



تحلیل عددی تأثیر شدت برخورد و ابعاد ساچمه در شات پینینگ بر بهبود عمر خستگی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳۵۱

آرمان گراوند^{۱*} محسن جباری^۲

^۱ کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

^۲ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

* آدرس پست الکترونیک: ageravand1376@gmail.com

چکیده

در این پژوهش، تأثیر فرایند شات پینینگ بر بهبود خواص مکانیکی و عمر خستگی آلیاژ آلومینیومی ۲۰۲۴-T۳۵۱ به روش عددی بررسی شده است. شات پینینگ به عنوان یک تکنیک سطحی، با ایجاد تنش‌های فشاری پسماند و تغییر در ساختار دانه‌بندی سطحی، مقاومت آلیاژها را در برابر خستگی، سایش و خوردگی افزایش می‌دهد. در این تحقیق، اثر پارامترهای اندازه و سرعت ساچمه بر تنش تسلیم، تنش نهایی، مدول الاستیسیته، و استحکام خستگی بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از ساچمه ۳۳۰S با سرعت ۶۵ متر بر ثانیه، بیشترین تنش پسماند فشاری و عمق نفوذ را ایجاد می‌کند و استحکام خستگی نمونه‌ها را تا ۳۰ درصد افزایش می‌دهد. همچنین، تأثیر اندازه ساچمه نسبت به سرعت آن بر بهبود خواص مکانیکی بیشتر است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که فرایند شات پینینگ، با تنظیم بهینه پارامترهای کاری، می‌تواند نقش مؤثری در ارتقاء عملکرد آلیاژهای آلومینیومی داشته باشد و کاربردهای گسترده‌ای در صنایع خودروسازی و هوافضا پیدا کند.

کلمات کلیدی: شات پینینگ، آلیاژ آلومینیومی ۲۰۲۴-T۳۵۱، تنش پسماند فشاری، عمر خستگی، اندازه ساچمه، سرعت ساچمه،

تحلیل عددی

۱- مقدمه

آلومینیوم، با عدد اتمی ۱۳ و ساختار کریستالی مکعبی مرکزدار، یکی از عناصر فلزی پرکاربرد در صنایع مختلف است. این فلز به دلیل ویژگی‌های برجسته‌ای همچون وزن مخصوص کم، مقاومت بالا در برابر خوردگی، قابلیت شکل‌پذیری عالی، هدایت حرارتی و الکتریکی مناسب، و بازیافت مقرون به صرفه جایگاه ویژه‌ای در صنعت دارد. آلومینیوم به دلیل میل ترکیبی شدید با اکسیژن، به سرعت لایه‌ای از اکسید پایدار روی سطح خود تشکیل می‌دهد که مقاومت به خوردگی آن را به شکل چشمگیری افزایش می‌دهد. در میان آلیاژهای مختلف آلومینیوم، سری ۷۰۰۰ به ویژه آلیاژ ۷۰۷۵، به دلیل خواص مکانیکی برجسته مانند نسبت استحکام به وزن بالا، استحکام عالی، و قابلیت انجام عملیات حرارتی برای افزایش استحکام، توجه گسترده‌ای در صنایع هوافضا، خودروسازی، و نظامی به خود جلب کرده است.

یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از آلیاژهای آلومینیوم، بهبود مقاومت آنها در برابر پدیده خستگی است. خستگی، یکی از مکانیزم‌های مهم تخریب در فلزات و قطعات صنعتی، زمانی رخ می‌دهد که قطعه تحت تنش‌های تکراری یا نوسانی قرار گیرد و منجر به ایجاد ترک و شکست ناگهانی شود. این پدیده به ویژه در قطعاتی مانند بال‌های هواپیما، بدنه فضاپیماها و تجهیزات مکانیکی که تحت بارگذاری‌های سیکلی قرار دارند، اهمیت ویژه‌ای دارد. تحقیقات نشان می‌دهد که بیش از ۹۰ درصد شکست‌های مکانیکی در حین کار ناشی از خستگی هستند.

یکی از روش‌های موثر برای بهبود عمر خستگی آلیاژهای فلزی، فرآیند شات پینینگ است. این روش با بمباران سطح قطعات با ساچمه‌های کوچک، تنش‌های پسماند فشاری در سطح ایجاد می‌کند که مقاومت قطعات در برابر ترک خوردگی و شکست ناشی از تنش‌های کششی را افزایش می‌دهد. پارامترهایی نظیر اندازه و سرعت ساچمه‌ها، زاویه برخورد، و فاصله نازل از سطح قطعه نقش مهمی در میزان و توزیع این تنش‌ها دارند. به کمک شبیه‌سازی عددی، امکان بهینه‌سازی این پارامترها برای افزایش کارایی فرآیند فراهم می‌شود.

تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که شات پینینگ علاوه بر بهبود مقاومت به خستگی، خواص مکانیکی دیگری نظیر مقاومت به خوردگی، تنش و سایش را نیز تقویت می‌کند. این ویژگی‌ها به ویژه در صنایع استراتژیکی نظیر هوافضا و نظامی، که ایمنی و کارایی قطعات حیاتی است، اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. در این راستا، تجزیه و تحلیل اثر پارامترهای فرآیند شات پینینگ، مانند شدت برخورد و ابعاد ساچمه‌ها، بر بهبود خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیومی از جمله سری ۷۰۷۵، موضوعی اساسی برای دستیابی به عملکرد بهینه در کاربردهای صنعتی است.

این مقاله با تمرکز بر آلیاژ آلومینیومی ۲۰۲۴-۳۵۱ و با استفاده از تحلیل عددی، به بررسی تأثیر پارامترهای شات پینینگ بر بهبود عمر خستگی پرداخته و نتایج را به منظور ارائه راهکارهای کاربردی برای افزایش بهره‌وری قطعات صنعتی مورد بحث قرار می‌دهد.

پژوهش‌های متعددی در زمینه بهبود رفتار خستگی و عملکرد مکانیکی آلیاژهای آلومینیومی با استفاده از فرآیندهای سطحی انجام شده است. این فرآیندها، از جمله شات پینینگ، با اعمال تنش‌های پسماند فشاری و افزایش سختی سطح، موجب بهبود مقاومت

خستگی، کاهش ترک‌های سطحی، و افزایش عمر کاری قطعات می‌شوند. خضری [۷] در مطالعه‌ای جامع، اثر فرآیند شات پینینگ را بر رفتار خوردگی خستگی آلیاژ آلومینیوم T67075 در محیط آب دریا بررسی کرده و نشان داده است که این فرآیند، با بهبود خواص مکانیکی سطح و کاهش سرعت رشد ترک، به‌طور چشمگیری عمر خوردگی خستگی را افزایش می‌دهد.

پوزش و آرزو [1] با استفاده از روش انرژی کرنش و مدل سخت‌شوندگی سینماتیکی، یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی توزیع تنش پسماند ناشی از ساچمه‌زنی توسعه داده و به‌طور تجربی تأیید کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که توزیع تنش پسماند سطحی و حداکثر تنش فشاری پسماند تفاوت قابل توجهی دارد و پروفایل تنش نزدیک به سطح نسبت به مدل‌های قبلی منحنی‌تر است. همچنین، آزمایش‌های خستگی بر روی فولاد ضدزنگ GTD-450 نشان داده‌اند که افزایش شدت ساچمه‌زنی می‌تواند با عمق بیشتر لایه پلاستیکی تغییر شکل یافته، عمر خستگی را بهبود بخشد.

یو و همکاران [2] تأثیر ساچمه‌زنی معمولی و چندگانه را بر ریزساختار و تنش پسماند آلیاژ تیتانیوم TC17 بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد که ساچمه‌زنی چندگانه باعث ایجاد لایه‌های نانوبلوری ضخیم‌تر و افزایش قابل توجه تنش‌های فشاری نسبت به ساچمه‌زنی معمولی شده است. همچنین، کاهش اندازه دانه‌ها و افزایش چگالی نابجایی‌ها در لایه تغییرشکل‌یافته مشاهده شد. حداکثر تنش فشاری پسماند در α -Ti و β -Ti به ترتیب برابر با 1079 و 792 مگاپاسکال بود. علاوه بر این، ساچمه‌زنی چندگانه باعث کاهش زبری سطح و افزایش نانوبلوری شدن سطح شده و منجر به تشکیل فاز FCC-Ti و اصلاح ساختار دانه‌ها گردید. یان و همکاران [۳] تأثیر پوشش ساچمه‌زنی بر خواص سطحی و رفتار سایشی فولادهای چرخ‌دنده محور سنگین را بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش پوشش ساچمه‌زنی می‌تواند تنش پسماند فشاری، سختی میکرو، و درصد مارتنزیت را بهبود داده و حجم سایشی و ضریب اصطکاک را کاهش دهد. همچنین، مکانیزم سایش از چسبنده به ساینده تغییر می‌کند. اوتا و ما [۴] با استفاده از روش کرنش ذاتی و تئوری خمیدگی صفحه، مدلی تحلیلی برای پیش‌بینی توزیع تنش پسماند ناشی از ساچمه‌زنی در صفحات آلیاژ آلومینیوم-منیزیم توسعه دادند. نتایج شبیه‌سازی‌های المان محدود غیرخطی و روش پراش اشعه ایکس نشان داد که این مدل قادر است توزیع تنش‌های پسماند را با دقت بالا پیش‌بینی کند. همچنین، توزیع کرنش ذاتی با استفاده از شبیه‌سازی‌ها و داده‌های تجربی تعیین و با یک رابطه ساده کمی‌سازی شد. این روش تحلیلی، امکان پیش‌بینی کارآمد تنش‌های پسماند در صفحات با ضخامت‌های مختلف و شرایط ساچمه‌زنی گوناگون را فراهم می‌کند.

شریفی و عابدین‌زاده [۵] در پژوهشی تأثیر زاویه ساچمه‌زنی بر خواص آلیاژ AZ31 منیزیم را بررسی کرده‌اند. عملیات ساچمه‌زنی با تغییر پارامترهایی مانند زمان و زاویه برخورد ساچمه انجام شد و نتایج آزمایش‌های سختی‌سنجی، زبری‌سنجی، و آنالیز پراش پرتو ایکس نشان داد که زاویه ساچمه‌زنی 30° درجه بهترین بهبود را در خواص سایشی و سختی آلیاژ ایجاد کرده است. این تحقیق نشان‌دهنده نقش مؤثر زاویه بهینه در بهبود مقاومت سایشی این آلیاژ است. زارعی و محمدی [۶] در پژوهشی به بررسی عددی توزیع کرنش پلاستیک معادل، تنش پسماند و عمق نفوذ ساچمه در فرآیند شات پینینگ آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ با درصد پوشش‌دهی متفاوت پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل سلول متقارن و شبیه‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS/Explicit نشان دادند که با افزایش درصد پوشش‌دهی، کرنش پلاستیک معادل به‌طور مؤثری افزایش می‌یابد و عمق نفوذ ساچمه و عمق مؤثر منطقه پلاستیک نیز به ترتیب به میزان 161% و 147% از درصد پوشش 100 تا 500 افزایش می‌یابد. در پژوهشی که توسط ایدوریا و

همکاران [۷] انجام شد، تأثیر شات پینینگ بر خواص تریبولوژیکی شفت‌های پمپ از جنس فولاد En-31 مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها با اعمال فشارهای مختلف (۲،۵، ۳، ۳،۵ و ۵ بار) و اندازه‌های ساچمه متفاوت (S230 و S110) تغییرات زبری سطح، سختی و رفتار سایشی را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که در فشار ۴ بار با ساچمه S230، سختی سطح ۱۲،۵٪ افزایش یافت، اما زبری سطح نیز بیش از ۷۵٪ افزایش داشت. همچنین، فرآیند شات پینینگ در فشار ۳،۵ بار بهبودهای قابل توجهی در خواص سطحی ایجاد کرد. در مطالعه‌ای که توسط اوهاتا و همکاران [۸] انجام شد، تأثیر شات پینینگ پنوماتیک با ساچمه‌های زیرکونیایی در چهار قطر مختلف بر آلیاژ آلومینیوم A5052 بررسی گردید. آن‌ها با استفاده از دوربین‌های سرعت بالا و تکنیک تصویربرداری ذرات، سرعت ساچمه‌ها را تحت فشارهای هوای متفاوت اندازه‌گیری کردند. سپس، توزیع تنش پسماند در عمق نمونه‌ها با روش پراش پرتو ایکس ارزیابی شد. نتایج نشان داد که با افزایش قطر و سرعت ساچمه‌ها، عمق و مقدار تنش پسماند فشاری افزایش می‌یابد. همچنین، معادله‌ای برای پیش‌بینی سریع و دقیق توزیع تنش پسماند بر اساس سرعت و قطر ساچمه‌ها ارائه شد که می‌تواند در کاربردهای صنعتی مفید باشد.

۲- روش تحلیل

برای انجام این پژوهش، از نرم‌افزار آباکوس جهت مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند شات پینینگ استفاده شد. هدف اصلی، بررسی تأثیر برخورد ساچمه‌های استاندارد (S230 و S330) بر آلیاژ آلومینیومی ۲۰۲۴-T۳۵۱ است. مدل هندسی اولیه شامل یک صفحه فلزی به ابعاد ۱*۲*۲ mm به عنوان ماده هدف، و ساچمه‌هایی با مشخصات استاندارد SAE J444 بوده که بر اساس شرایط صنعتی طراحی شده است. در مرحله تحلیل، نوع تحلیل به صورت Dynamic Implicit با گام زمانی $1e-3$ ثانیه و همچنین برای بررسی عمر خستگی، از تحلیل سکلیک استفاده گردید. این تحلیل شامل ۱۰۰۰۰ سیکل و زمان تحلیل ۱۰ ثانیه بوده و رفتار سیکلی صفحه تحت بارگذاری ناشی از برخورد ساچمه مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرحله باگذاری، شرایط مرزی به صورت زیر اعمال شد:

چهار طرف صفحه به طور کامل گیردار.

سرعت اولیه ساچمه‌ها با مقدار مشخص اعمال گردید.

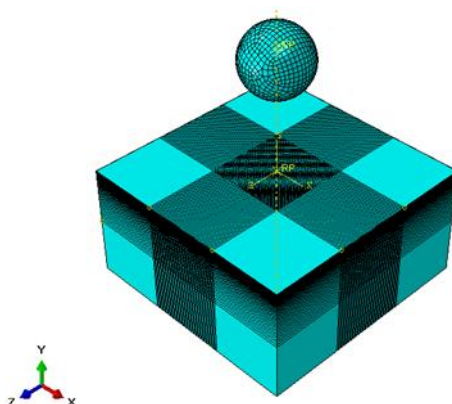
جهت شبیه‌سازی تحلیل خستگی، ابتدا یک ترک اولیه در مدل ایجاد شد. سپس، بارگذاری چرخشی مطابق با نتایج برخورد اولیه در تحلیل استفاده گردید.

جدول نمونه شماره (۱): مشخصات مدل ها

حالت	سرعت (متر بر ثانیه)	نوع ساچمه
A	50	S230
B	65	S230
C	50	S330
D	65	S330

تحلیل و ارزیابی نتایج شامل بررسی توزیع تنش و کرنش در سطح و زیرسطح نمونه، بررسی اثر اندازه و سرعت ساچمه بر توزیع تنش‌های پسماند، محاسبه عمق لایه سخت‌شده و عمر خستگی مدل تحت شرایط مختلف بوده است. این مراحل با استفاده از ابزارهای عددی نرم‌افزار آباکوس به‌منظور بهینه‌سازی و ارزیابی رفتار مکانیکی آلیاژ در شرایط فرآیند شات پینینگ انجام شد.

ماده زمینه به منظور مش بندی به چند قسمت تقسیم شده است و همان گونه که در شکل زیر مشاهده می شود ناحیه وسط ماده زمینه که برخورد در این ناحیه قرار است انجام شود به منظور دقت در نتایج مش ریزی مناسبی انجام گرفته است. برای مش بندی ماده زمینه از المان‌های هشت وجهی خطی C3D8R استفاده شده است. این المان‌های خطی به المان‌های غیر خطی ترجیح داده شده است زیرا المان‌های خطی بر خلاف المان‌های غیر خطی با کاهش مدت زمان تحلیل و افزایش دقت تحلیل بخصوص در مسائلی که تغییر شکل زیاد و سخت شوندگی وجود داشته باشد تحلیل دقیق تری را در مسائل سه بعدی ارائه می دهند. همچنین به منظور مش بندی ساچمه نیز از تکنیک Sweep و مش های Quad - Dominated استفاده شده است.



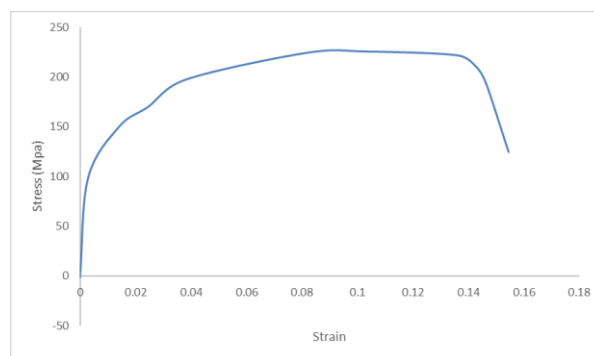
شکل شماره (۱): مش بندی مدل

۳- مشخصات ماده

در این مقاله، خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ که به دلیل وزن کم و استحکام بالا در صنایع کاربردی است، بررسی می‌شود. این آلیاژ به علت ایجاد ترک گرم در فرآیندهای جوشکاری ذوبی، جوش پذیری پایینی دارد. اخیراً با استفاده از نانوذرات TiC در فرآیند جوشکاری قوسی، امکان جوشکاری این آلیاژ بدون ایجاد ترک فراهم شده است. این روش باعث ایجاد ساختاری با ذرات ریز و فاز ثانویه مناسب شده و مقاومت آلیاژ را در برابر ترک گرم افزایش داده است.

جدول نمونه شماره (۲): خواص مکانیکی ماده آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴

استحکام کششی نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ازدیاد طول (%)	مدول الاستیک (GPa)	استحکام برشی (MPa)
۴۷۰	۳۲۵	۱۳	۷۱.۷	۲۸۵



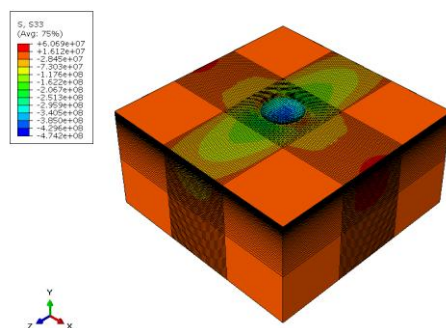
نمودار شماره (۱): تنش و کرنش آلومینیوم ۲۰۲۴

۴- ارزیابی نتایج عددی

۴-۱ تنش پسماند

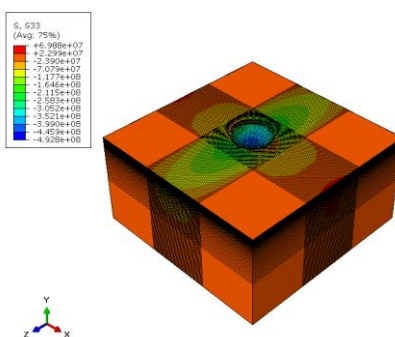
تنش پسماند در فرایند ساچمه‌زنی نتیجه تغییر شکل پلاستیک سطحی ماده تحت تأثیر برخورد ساچمه‌ها با سرعت بالا است. این تنش‌ها معمولاً به صورت فشاری در سطح ماده ایجاد می‌شوند که مقاومت در برابر ترک خوردگی و خستگی را افزایش می‌دهد. عوامل مؤثر بر تنش پسماند شامل سرعت و قطر ساچمه، جنس ساچمه و شرایط سطحی ماده هستند. افزایش سرعت یا قطر

ساچمه باعث افزایش انرژی جنبشی و در نتیجه عمق و شدت تغییر شکل پلاستیک می‌شود. این پارامترها باید بهینه‌سازی شوند تا خواص مکانیکی سطح بدون ایجاد آسیب به زیرلایه ماده بهبود یابند.



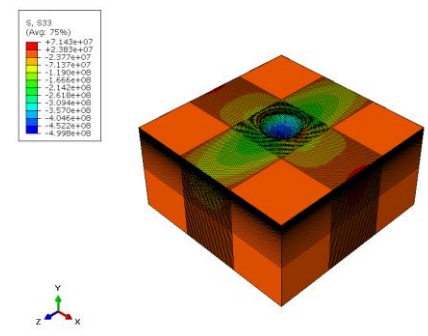
شکل شماره (۲): تنش پسماند حالت A ساچمه زنی

در شکل ۲، ساچمه‌ای با سرعت ۵۰ متر بر ثانیه و قطر ۰٫۶ میلی‌متر استفاده شده است که منجر به ایجاد تنش پسماندی برابر با ۶۰٫۶۹ مگاپاسکال شده است. در این حالت، سطح تماس کمتر ساچمه و انرژی جنبشی محدود، باعث ایجاد حداقل تنش پسماند در میان مدل‌های بررسی شده شده است.



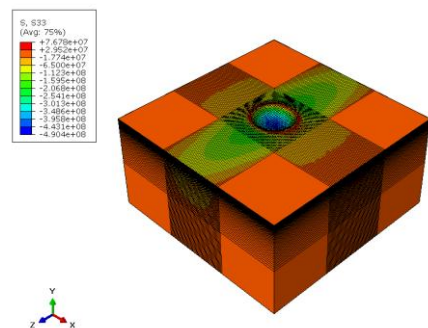
شکل شماره (۳): تنش پسماند حالت B ساچمه زنی

در شکل ۳، ساچمه S230 با سرعت برخورد ۶۵ متر بر ثانیه به کار گرفته شده و تنش پسماند برابر با ۶۹٫۸۸ مگاپاسکال حاصل شده است. افزایش سرعت باعث افزایش انرژی جنبشی ساچمه و در نتیجه افزایش میزان اثرگذاری آن بر سطح ماده شده و تنش پسماند بیشتری نسبت به حالت قبل ایجاد کرده است.



شکل شماره (۴) : تنش پسماند حالت C ساچمه زنی

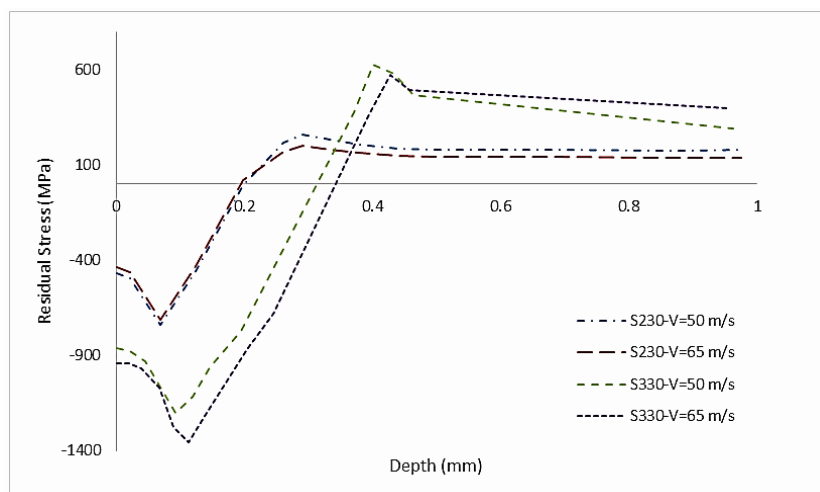
در شکل ۴، با افزایش قطر ساچمه به ۰,۸ میلی‌متر و حفظ سرعت ۵۰ متر بر ثانیه، تنش پسماند به ۷۱,۴۳ مگاپاسکال افزایش یافته است. قطر بزرگ‌تر باعث افزایش سطح تماس ساچمه و توزیع فشار بیشتر روی سطح ماده شده است که در نتیجه تنش پسماند بیشتری نسبت به حالت A ایجاد کرده است.



شکل شماره (۵) : تنش پسماند حالت D ساچمه زنی

در شکل ۵، ساچمه S330 با قطر بزرگ‌تر و سرعت ۶۵ متر بر ثانیه مورد استفاده قرار گرفته و تنش پسماند به ۷۶,۷۸ مگاپاسکال رسیده است. در این حالت، افزایش همزمان سرعت و قطر ساچمه باعث حداکثر انتقال انرژی و تغییر شکل پلاستیک ماده شده و بیشترین مقدار تنش پسماند در میان تمامی حالت‌ها ثبت شده است.

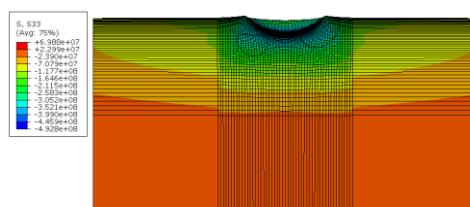
بررسی تنش‌های پسماند ایجادشده در چهار مدل ارائه‌شده نشان می‌دهد که افزایش سطح مقطع ساچمه به طور مستقیم باعث افزایش تنش‌های پسماند می‌شود. این افزایش ناشی از توزیع فشار بیشتر در ناحیه تماس و نفوذ عمیق‌تر انرژی ضربه به سطح ماده است. علاوه بر این، افزایش سرعت شات پینینگ منجر به افزایش انرژی جنبشی ساچمه‌ها شده و به تغییر شکل پلاستیک عمیق‌تر و در نتیجه تنش پسماند بالاتر می‌انجامد. به عنوان نمونه، در مدل چهارم که از ساچمه S330 با سرعت ۶۵ متر بر ثانیه استفاده شده است، مقدار تنش پسماند به ۷۶,۷۸ مگاپاسکال می‌رسد که بالاترین مقدار ثبت‌شده در میان تمامی مدل‌ها است و تأثیر ترکیبی سرعت و ابعاد ساچمه را به خوبی نشان می‌دهد.



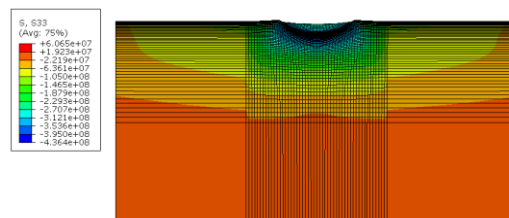
نمودار شماره (۲): مقایسه تنش پسماند فشاری بر عمق در چهار حالت ساچمه زنی

نمودار مقایسه تنش پسماند فشاری نشان می‌دهد که با افزایش سرعت و قطر ساچمه، تنش در سطح قطعه افزایش یافته و به عمق بیشتری نفوذ می‌کند. در مدل S230 با سرعت ۵۰ متر بر ثانیه، تنش فشاری از ۳۰۰ مگاپاسکال در سطح شروع شده و در عمق ۰,۰۸ میلی‌متر به ۵۰۰ مگاپاسکال می‌رسد، سپس کاهش یافته و در عمق ۰,۲۸ میلی‌متر به تنش کششی تبدیل می‌شود. در سرعت ۶۵ متر بر ثانیه، مقدار تنش فشاری به ۵۵۰ مگاپاسکال در عمق ۰,۱ میلی‌متر افزایش یافته و سپس روند مشابهی را طی می‌کند. در مدل‌های S330 با قطر بزرگ‌تر، تنش فشاری در سطح به ۷۰۰ مگاپاسکال می‌رسد و تا عمق بیشتری ادامه دارد. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه سرعت و قطر ساچمه بر شدت و عمق تنش پسماند است.

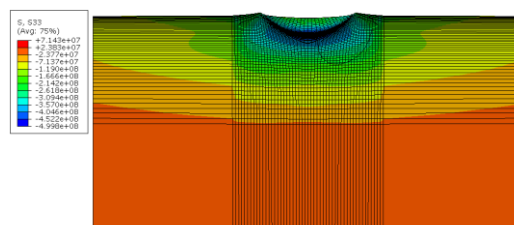
۴-۲ توزیع تنش پسماند (مولفه S33)



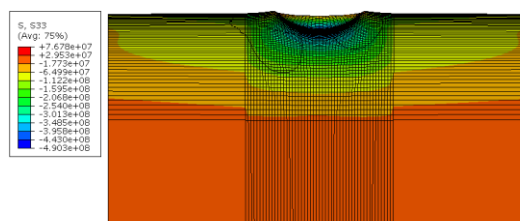
شکل شماره (۶): تنش S33 در راستای عمق قطعه در حالت A



شکل شماره (۷) : تنش s33 در راستای عمق قطعه در حالت B



شکل شماره (۸) : تنش s33 در راستای عمق قطعه در حالت C



شکل شماره (۹) : تنش s33 در راستای عمق قطعه در حالت D

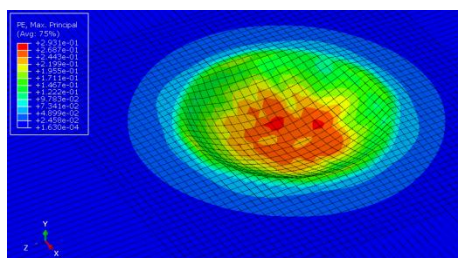
شکل های بالا توزیع تنش پسماند (مولفه S33) را در راستای عمق قطعه برای چهار حالت مختلف ساچمه زنی نشان می دهند. در حالت A، استفاده از ساچمه S230 با سرعت ۵۰ متر بر ثانیه، منجر به ایجاد تنش های پسماندی می شود که در عمق کمتری از قطعه متمرکز است. این امر نشان دهنده انرژی جنبشی کمتر ساچمه و نفوذ سطحی تر تنش است.

در حالت B، افزایش سرعت به ۶۵ متر بر ثانیه باعث عمق بیشتر تغییر شکل پلاستیک و افزایش تنش های پسماند در لایه های عمیق تر ماده می شود. کانتورهای این نمودار حاکی از تمرکز بیشتر تنش در لایه های زیرین است.

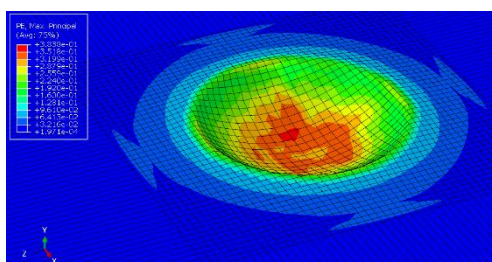
در حالت C، با افزایش قطر ساچمه به ۰٫۸ میلی متر، شدت و عمق تنش پسماند افزایش یافته است. این نشان دهنده تأثیر مستقیم سطح مقطع بزرگ تر ساچمه در افزایش توزیع فشار و ایجاد تغییر شکل پلاستیک در عمق بیشتر ماده است.

در حالت D، استفاده از ساچمه S330 و ترکیب آن با سرعت ۶۵ متر بر ثانیه، بیشترین مقدار و عمق تنش پسماند را ایجاد کرده است. کانتورهای این حالت حداکثر تأثیر فرآیند ساچمه‌زنی را در انتقال انرژی به لایه‌های عمیق‌تر ماده نشان می‌دهند. افزایش همزمان قطر و سرعت، کارایی این فرآیند را در بهبود خواص مکانیکی سطح به حداکثر رسانده است.

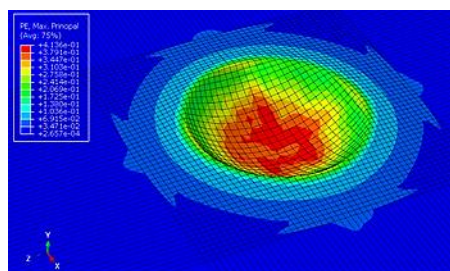
۳-۴ تغییر شکل پلاستیک



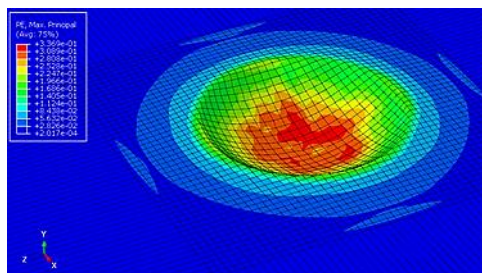
شکل شماره (۱۰): تغییر شکل پلاستیک در حالت A



شکل شماره (۱۱): تغییر شکل پلاستیک در حالت B

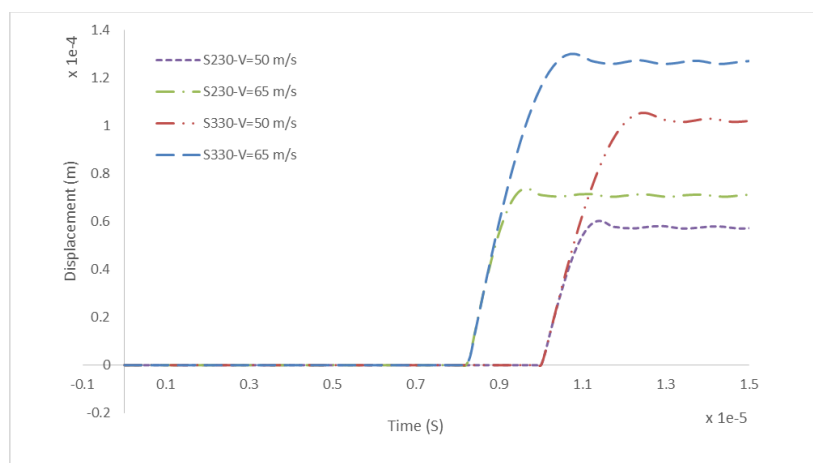


شکل شماره (۱۲): تغییر شکل پلاستیک در حالت C



شکل شماره (۱۳): تغییر شکل پلاستیک در حالت D

در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳، توزیع تغییر شکل پلاستیک ناشی از برخورد ساچمه در سطح ماده برای چهار حالت مختلف به نمایش درآمده است. در حالت A، با سرعت پایین‌تر و اندازه ساچمه کوچک‌تر، تغییر شکل پلاستیک محدود به یک ناحیه کوچک‌تر و سطحی‌تر است. در حالت B، با افزایش سرعت ساچمه، تغییر شکل پلاستیک گسترده‌تر و عمیق‌تر شده است که نشان‌دهنده انتقال انرژی بیشتر به سطح ماده است. در حالت C، افزایش قطر ساچمه باعث افزایش گستره تغییر شکل پلاستیک در ناحیه برخورد شده است، هرچند تأثیر سرعت همچنان محدود به سطح نواحی می‌باشد. در حالت D، ترکیب سرعت بالا و قطر بزرگ ساچمه بیشترین تأثیر را بر عمق و وسعت تغییر شکل پلاستیک داشته و تغییرات به نواحی عمیق‌تر و وسیع‌تر گسترش یافته است. این تغییرات نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه ابعاد و سرعت در فرآیندهای مکانیکی سطحی هستند.

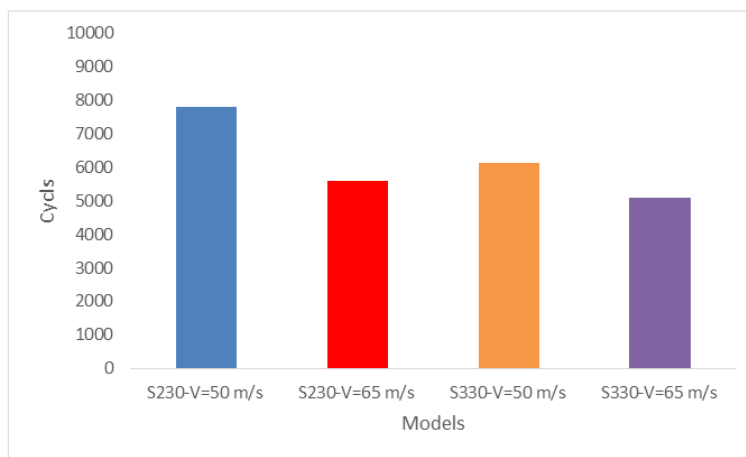


نمودار شماره (۳): جابه جایی در زمان

۴-۴ میزان جابه جایی و فرورفتگی

نمودار نشان‌دهنده میزان جابه جایی و فرورفتگی نمونه‌ها در زمان تحلیل است. در مدل‌های با سرعت ۶۵ متر بر ثانیه، فرورفتگی زودتر (حدود ۰,۸ میکروثانیه) رخ می‌دهد، در حالی که در مدل‌های با سرعت ۵۰ متر بر ثانیه این اتفاق در ۱ میکروثانیه ثبت شده

است. ساچمه S330 به دلیل سطح مقطع بزرگ‌تر و وزن بیشتر، نفوذ عمیق‌تری را ایجاد کرده است. همچنین، استحکام خستگی در نمونه‌هایی با شدت برخورد ۵۰ متر بر ثانیه و ساچمه S330 حدود ۲۸ درصد نسبت به S230 بهبود یافته و این مقدار در سرعت ۶۵ متر بر ثانیه به حدود ۳۰ درصد می‌رسد. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر سرعت و ابعاد ساچمه بر عملکرد مکانیکی نمونه‌ها است.



نمودار شماره (۴): نمودار تنش - عمر نمونه های مورد تحلیل

نمودار نشان‌دهنده تأثیر فرآیند ساچمه‌زنی بر استحکام خستگی نمونه‌ها است. در شدت برخورد ۵۰ متر بر ثانیه، ساچمه S330 باعث افزایش ۲۸ درصدی عمر خستگی نسبت به ساچمه S230 شده است. در شدت برخورد ۶۵ متر بر ثانیه، این افزایش به ۳۰ درصد می‌رسد. بهبود مشاهده‌شده در مدل S330 ناشی از سطح مقطع بزرگ‌تر و انرژی جنبشی بیشتر است که تغییرات ساختاری مطلوب‌تری در سطح نمونه ایجاد کرده و مقاومت خستگی آن را افزایش داده است. این نتایج تأثیر مثبت پارامترهای ساچمه‌زنی بر بهبود عمر نمونه‌ها را به وضوح نشان می‌دهد.

در این جدول، افزایش سرعت و قطر ساچمه به‌طور مستقیم منجر به افزایش شدت و عمق تنش پسماند و تغییر شکل پلاستیک شده است. این اطلاعات به وضوح نشان می‌دهد که ترکیب قطر بزرگ‌تر و سرعت بالاتر کارایی فرآیند را در بهبود خواص مکانیکی سطح به حداکثر می‌رساند.

جدول نمونه شماره (۳): نتیجه‌گیری از فرآیند شات پینینگ

تغییر شکل پلاستیک	عمق تنش پسماند (میلی‌متر)	تنش پسماند (MPa)	نوع ساچمه	سرعت (متر بر ثانیه)	حالت
محدود به سطح	کم	60.69	S230	50	A
گسترده‌تر و عمیق‌تر	متوسط	69.88	S230	65	B
گسترده‌تر در ناحیه برخورد	زیاد	71.43	S330	50	C
عمیق‌ترین و وسیع‌ترین	بیشینه	76.78	S330	65	D

۵- نتیجه‌گیری

۱- خواص آلومینیوم مورد استفاده در پژوهش حاضر با انجام فرایند ساچمه زنی بهبود می‌یابد. در واقع با انجام ساچمه زنی تنش تسلیم و تنش نهایی ماده و همچنین مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار افزایش تنش تسلیم، تنش نهایی و مدول الاستیسیته به ازای ساچمه زنی با ساچمه S330 و سرعت پرتاب ۶۵ متر بر ثانیه بدست می‌آید.

۲- افزایش اندازه ساچمه‌ها و افزایش سرعت پرتاب ساچمه‌ها تاثیر مطلوبی بر روی قطعه دارد. به گونه‌ای که تاثیر افزایش اندازه ساچمه‌ها نسبت به افزایش سرعت ساچمه‌ها بر روی خواص مکانیکی بیشتر است و با افزایش اندازه ساچمه استحکام ماده افزایش بیشتری نسبت به افزایش سرعت پرتاب ساچمه‌ها دارد.

۳- مقدار تنش پسماند فشاری سطح، بیشینه تنش پسماند فشاری و عمق نفوذ تنش پسماند ناشی از فرایند ساچمه زنی که میزان اثر گذاری فرایند ساچمه زنی را مشخص می‌کند، با افزایش اندازه و سرعت ساچمه افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار تنش پسماند سطح و بیشینه تنش پسماند فشاری به ازای ساچمه S330 با سرعت ۶۵ متر بر ثانیه بدست می‌آید. تاثیر اندازه ساچمه نسبت به سرعت پرتاب ساچمه‌ها در بیشینه مقدار تنش پسماند و تنش پسماند سطح و عمق نفوذ ساچمه بیشتر است.

۴- استحکام خستگی نمونه‌ها با افزایش اندازه و سرعت پرتاب ساچمه افزایش می‌یابد و بیشترین افزایش استحکام خستگی به ازای ساچمه S330 و سرعت ۶۵ متر بر ثانیه به اندازه ۳۰٪ درصد بدست می‌آید.

۵- کمترین اثر خستگی در مدل S330 با سرعت ۶۵ متر بر ثانیه میباشد و استحکام خستگی بین دو مدل C,D برابر حدوداً ۲۳٪ میباشد، در مدل S230 اختلاف بین B,A حدوداً ۲۰٪ میباشد در نتیجه با افزایش سطح مقطع ساچمه میزان استحکام خستگی افزایش می‌یابد.

مراجع

1. Poozesh, A., & Arezoo, B. (2024). An analytical model for predicting residual stress in shot peening with strain energy method. *Scientific Reports*, 14, 19826. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-19826-4>
2. Yu, W., Xing, S., Zhu, W., Yin, A., Li, W., Jiang, C., & Ji, V. (2024). Effect of the conventional shot peening and multiple shot peening on microstructure and residual stress of TC17 titanium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 456, 131284. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131284>
3. Yan, H., Zhu, P., Chen, Z., Zhang, H., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2021). Effect of shot peening on the surface properties and wear behavior of heavy-duty-axle gear steels. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.126>
4. Ohta, T., & Ma, N. (2024). Analytical prediction of shot peening residual stress distribution using inherent strain in aluminum–magnesium alloy plates under various peening conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 130, 3065–3079. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11970-y>
۵. شریفی، سید نبی‌الدین و عابدین‌زاده، رضا. «ارائه زاویه ساچمه‌زنی بهینه در عملیات شات پینینگ آلیاژ منیزیم AZ۳۱». نشریه پژوهش‌های معاصر در علوم و تحقیقات، دوره ۲، شماره ۲۰، اسفند ۱۳۹۹.
۶. زارعی، رامین و محمدی، بیژن. «بررسی عددی توزیع کرنش پلاستیک معادل، تنش پسماند و عمق نفوذ ساچمه در فرآیند شات پینینگ آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ با درصد پوشش‌دهی متفاوت بر مبنای مدل سلول متقارن»، پنجمین کنگره بین‌المللی مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، ۱۳۹۹.
7. Iyyadurai, J., Singh, R. P., Arockiasamy, F. S., Mohanavel, V., Kannan, S., Giri, J., & Alarfaj, A. A. (2024). Enhancing tribological properties of pump shafts through shot peening: a study of surface roughness, hardness and performance comparison with heat treatment. *Materials Research Express*, 11(10), 106503.

8. Ohta, T., He, J., Takahashi, S., & Ma, N. (2024). Measurement and Identified Prediction Equation for Residual Stress Distribution in Aluminum Alloy A5052 under Various Pneumatic Shot Peening Conditions. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33, 693–705.
9. Gan, J., Yang, B., Zhang, J., Liu, H., Wu, W., Wang, Z., & Jiang, C. (2024). Effect of stress shot peening on the microstructure and residual stress of Al18B4O33 whisker reinforced aluminum matrix composite. *Surface and Coatings Technology*, 430, 130546.
10. Yu, W., Xing, S., Zhu, W., Yin, A., Li, W., Jiang, C., & Ji, V. (2024). Effect of the conventional shot peening and multiple shot peening on microstructure and residual stress of TC17 titanium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 430, 131284.
11. Ohta, T., & Ma, N. (2024). Analytical prediction of shot peening residual stress distribution using inherent strain in aluminum–magnesium alloy plates under various peening conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 130, 3065–3079.