۵ درجه ساچمه پاشی شده اند.

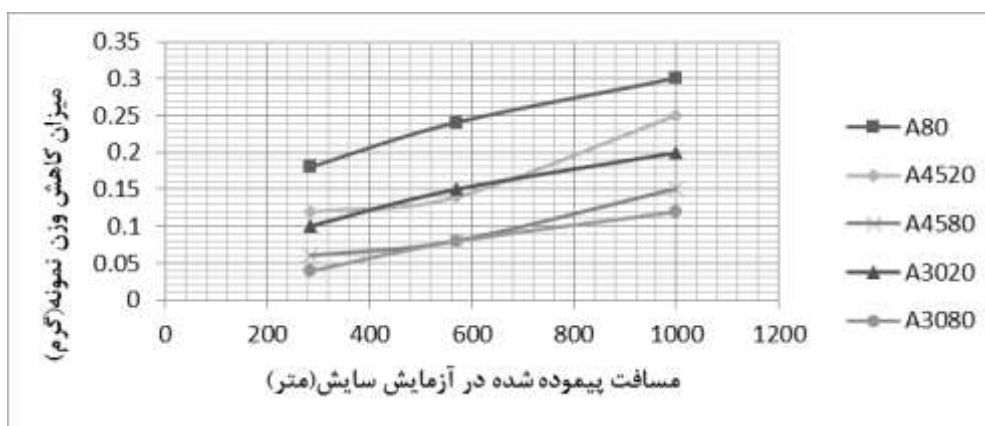
۲.۵. آزمون سایش

نتایج آزمون سایش در شکل ۹ و جدول ۲ براساس میزان کاهش وزن نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات نمونه ها و نتایج حاصل

مشخصات نمونه ها و آزمایشات			میزان کاهش وزن در مسافت پیموده شده آزمایش سایش (گرم)		
شماره نمونه	زاویه ساچمه زنی (درجه)	زمان ساچمه زنی (دقیقه)	۲۸۵ متر	۵۷۰ متر	۱۰۰۰ متر
A80	-	۸۰	۰/۱۸	۰/۲۴	۰/۳۰
A4520	۴۵	۲۰	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۲۵
A4580	۴۵	۸۰	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۱۵
A3020	۳۰	۲۰	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۲۰
A3080	۳۰	۸۰	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۱۲

با توجه به نتایج آزمایشات در جدول ۲، نمودار شکل ۹ تدوین شده است. با توجه به نمودار شکل ذیل، نمونه آلیاژ منیزیم AZ31 در زمانی که با زاویه ۳۰ درجه در زمان های ۲۰ و ۸۰ دقیقه ساچمه پاشی شده است، کاهش وزن کمتری را نسبت به نمونه ای که با زاویه ۴۵ درجه ساچمه پاشی شده است، شاهد بوده است. همچنین افزایش زمان ساچمه پاشی در هر زاویه مورد بررسی، سبب شده است تا کاهش وزن نمونه ها در آزمایش سایش، کاهش یابد. کمترین میزان کاهش وزن نسبت به نمونه اولیه، در نمونه های آلیاژ منیزیم AZ31 مورد بررسی، مربوط به نمونه ای بوده است که با زاویه ۳۰ درجه و در زمان ۸۰ دقیقه ساچمه پاشی شده است. همچنین بیشترین میزان کاهش وزن نسبت به نمونه اولیه مربوط به نمونه ای بوده است که تحت زاویه ۴۵ درجه و در مدت ۲۰ دقیقه ساچمه پاشی شده است.



شکل ۹- میزان کاهش وزن نمونه های آلیاژ منیزیم AZ31 در آزمایش سایش

لذا به نظر می‌رسد بهترین زاویه ساچمه باشی ۳۰ درجه باشد. در جدول ۳ میزان میانگین سختی ویکرز پس از ۵ نوبت سختی گیری از نمونه های مورد مطالعه ارائه شده است.

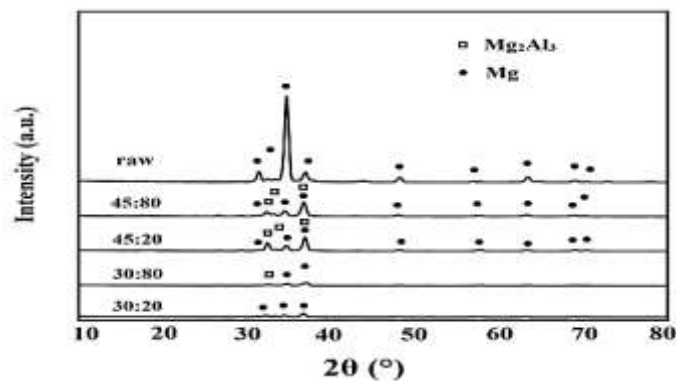
جدول ۳- میکرو سختی ویکرز در نمونه های آلیاژ منیزیم AZ31

شماره نمونه	زاویه ساچمه زنی (درجه)	زمان ساچمه زنی (دقیقه)	میکرو ویکرز	سختی	افزایش سختی نسبت به نمونه ساچمه زنی نشده
A80	-	۸۰	۶۶	-	-
A4520	۴۵	۲۰	۷۶	٪۱۰	-
A4580	۴۵	۸۰	۹۱/۶	٪۳۷/۸	-
A3020	۳۰	۲۰	۹۳/۶	٪۴۰/۹	-
A3080	۳۰	۸۰	۱۱۵/۹	٪۷۵/۷۵	-

با توجه به جدول ۳ می‌توان گفت، ساچمه زنی با هر زاویه ای می‌تواند سختی نمونه های آلیاژ منیزیم AZ31 را افزایش دهد. همچنین افزایش زمان ساچمه پاشی سبب افزایش سختی نمونه ها شده است. ساچمه پاشی با زاویه ۳۰ درجه در هر دو زمان ۲۰ و ۸۰ دقیقه سبب افزایش سختی نمونه ها نسبت به ساچمه پاشی با زاویه ۴۵ درجه شده است. در نمونه ساچمه زنی شده با زاویه ۳۰ درجه و زمان ۸۰ دقیقه شاهد بیشترین افزایش سختی نمونه نسبت به نمونه خام به میزان ۷۵/۷۵ درصد هستیم. لذا به نظر می‌رسد بهترین زاویه ساچمه باشی ۳۰ درجه باشد.

۳.۵. پراش پرتوی ایکس

الگوی پراش پرتوی ایکس در نمونه های عملیات نشده و شات پینینگ شده در شکل ۱۰ ارائه شده است. همانطور که مشخص است در اثر عملیات شات پینینگ، پیک ها پهن شده اند و از شدت پراش قله ها کاسته شده است. دلیل این موضوع در ارتباط با ریز شدن دانه ها و میکرو کرنش ها است که بر اثر برخورد ساچمه های فولادی در سطح اتفاق افتاده است. در زاویه ساچمه زنی ۳۰ درجه در هر دو زمان ۸۰ و ۲۰ دقیقه، نسبت به زاویه ساچمه زنی ۴۵ درجه شاهد کاهش شدت پراش قله ها هستیم. که این امر نشان دهنده این مطلب است که اجرای عملیات شات پینینگ با زاویه ۳۰ درجه نتایج کارتری را نسبت به زاویه ۴۵ درجه ارائه می دهد.



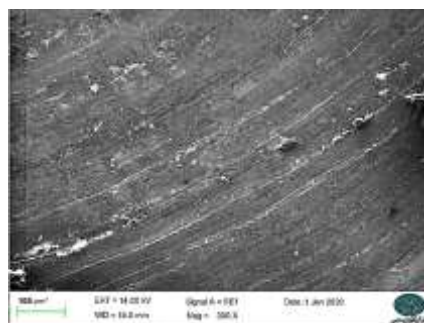
شکل ۱۰ - الگوی پراش پرتوی ایکس برای آلیاژ منیزیم AZ31 در زمان ها و زوایای مختلف ساچمه زنی

در جدول ۱ اندازه کریستال ها از دیتاهای XRD استخراج شده است.

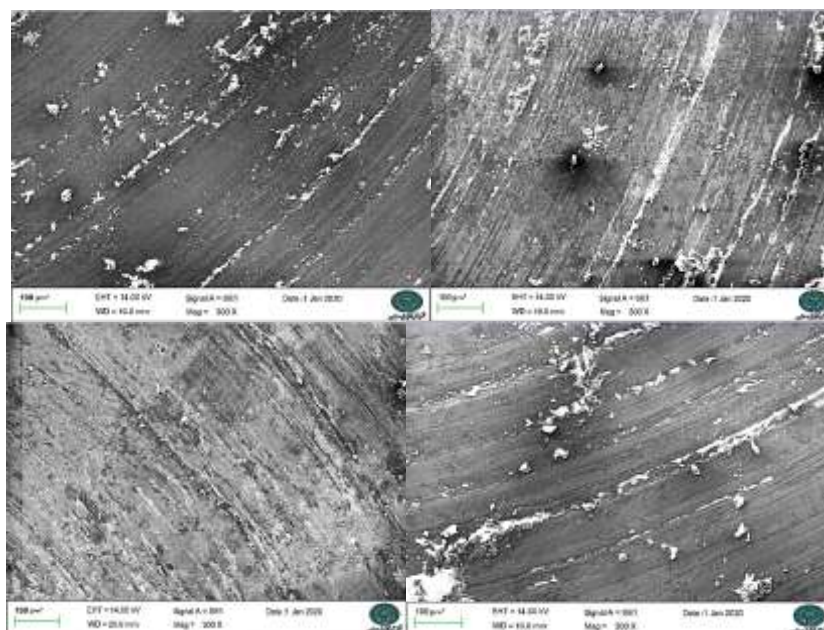
جدول ۴- اندازه کریستال ها از دیتاهای XRD

sample	Crystallite size
Raw	151 ± 13.2
45:80	75.1 ± 6.3
45:20	78.2 ± 8.5
30:80	31.2 ± 4.5
30:20	31.8 ± 3.2

با توجه به جدول ۴ می توان گفت، در تمامی زوایا و زمان های اجرای عملیات شات پینینگ، سایز کریستال ها کاهش بسیاری داشته است. اندازه کریستال ها در نمونه شات نشده، ۱۵۱ آنگستروم و در نمونه شات شده با زاویه ۳۰ درجه و زمان ۸۰ دقیقه ۳۱/۲ آنگستروم است که این مطلب نشان دهنده کاهش ۸۰ درصدی اندازه کریستال ها نسبت به نمونه شات نشده است. همچنین در نمونه های شات شده با زاویه ۳۰ درجه در هر دو زمان ۲۰ و ۸۰ دقیقه شاهد کاهش بیشتر اندازه کریستال ها نسبت به نمونه شات شده تحت زاویه ۴۵ درجه هستیم. دلیل کاهش در سایز کریستال ها، ریز شدن دانه ها و کرنش سختی در سطح نمونه ها است. در شکل ۱۴ ریز ساختار نمونه عملیات نشده و در شکل ۱۵ ریز ساختار نمونه های شات شده تحت زوایای ۳۰ و ۴۵ درجه و نیز زمان های ۲۰ و ۸۰ دقیقه ارائه شده است.



شکل ۱۱- ریز ساختار نمونه عملیات نشده



شکل ۱۲ ریز ساختار نمونه های شات شده تحت زوایای ۳۰ و ۴۵ درجه و نیز زمان های ۲۰ و ۸۰ دقیقه

بررسی و مقایسه اشکال ۱۱ و ۱۲ نشان دهنده ریز شدن شدید دانه ها در سطح نمونه های شات پینینگ شده نسبت به سطح شات پینینگ نشده است. همچنین با افزایش زمان شات پینینگ، لایه هایی که تحت کار سختی مکانیکی قرار گرفته اند، ضخامتشان افزایش یافته است. در نمونه شات شده تحت زاویه ۳۰ درجه با زمان ۸۰ دقیقه ریز شدن شدید دانه ها در سطح نمونه نسبت به نمونه های دیگر بیشتر و محسوس تر بوده است.

۶. نتیجه گیری

می توان به طور خلاصه نتایج زیر از پژوهش حاضر ارائه داد:

- ❖ در نمونه هایی که با زاویه ۳۰ درجه شات شده است در هر دو زمان ۲۰ و ۸۰ دقیقه، زبری سطح نسبت به نمونه هایی که تحت زاویه ۴۵ درجه شات شده است، کاهش یافته است. سطوح زبر، زودتر ساییده می شوند و ضریب اصطکاک بیشتری نسبت به سطوح صاف دارند. زبری یک از مولفه های مهم در تعیین عمر قطعات مکانیکی است، چرا که ناهمواری های سطح معمولاً محل ایجاد و شروع ترک و شکست قطعه هستند. از اینرو می توان دریافت عمر قطعات و مقاومت شکست و ترک در نمونه هایی که با زاویه ۳۰ درجه ساچمه پاشی شده است بیشتر از نمونه هایی است که با زاویه ۴۵ درجه ساچمه پاشی شده اند.
- ❖ در اثر عملیات شات پینینگ، پیک ها پهن شده اند و از شدت پراش قله ها کاسته شده است. دلیل این موضوع در ارتباط با ریز شدن دانه ها و میکرو کرنش ها است که بر اثر برخورد ساچمه های فولادی در سطح اتفاق افتاده است.

- ❖ در زاویه ساچمه زنی ۳۰ درجه در هر دو زمان ۸۰ و ۲۰ دقیقه، نسبت به زاویه ساچمه زنی ۴۵ درجه شاهد کاهش شدت پراش قله ها هستیم. که این امر نشان دهنده این مطلب است که اجرای عملیات شات پینینگ با زاویه ۳۰ درجه نتایج کاراتری را نسبت به زاویه ۴۵ درجه ارائه می دهد.
- ❖ در تمامی زوایا و زمان های اجرای عملیات شات پینینگ، سائز کریستال ها کاهش بسیاری داشته است.
- ❖ اندازه کریستال ها در نمونه شات نشده، ۱۵۱ آنگستروم و در نمونه شات شده با زاویه ۳۰ درجه و زمان ۸۰ دقیقه ۳۱/۲ آنگستروم است که این مطلب نشان دهنده کاهش ۸۰ درصدی اندازه کریستال ها نسبت به نمونه شات نشده است.
- ❖ در نمونه های شات شده با زاویه ۳۰ درجه در هر دو زمان ۲۰ و ۸۰ دقیقه شاهد کاهش بیشتر اندازه کریستال ها نسبت به نمونه شات شده تحت زاویه ۴۵ درجه هستیم. دلیل کاهش در سائز کریستال ها، ریز شدن دانه ها و کرنش سختی در سطح نمونه ها است.
- ❖ بررسی و مقایسه ریز ساختار نمونه ها نشان دهنده ریز شدن شدید دانه ها در سطح نمونه های شات پینینگ شده نسبت به سطح شات پینینگ نشده است. همچنین با افزایش زمان شات پینینگ، لایه هایی که تحت کار سختی مکانیکی قرار گرفته اند، ضخامتشان افزایش یافته است. در نمونه شات شده تحت زاویه ۳۰ درجه با زمان ۸۰ دقیقه ریز شدن شدید دانه ها در سطح نمونه نسبت به نمونه های دیگر بیشتر و محسوس تر بوده است.
- ❖ نمونه آلیاژ منیزیم AZ31 در زمانی که با زاویه ۳۰ درجه در زمان های ۲۰ و ۸۰ دقیقه ساچمه پاشی شده است ، کاهش وزن کمتری را نسبت به نمونه ای که با زاویه ۴۵ درجه ساچمه پاشی شده است، شاهد بوده است.
- ❖ افزایش زمان ساچمه پاشی در هر زاویه مورد بررسی، سبب شده است تا کاهش وزن نمونه ها در آزمایش سایش، کاهش یابد.
- ❖ کمترین میزان کاهش وزن نسبت به نمونه اولیه، در نمونه های آلیاژ منیزیم AZ31 مورد بررسی، مربوط به نمونه ای بوده است که با زاویه ۳۰ درجه و در زمان ۸۰ دقیقه ساچمه پاشی شده است.
- ❖ بیشترین میزان کاهش وزن نسبت به نمونه اولیه مربوط به نمونه ای بوده است که تحت زاویه ۴۵ درجه و در مدت ۲۰ دقیقه ساچمه پاشی شده است.
- ❖ ساچمه زنی با هر زاویه ای می تواند سختی نمونه های آلیاژ منیزیم AZ31 را افزایش دهد.
- ❖ افزایش زمان ساچمه پاشی سبب افزایش سختی نمونه ها شده است. ساچمه پاشی با زاویه ۳۰ درجه در هر دو زمان ۲۰ و ۸۰ دقیقه سبب افزایش سختی نمونه ها نسبت به ساچمه پاشی با زاویه ۴۵ درجه شده است.
- ❖ در نمونه ساچمه زنی شده با زاویه ۳۰ درجه و زمان ۸۰ دقیقه شاهد بیشترین افزایش سختی نمونه نسبت به نمونه خام به میزان ۷۵/۷۵ درصد هستیم . لذا به نظر می رسد بهترین زاویه ساچمه پاشی ۳۰ درجه باشد.

Υ. Kyriacou, S.1996. Shot-peening mechanics, a theoretical study. in 6th International Conference on Shot Peening (ICSP-6), San Francisco, CA, September.

۵. امانی قدیم، حمیدرضا و علیرضا اکبری، ۱۳۹۸، تاثیر ساچمه زنی بر مقاومت به سایش فولادهای زنگ نزن آستنیتی L304، هشتمین کنفرانس و نمایشگاه بین المللی مهندسی مواد و متالورژی و سیزدهمین همایش ملی مشترک انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن ریخته گری ایران، تهران، انجمن مهندسی، متالورژی و مواد ایران - انجمن ریخته گری ایران.

۶. بردبار جیرنده، یوسف؛ کمال جعفری و مهدی جهانی پور، ۱۳۹۷، بررسی تجربی اثر تغییر در سطح ساچمه زنی بر عملکرد نیروئی و طول عمر فنر خورشیدی کلاچ خودرو، اولین کنفرانس ملی تحقیقات بنیادین در مهندسی مکانیک، تهران، موسسه آموزش عالی تاکستان.

۷. اتقانی، میرمسعود و صادق معینی فر، ۱۳۹۷، تحلیل تنش های پسماند در فرایند ساچمه زنی آلایژ آلومینیوم A357، دومین کنگره بین المللی علوم و مهندسی، آلمان - دانشگاه هامبورگ، دبیرخانه دائمی کنفرانس.

[^] Zhai, C.; Gan, Y.; Hanaor, D.; Proust, G.; Retraint, D. (2016). "The Role of Surface Structure in Normal Contact Stiffness". *Experimental Mechanics*. 56 (3): 359–368.

⁹. Whitehouse, David (2012). Surfaces and their Measurement. Boston: Butterworth-Heinemann.

10. Geels, K., Fowler, D. B., Kopp, W. U., & Rückert, M. (2007). Metallographic and materialographic specimen preparation, light microscopy, image analysis, and hardness testing (Vol. 46). West Conshohocken: ASTM international.

11. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2011). Materials science and engineering (Vol. 5, pp. 344-348). 00: 0000 00000 0 0000.

12. Tabor, David (2000), *The Hardness of Metals*, Oxford University Press.

13. Chattopadhyay, R. (2001). Surface Wear - Analysis, Treatment, and Prevention. OH, USA: ASM-International.