

# بررسی تجربی و عددی تأثیر فرایند ساچمه‌زنی شدید بر افزایش عمر خستگی آلومینیوم A۳۵۶

امیرحسین محمودی\* (دانشیار)

مجید نیکنام (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

غلامحسین فرهی (استاد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

علی قاسمی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

رحمن سیفی (دانشیار)

دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

مهندسی مکانیک شریف، پاییز ۱۳۹۶  
دوری ۲ - ۳، شماره ۲، ص. ۱۳۳-۱۴۰

بسیاری از قطعات مکانیکی در عمل تحت بارگذاری خستگی قرار دارند و بسیاری از شکست‌ها و ازکار افتادگی‌های مکانیکی نیز بر اثر این نوع بارگذاری است. زمانی که یک چرخه‌ی بارگذاری خاص در دوره‌های زمانی متوالی تکرار می‌شود پدیده‌ی خستگی و عمر خستگی مطرح می‌شود. این پدیده به شکست قطعات در تنشی کمتر از تنش تسلیم ماده منجر می‌شود. امروزه، برای افزایش عمر خستگی روش‌های بسیاری پیشنهاد شده است. بسیاری از این روش‌ها با ایجاد سازوکار تولید تنش پسماند فشاری عمر خستگی نمونه را افزایش می‌دهند. تنش پسماند فشاری در سطح نمونه باعث بستن ریزترک‌ها، به تأخیر انداختن ایجاد ترک، و کاهش نرخ رشد ترک می‌شود. فرایند ساچمه‌زنی یکی از رایج‌ترین عملیات سطحی به منظور ایجاد تنش پسماند فشاری و در نتیجه افزایش عمر خستگی قطعات فلزی است. در این نوشتار، اثر فرایند ساچمه‌زنی به صورت تجربی و عددی روی آلومینیوم آلیاژی AISI۷۰۷۳ یا A۳۵۶، بررسی شده است. این آلیاژ در مواردی کاربرد دارد که استحکام بالا، جوش‌پذیری خوب، قابلیت ریخته‌گری بالا به خصوص در قالب‌های دقیق و دائمی، و مقاومت زیاد به خوردگی نیاز است. صنعت خودروسازی، صنایع نظامی، و صنایع هوافضا بزرگترین مصرف‌کنندگان این نوع آلیاژ به شمار می‌آیند. در این پژوهش، عمر رشد ترک خستگی و منحنی‌های S-N برای نمونه‌های ساچمه‌زنی شده و نشده به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شده است. تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که در خستگی پرچرخه، عمر نمونه‌های ساچمه‌زنی شده تا سه برابر نسبت به نمونه‌های خام افزایش یافته است. در حالی که، در خستگی کم‌چرخه میزان این تأثیر بسیار کم‌تر بوده است.

a.h.mahmoudi@gmail.com  
majidniknam68@yahoo.com  
farrahi@sharif.edu  
alighasemi\_me@yahoo.com  
rahmanseifi@yahoo.com

واژگان کلیدی: افزایش عمر، خستگی، تنش پسماند، ساچمه‌زنی، آلومینیوم.

## ۱. مقدمه

یک فرایند تغییرشکل سرد است که در آن ساچمه‌های کروی کوچک از جنس فولاد یا چدن با سرعت زیاد به سطح قطعه برخورد می‌کند. بر اثر برخورد این ساچمه‌ها با سطح نمونه لایه‌های نزدیک سطح تغییر شکل خمیری و لایه‌های زیرین تغییر شکل کشسانی می‌دهند. پس از جدایش ساچمه‌ها از سطح نمونه، لایه‌های کشسانی برای رسیدن به کرنش صفر و شرایط اولیه به لایه‌های خمیری فشار می‌آورند و در نتیجه تنش پسماند فشاری در لایه‌های نزدیک سطح حاصل می‌شود. میزان این تنش‌های پسماند می‌تواند در حدود تنش تسلیم ماده باشد. برای حفظ تعادل نیرویی، تنش‌های

محققان از زمان‌های دور پی‌برده‌اند که کارسختی موجب ایجاد استحکام و سختی بیشتر در فزات می‌شود و از این خاصیت برای تولید شمشیر، زره، و ابزار استفاده می‌کردند. برای افزایش سختی لوله‌های تنگ آن را در معرض ضربه قرار می‌دهند. فرایند ساچمه‌زنی در اواخر قرن ۲۰ و اوایل قرن ۲۱ توسعه یافته است. ساچمه‌زنی

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۵/۷/۲۴، پذیرش ۱۳۹۵/۸/۸.

که در آن  $a_f$  طول نهایی ترک،  $K_{Ic}$  چقرمگی شکست یا ضریب شدت تنش بحرانی در حالت کرنش صفحه‌یی، و  $\sigma_{max}$  بیشینه‌ی تنش محوری اعمالی به نمونه است.<sup>[۵]</sup> در زمینه‌ی شبیه‌سازی فرایند ساچمه‌زنی تا کنون کارهای زیادی صورت گرفته است. از جمله کیم و همکاران، مدلی برای ساچمه‌ها با موقعیت منظم را که هم به‌صورت عمودی و هم زاویه‌دار نسبت به صفحه هدف برخورد می‌کند گسترش دادند و تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج اندازه‌گیری آزمایشگاهی پراش اشعه - ایکس به‌دست آوردند. آن‌ها برای استخراج نتایج تنش پسماند مدل اجزای محدود از میانگین تنش پسماند ناحیه‌ی برخورد ناشی از برخوردهای متوالی در هر عمق استفاده کردند و بر این اساس تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی پراش اشعه - ایکس به‌دست آوردند.<sup>[۷]</sup>

در پژوهش دیگری باقری‌فرد و همکاران<sup>[۸]</sup> در بررسی تأثیر ساچمه‌زنی شدید روی رفتار خستگی نشان داده‌اند زمانی که برخی پارامترهای ساچمه‌زنی از جمله سرعت و زمان تغییر می‌کنند یک لایه‌ی نانوکریستال روی سطح قطعه ایجاد می‌شود و همچنین مقادیر تنش پسماند و عمق نفوذ آن به نسبت ساچمه‌زنی معمولی زیاد می‌شود، همچنین پایداری حرارتی قطعه‌ی آناو شده بالاتر از ساچمه‌زنی معمولی است.

قلیچی و همکاران<sup>[۹]</sup> برای ویژگی‌های آلومینیوم ساچمه‌زنی شدید شده بر اساس پارامترهای پینینگ<sup>۱</sup> یک مدل عددی پیشنهاد داده‌اند که این مدل کمک شایانی در پیش‌بینی ویژگی‌های سطح نانو ساختار شده، از طریق ساچمه‌زنی شدید به‌کمک دمش هوا، می‌کند و هم‌خوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و باعث می‌شود تا آزمایش‌های پیش رو برای بررسی خواص آلومینیوم ریزساختار هدفمندتر شوند.

گنگرچ و همکاران حسینی<sup>[۱۰]</sup> برای بررسی میزان پوشش سطح، یک مدل سه‌بعدی از فرایند ساچمه‌زنی با برخوردهای تصادفی ارائه کردند. در این مدل چند اندازه‌ی مختلف ناحیه‌ی هدف برای مشخص شدن کوچکترین اندازه‌ی ناحیه‌ی هدف که میزان پوشش آن تا حد امکان به فرمول تجربی آورامی<sup>۲</sup> نزدیک باشد، مدل‌سازی شده است. میزان پوشش در گره‌های سطح پس از هر برخورد تا رسیدن به پوشش کامل ارزیابی شده است. آن‌ها نشان دادند موقعی که شعاع ناحیه‌ی هدف  $10^\circ$  برابر بزرگ‌تر از شعاع فرورفتگی تک‌برخورد باشد تطابق خوبی میان نتایج شبیه‌سازی و معادله‌ی آورامی ایجاد می‌شود.

در این پژوهش بررسی اثر ساچمه‌زنی بر روی عمر خستگی قطعات به‌صورت تجربی و عددی انجام شده است. عمر خستگی نمونه‌های ساخته‌شده از آلومینیم آلیاژی  $Al_{7056}$  تحت چندین حالت مختلف بارگذاری با استفاده از آزمایش خستگی محوری به‌دست آمده است. علاوه بر این، فرایند ساچمه‌زنی و فرایند خستگی در نرم‌افزار اجزای محدود شبیه‌سازی شده است. تطابق بسیار خوبی میان نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده شده است.

## ۲. آزمایش‌ها

نمونه‌ها از آلومینیم آلیاژی  $Al_{7056}$  ساخته شده است. این نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی T6 به‌منظور بهبود خواص قرار گرفتند. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۸ ساعت در دمای  $535^\circ$  درجه سانتیگراد قرار داده شدند. سپس، تحت عملیات کونچینگ<sup>۳</sup> در آب و در انتها به مدت ۵ ساعت در  $155^\circ$  درجه سانتیگراد قرار گرفتند.<sup>[۱۱]</sup> نمونه برای انجام آزمایش کشش لازم است که ابعاد نمونه‌های آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM-EAM ساخته شده است.<sup>[۱۲]</sup> در شکل ۱ نمونه‌ی ساخته‌شده

کششی در عمق ایجاد می‌شود تا اثر تنش‌های پسماند فشاری در نزدیکی سطح را خنثی کند. در قطعاتی با ضخامت کمتر، تنش‌های کششی ایجاد شده بیشتر خواهد بود. این تنش پسماند فشاری می‌تواند باعث به تأخیر افتادن رشد ترک یا کاهش نرخ رشد آن در قطعات شود. مقدار و عمق این تنش‌ها مهم‌ترین عامل در بهبود عملکرد قطعات و افزایش عمر خستگی آن‌هاست.<sup>[۱]</sup>

خستگی به نوعی از رفتار مواد، تحت کرنش یا تنش چرخه‌یی گفته می‌شود که با رفتار آن تحت بارگذاری تک‌جهته متفاوت است. خستگی عبارت است از فرایندی که در آن یک نقطه یا نواحی از مواد تحت تنش و کرنش نوسانی قرار بگیرد و با ایجاد ترک به حداکثر مقدار خود برسد و بعد از تعداد مشخصی چرخه منجر به شکستن قطعه شود. در بعضی از مواقع شکست اجزای مکانیکی در اثر خستگی، فرایندی است ناگهانی که قبل از شکست هیچ تغییری در کارکرد قطعه مشاهده نمی‌شود و در بسیاری از موارد وقوع آن بسیار خطرناک و پرهزینه است.<sup>[۲]</sup> به عبارت دیگر، این فرایند شامل به‌هم پیوستن ریزترک‌ها و تشکیل ترک‌های بزرگ‌تر است که به شکستن غیر قابل پیش‌بینی قطعه منجر می‌شود. بررسی سازوکارهای ایجاد ترک و سازوکارهای متفاوت رشد سریع یا در حد بحرانی ترک و رشد آرام و پایین‌تر از رشد بحرانی اهمیت ویژه‌ی در صنعت دارد. عمر خستگی شامل مجموع عمر جوانه‌زنی و رشد ترک خستگی است.<sup>[۳]</sup>

روش‌های مختلفی برای تخمین عمر خستگی قطعات مکانیکی وجود دارد که عبارت‌اند از: روش‌های تنش پایه، روش‌های کرنش پایه، و روش‌های مکانیک شکست. در روش مکانیک شکست، شکست خستگی خود را به‌صورت یک ترک رشد کرده نشان می‌دهد. در هر چرخه‌ی بارگذاری ترک کمی رشد می‌کند. بنابراین، با پدید آمدن روشی برای تعیین میزان رشد ترک در هر چرخه می‌توان عمر کل رشد ترک خستگی را تخمین زد. به‌طور کلی، فرایند خستگی را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد: ۱. جوانه‌زنی ترک، ۲. رشد ترک، ۳. شکست ترد. در ابتدای شروع بارگذاری چون ترکی وجود ندارد قسمتی از عمر ماده صرف جوانه‌زنی ترک می‌شود. بعد از به‌وجود آمدن ترک، مرحله‌ی رشد ترک شروع می‌شود. عمر گذار بین این دو مرحله کاملاً روشن نیست. بعد از رشد ترک به اندازه‌ی مشخص، ماده به اندازه‌ی ضعیف می‌شود که دیگر توانایی تحمل بار وارده را ندارد و به‌صورت ناگهانی می‌شکند، این مرحله به شکست ترد مشهور است. بر اساس رابطه‌ی پاریس زمانی که ضریب شدت تنش معادل  $K$  به یک مقدار آستانه برسد ترک شروع به رشد می‌کند و این رشد ادامه می‌یابد تا وقتی که مقدار ضریب شدت تنش برابر با ضریب شدت تنش بحرانی ( $K_{Ic}$ ) یا چقرمگی شکست شود و در قطعه شکست اتفاق بیافتد. رابطه‌ی پاریس به‌صورت رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:<sup>[۴]</sup>

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad (1)$$

که در آن  $a$  طول ترک،  $N$  عمر خستگی،  $\frac{da}{dN}$  نرخ رشد ترک،  $\Delta K$  دامنه‌ی شدت تنش،  $A$  و  $m$  ثابت‌های مربوط به جنس ماده هستند. بعد از تعیین ثابت‌های این معادله به‌وسیله‌ی نمونه‌ی استاندارد می‌توان عمر لازم برای رشد ترک برای هر اندازه‌ی مشخص را در شرایط مختلف بارگذاری و هندسه‌های پیچیده تعیین کرد. با استفاده از روش‌های مختلف در طول ترک‌های متفاوت بازه‌ی ضریب شدت تنش تعیین می‌شود. با انتگرال‌گیری از رابطه‌ی ۱ در بازه‌ی طول ترک اولیه  $a_i$  تا مقدار نهایی ترک  $a_f$  عمر نمونه برای رشد ترک محاسبه می‌شود.  $a_f$  از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$a_f = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_{max}} \right)^2 a_i \quad (2)$$



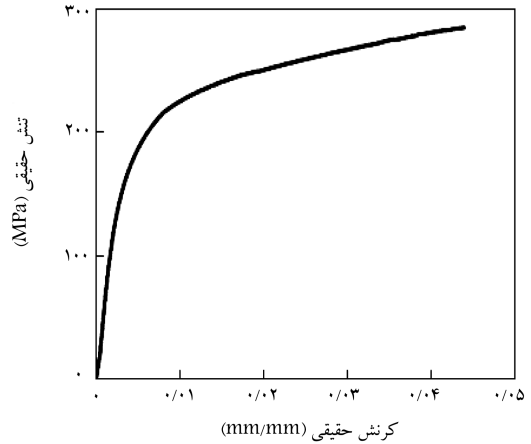
شکل ۴. نمایی از نمونه و دستگاه کشش - فشار.

جدول ۱. نتایج به دست آمده از آزمون خستگی.

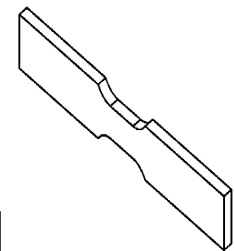
ساقچه زنی شده		ساده		تنش (MPa)
تکرار	عمر	تکرار	عمر	
۴۱۵۲	۳۸۲۲		۴۵۵۰	۲۱۰
	۱۴۴۵۸	۱۴۵۸۶	۱۲۸۹۵	۱۸۰
	۳۰۶۳۵۰۸		۸۷۹۶۸۵	۱۲۰



شکل ۱. نمونه‌ی آزمایش کشش.



شکل ۲. نمودار تنش - کرنش حقیقی.



شکل ۳. ابعاد نمونه‌های آزمایش خستگی بر حسب mm. [۱۳]

(۵۲۳۰) انجام شد. شدت آلمن معیاری برای بیان میزان شدت کوبش ساچمه‌هاست. آزمایش‌های خستگی با استفاده از دستگاه آزمایش کشش - فشار اینسترون<sup>۶</sup> با ظرفیت ۳۰ تن انجام شده است. شکل ۴ نمونه و فک‌های دستگاه را نشان می‌دهد. آزمایش‌ها با سه مقدار مختلف تنش انجام شد. مقدار این تنش‌ها با توجه به نتایج حاصل از آزمایش کشش ساده به نحوی انتخاب شد که سه عمر کم، متوسط، و بالا را پوشش دهد. مقادیر این تنش‌ها به ترتیب برابر با ۲۱۰ و ۱۸۰ و ۱۲۰ مگاپاسکال است. به دلیل ضخامت نسبتاً کم نمونه و جلوگیری از پدیده‌ی کماتش از اعمال تنش فشاری به نمونه صرف نظر شد. به عبارت دیگر، آزمایش‌ها در  $R = 0$  انجام شد.

نتایج حاصل از آزمون خستگی در جدول ۱ ارائه شده که ۲ قطعه نیز برای تکرارپذیری آزمایش انجام شده است. همچنین، در شکل ۵ تنش بر حسب عمر برای نمونه‌های ساچمه‌زنی‌شده و ساده نشان داده شده است.

### ۳. تحلیل المان محدود

فرایند ساچمه‌زنی و رشد ترک خستگی در نرم‌افزار ABAQUS ۶.۱۰.۱ شبیه‌سازی شده است. پارامتری که از این شبیه‌سازی‌ها استخراج می‌شود فاکتور شدت تنش بر حسب طول‌های مختلف ترک است. سپس، عمر رشد ترک خستگی با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود.

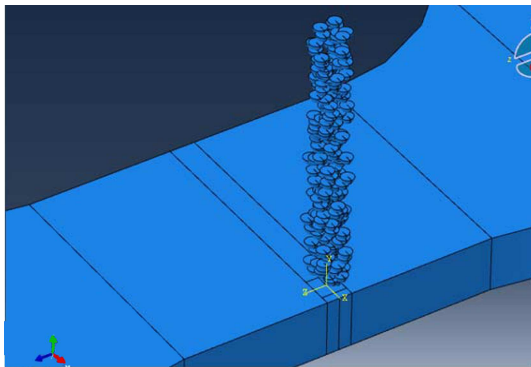
#### ۱.۳. شبیه‌سازی فرایند ساچمه‌زنی

شبیه‌سازی چندبرخوردی تصادفی به منظور ایجاد شرایط واقعی در مدل‌سازی ایجاد شد. در سال‌های اخیر برخی از محققان از این روش برای بررسی و ارزیابی پارامترهای

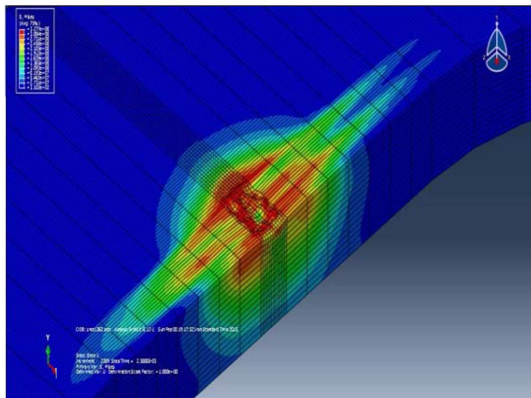
برای آزمایش کشش نشان داده شده است. آزمایش کشش با استفاده از دستگاه سنتام<sup>۴</sup> (مدل STM۴۰۰) انجام شد. در شکل ۲ نمودار تنش - کرنش حقیقی که از تبدیل داده‌های تنش - کرنش مهندسی حاصل از آزمایش کشش به دست آمده، نشان داده شده است. بر این اساس، خواص مکانیکی عبارت‌است از: تنش تسلیم ۱۸۵ MPa، تنش نهایی ۲۶۵ MPa، مدول الاستیک ۷۱ GPa، ضریب پواسون ۰٫۳۳ و چگالی  $۰٫۲۳۰۰ \text{ kg/m}^3$ .

نمونه‌های آزمایش خستگی بر اساس استاندارد E۴۶۶ ساخته شده است. [۱۴] بر اساس این استاندارد نمونه‌ها را می‌توان به دو صورت استوانه‌یی و تخت ساخت. از آنجایی‌که عملیات ساچمه‌زنی بر روی نمونه‌های تخت با دقت بیشتری انجام می‌شود، نمونه‌های آزمایش خستگی نیز از نوع تخت ساخته شد. ابعاد نمونه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

عملیات ساچمه‌زنی بر روی ۴ عدد از نمونه‌های ساخته‌شده با شدت ۱۸A بر اساس شدت آلمن<sup>۵</sup>، پوشش ۵۰ درصد، و با ساچمه‌هایی به قطر ۰٫۶ mm

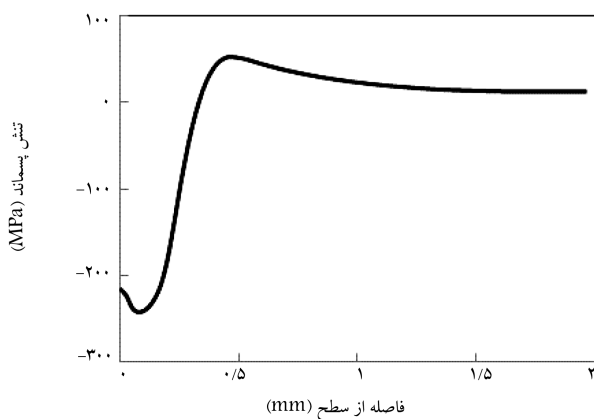


الف) نمای از چیدمان پرتابه؛



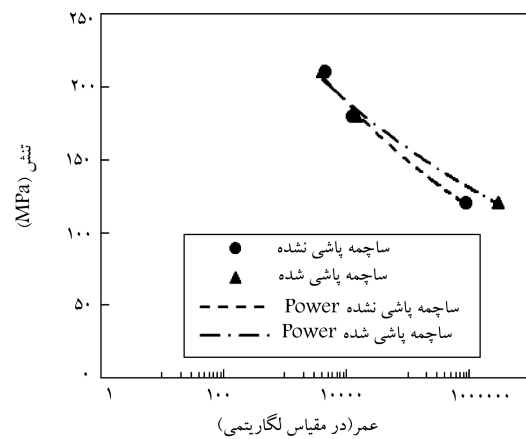
ب) تنش پسماند ایجاد شده در نمونه پس از ساچمه زنی.

شکل ۶. مدل ساخته شده در نرم افزار آباکوس به همراه کانتورهای تنش.



شکل ۷. تغییرات تنش پسماند در طول عمق پس از ساچمه‌زنی.

۰/۶ mm به صورت تصادفی در وسط قطعه که محل برخورد است - چینی شده و سپس در ابتدا اندازه‌ی مش ۸۰ میکرون انتخاب و حل انجام شده است. پس از اتمام حل، میانگین تنش در راستای عمود بر برخورد در صفحه‌ی وسط به فاصله‌ی ۰/۱ mm از سطحی که محل برخورد بوده به‌عنوان پارامتر تعیین‌کننده برای بررسی همگرایی استفاده شده است. در ابتدا اندازه‌ی المان‌ها برابر ۸۰ میکرون در نظر گرفته شده است و در مراحل بعدی این اندازه کاهش داده شده تا اینکه در اندازه‌ی ۳۰ میکرون همگرایی حاصل شده است. [۱۷] شکل ۶ نحوه‌ی چیدمان ساچمه‌ها و کاتور تنش پسماند نمونه پس از برخورد ساچمه‌ها را نشان می‌دهد. در شکل ۷ پروفیل تنش پسماند ناشی از ساچمه‌زنی نشان داده شده است.



شکل ۵. نمودار تنش - عمر حاصل از آزمایش خستگی برای نمونه‌های ساده و ساچمه‌زنی.

مختلف فرایند ساچمه‌زنی استفاده کرده‌اند. این‌گونه شبیه‌سازی یک روش مناسب برای دستیابی به پوشش کامل و پوشش‌های زیاد در سطح است. به‌منظور شبیه‌سازی فرایند ساچمه‌زنی شدید از نرم‌افزار ۶.۱۰.۱/Explicit ABAQUS استفاده شده است. در این بررسی دو مدل تک‌برخورد و چندبرخورد گسترش یافته‌اند. مدل میرایی<sup>۷</sup> برای میراشدن سریع نوسان‌های فرکانس پایین تعریف شده است. از اثرات حرارتی چشم‌پوشی شده است. ابتدا، یک مدل تک‌برخورد برای تخمین شعاع فرورفتگی<sup>۳</sup> شبیه‌سازی شده است. بر اساس مقدار<sup>۳</sup> و مساحت ناحیه‌ی هدف می‌توان تعداد پرتابه‌های لازم برای دستیابی به پوشش کامل را مشخص کرد. منظور از ناحیه‌ی هدف، ناحیه‌ی از سطح نمونه است که تحت عملیات ساچمه زنی قرار می‌گیرد. در این پژوهش از رابطه‌ی آرامی که یک رابطه‌ی قابل قبول و شناخته‌شده است استفاده می‌شود [۱۲] بر اساس رابطه‌ی تجربی آرامی تعداد پرتابه‌ی لازم برای دستیابی به پوشش کامل از روابط ۳ و ۴ به دست می‌آید. به پوشش بیشتر از ۹۸ درصد پوشش کامل گفته می‌شود. [۱۵] پوشش‌های بیشتر از صد درصد هنگامی اتفاق می‌افتد که زمان ساچمه‌زنی بیشتر از زمان لازم برای دستیابی به پوشش کامل باشد. بر این اساس، پوشش ۵۰ درصد در زمانی ۵ برابر زمان لازم برای پوشش صد درصد حاصل می‌شود. بر اساس رابطه‌ی آرامی تعداد ۲۷۵ پرتابه برای ایجاد پوشش ۵۰ درصد لازم است. سپس، با استفاده از یک کد نوشته‌شده به زبان برنامه‌نویسی پایتون موقعیت پرتابه‌ها محاسبه شده است.

$$C = 100 \times (1 - e^{-ASR}) \quad (3)$$

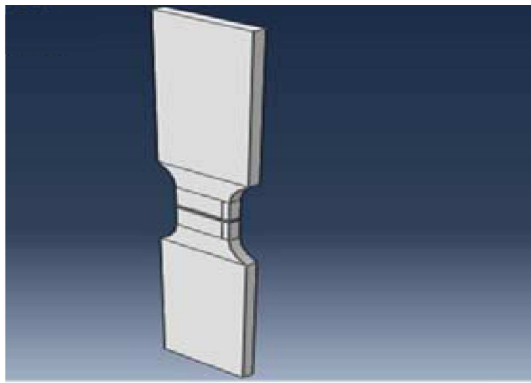
$$ASR = \frac{N \times \pi r^2}{A} \quad (4)$$

از مدل سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی برای تعریف رفتار خمیری استفاده و مؤلفه‌های سخت‌شوندگی با استفاده از داده‌های نیم‌چرخه کشش تعیین شده است. این مدل برای بارگذاری با چرخه‌ی کم مناسب است. [۱۶]

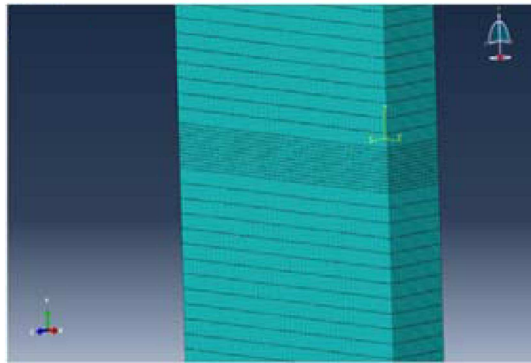
شعاع ساچمه‌ها برابر با ۰/۳ mm به‌صورت کشسانی با مدول یانگ ۲۱۰ GPa، ضریب پواسون ۰/۳، و چگالی ۷۸۰۰ kg/m<sup>۳</sup> در نظر گرفته شده و سرعت اولیه ۷۵ m/s در جهت عمود بر سطح نمونه برای تمام گره‌های پرتابه‌ها تعریف شده است.

بین پرتابه‌ها و سطح نمونه از تماس سطح به سطح با الگوریتم تماسی پنالتی و ضریب اصطکاک ۰/۲ استفاده شده است.

برای بررسی همگرایی مش‌ها با همین مدل تعداد ۳۰ عدد ساچمه به قطر



(الف)



(ب)

شکل ۹. الف) نمایی از مدل خستگی، ب) نمایی نزدیک از نمونه مش ریزی شده.

جدول ۲. ضرایب رابطی کافین - مانسون برای آلومینیم T6-۳۵۰A.

$\sigma'_f$ (MPa)	$\epsilon'_f$	$b$	$c$
۶۶۶	۰٫۰۹	-۰٫۱۱۷	-۰٫۶۱۰

#### ۱.۴. محاسبه‌ی عمر جوانه‌زنی ترک

برای محاسبه‌ی تعداد چرخه‌ی لازم برای شروع ترک در نمونه از رابطه‌ی کافین - مانسون اصلاح شده مطابق رابطه‌ی ۵ استفاده می‌شود: [۱۹]

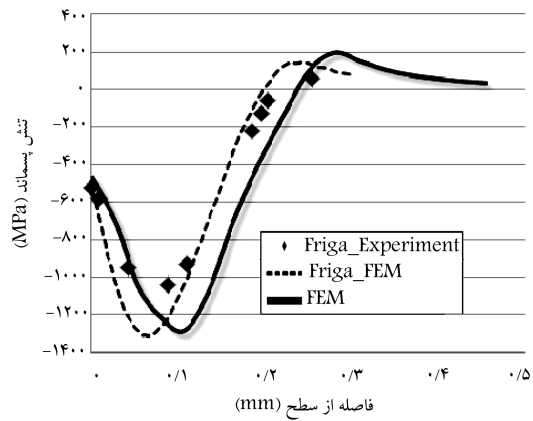
$$\frac{\Delta \epsilon}{2} \sigma_{\max} = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_i)^{2b} + \sigma'_f \epsilon_f (2N_i)^{b+c}$$

$$A = 9,33 * 10^{-8} \text{ (mm/Cycle)} \quad (5)$$

ضرایب این معادله برای آلومینیم T6-۳۵۶A در جدول ۲ آمده است. [۱۹] با توجه به رابطه‌ی کافین - مانسون برای آلومینیم T6-۳۵۶A رابطه‌ی ۵ به صورت رابطه‌ی ۶ بیان می‌شود:

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} \sigma_{\max} = 6247267 (2N_i)^{-0,222} + 59,94 * 10^6 (2N_i)^{-0,727} \quad (6)$$

با اعمال بارگذاری بیشینه و کمینه روی نمونه‌ها در شبیه‌سازی مقدار  $\frac{\Delta \epsilon}{2}$  در رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید. سپس، با استفاده از رابطه‌ی کافین - مانسون تعداد چرخه‌ی لازم برای شروع ترک خستگی در نمونه محاسبه می‌شود. جدول ۳ مقادیر عمر جوانه‌زنی ترک را نشان می‌دهد.



شکل ۸. مقایسه‌ی تنش‌های پسماند پژوهش فریجا و شبیه‌سازی این پژوهش [۱۸].

به منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام شده از پژوهش فریجا و همکاران که برای یک سوپرآلیاژ نیکل شبیه‌سازی تنش پسماند انجام داده‌اند، استفاده شده است. [۱۸] شکل ۸ منحنی تنش پسماند شبیه‌سازی انجام شده با ساچمه‌ی تغییرشکل‌پذیر را در کنار منحنی‌های تنش پسماند پژوهش فریجا نشان می‌دهد و همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌شود تطابق خوبی بین نتایج این شبیه‌سازی با شبیه‌سازی انجام شده توسط فریجا وجود دارد.

#### ۲.۳. شبیه‌سازی خستگی

در این بخش عمر خستگی قطعات بر اساس معیار مکانیک شکست کشسانی خطی بررسی شده است. مدل به صورت سه‌بعدی با ابعاد قطعه‌ی مورد استفاده در آزمایش خستگی ایجاد شد. مدل ماده به صورت کشسانی - خمیری در نظر گرفته شد. کف نمونه در تمام جهات مقید و به سمت دیگر آن مطابق با مقادیر به‌کار رفته در آزمایش تنش اعمال شد. ترک اولیه ۰٫۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده و در ۸ مرحله رشد داده شده است تا به طول ترک نهایی برسد. همچنین، برای اطمینان از مستقل شدن جواب‌ها از اندازه‌ی مش آزمون همگرایی بر روی پارامتر انتگرال J انجام شده است. در نهایت مقادیر فاکتور شدت تنش برای هر مدل در مقادیر مختلف طول ترک استخراج شده است.

شبیه‌سازی رشد ترک خستگی در حضور تنش‌های پسماند ناشی از ساچمه‌زنی شده مشابه با نمونه‌های ساچمه‌زنی نشده است؛ با این تفاوت که تنش‌های پسماند تغییر شکل‌های خمیری و... ایجاد شده در مدل ساچمه‌زنی شده در این مدل به عنوان شرایط اولیه تعریف شده است. این عمل در نرم‌افزار ABAQUS با استفاده از انتقال داده‌های یک تحلیل به مدل جدید امکان‌پذیر است. [۱۶] نمایی از مدل خستگی در شکل ۹ نشان داده شده است.

#### ۴. تخمین عمر

با استفاده از معادله‌ی کافین - مانسون<sup>۸</sup> تعداد چرخه‌ی لازم برای جوانه‌زنی ترک تخمین زده می‌شود. سپس، با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی و رابطه‌ی پاریس تعداد چرخه‌ی مورد نیاز برای رشد ترک اولیه تا طول نهایی محاسبه می‌شود. در نهایت، عمر کل نمونه با جمع مقادیر عمر جوانه‌زنی ترک و رشد ترک به دست می‌آید.

جدول ۳. عمر جوانه‌زنی برای بارگذاری‌های مختلف.

بارگذاری (Mpa)	نمونه‌ی ساچمه‌زنی نشده (Cycle)	نمونه‌ی ساچمه‌زنی شده (Cycle)
۱۲۰	۶۹۲۳۲۴	۱۸۲۳۲۴۵
۱۸۰	۱۲۱۵۶	۱۳۴۵۶
۲۱۰	۴۷۵۶	۵۰۲۶

جدول ۵. عمر رشد ترک خستگی برای سطوح مختلف تنش.

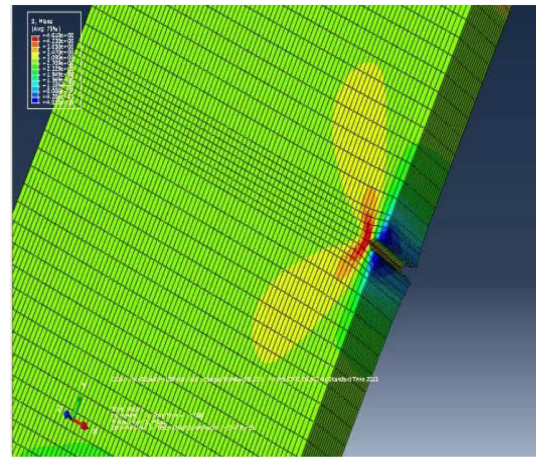
بارگذاری (Mpa)	نمونه‌ی ساچمه‌زنی نشده (Cycle)	نمونه‌ی ساچمه‌زنی شده (Cycle)
۱۲۰	۴۹۳۵۲	۴۱۲۵۱۲
۱۸۰	۳۵۸۵	۴۹۸۷
۲۱۰	۱۱۵۶	۱۲۳۵

جدول ۶. عمر نهایی نمونه حاصل از نتایج شبیه‌سازی.

بارگذاری (Mpa)	عمر نهایی نمونه ساچمه‌زنی نشده (Cycle)	عمر نهایی نمونه ساچمه‌زنی شده (Cycle)
۱۲۰	۷۴۱۶۷۶	۲۲۳۵۷۵۷
۱۸۰	۱۵۷۴۱	۱۸۴۴۳
۲۱۰	۵۹۱۲	۶۲۶۱

جدول ۷. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش.

بارگذاری (Mpa)	عمر به دست آمده از شبیه‌سازی		عمر به دست آمده از آزمایش	
	برای قطعه‌ی ساچمه‌زنی نشده (Cycle)	برای قطعه‌ی ساچمه‌زنی شده (Cycle)	برای قطعه‌ی ساچمه‌زنی نشده (Cycle)	برای قطعه‌ی ساچمه‌زنی شده (Cycle)
۱۲۰	۷۴۱۶۷۶	۲۲۳۵۷۵۷	۸۷۹۶۸۵	۳۰۶۳۵۰۸
۱۸۰	۱۵۷۴۱	۱۸۴۴۳	۱۲۸۹۵	۱۴۴۵۸
۲۱۰	۵۹۱۲	۶۲۶۱	۴۵۵۰	۴۱۵۲



شکل ۱۰. باز شدگی دهانه ترک پس از اعمال تنش.

جدول ۴. ضرایب فاکتور شدت تنش برحسب طول ترک.

طول ترک (mm)	Ke نمونه‌ی ساده	Ke نمونه‌ی ساچمه‌زنی
۰٫۲	۸۶٫۸۵۶	۷۵٫۸۶۹
۰٫۳	۴۵٫۶۵۴	۳۷٫۲۴۱
۰٫۵	۲۶٫۱۰۸	۲۱٫۰۵۳
۰٫۷	۲۰٫۱۴	۱۵٫۹۳
۱	۱۶٫۰۹۵	۱۳٫۸۷
۱٫۵	۱۳٫۵۴۹	۱۱٫۲۵۶
۳	۱۰٫۳۲۹	۹٫۱۹۲
۵	۸٫۹۳۵	۸٫۰۵۳

## ۲.۴. محاسبه و تخمین عمر رشد ترک

مقادیر ضرایب تنش در هر مرحله از رشد ترک پس از اعمال بار از نتایج شبیه‌سازی استخراج می‌شود. شکل ۱۰ کانتور تنش مایز را پس از اعمال بار و باز شدگی ترک نشان می‌دهد. در جدول ۴ ضرایب شدت تنش معادل برحسب طول ترک‌های مختلف برای نمونه‌ی ساچمه‌زنی شده و نمونه‌ی ساچمه‌زنی نشده در بارگذاری با سطح تنش ۱۸۰ مگاپاسکال مشاهده می‌شود.

برای تخمین عمر لازم است تا بر داده‌های ضریب تنش بر حسب طول ترک منحنی برازش شود. یک چندجمله‌ی درجه ۵ (مطابق رابطه‌ی ۵) بر داده‌های  $k$  بر حسب  $a$  برای نمونه‌ی ساچمه‌زنی نشده برازش شده است.

$$k(a) = p_1 a^5 + p_2 a^4 + p_3 a^3 + p_4 a^2 + p_5 a + p_6 \quad (7)$$

پس از برازش ضرایب این معادله برابر با  $p_1 = -0.364$ ,  $p_2 = 0.3216$ ,  $p_3 = -2.1643$ ,  $p_4 = 16.613$ ,  $p_5 = 5.6561$  و  $p_6 = -0.2803$  دست آمد.

با مشخص شدن رابطه‌ی شدت تنش با طول ترک می‌توان از رابطه‌ی پاریس در بازه‌ی  $a_i$  تا  $a_f$  انتگرال‌گیری کرد. همچنین، ضرایب رابطه‌ی پاریس برای آلومینیوم  $A = 3567$  برابر با  $A = 9.33 \times 10^{-8}$  (mm/Cycle) و  $n = 3.1$  است. [۲۰] پس از انتگرال‌گیری از رابطه‌ی پاریس عمر رشد ترک خستگی نمونه‌ی ساچمه‌زنی نشده برای تنش ۱۸۰ MPa برابر با ۳۵۸۵ Cycle محاسبه می‌شود. به این ترتیب عمر رشد ترک خستگی برای دو سطح دیگر تنش ۱۲۰ MPa و ۲۱۰ MPa و همچنین نمونه‌ی ساچمه‌زنی شده محاسبه شده که نتایج حاصل از آن در جدول ۵ ارائه شده است.

عمر نهایی نمونه برابر مجموع عمر جوانه‌زنی و عمر رشد ترک خستگی است که مقادیر آن در جدول ۶ برای نمونه‌های ساده و ساچمه‌زنی شده قابل مشاهده است.

## ۵. بحث و بررسی

مقادیر عمر به دست آمده از شبیه‌سازی و آزمایش برای نمونه‌های ساده و ساچمه‌زنی شده در جدول ۷ برای سه سطح تنش نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اختلاف ناچیز بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی وجود دارد.

شکل ۱۱ نمودار تنش بر حسب عمر برای نمونه‌های ساده و ساچمه‌زنی شده را نشان می‌دهد. تطابق خوبی میان نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی حاصل شده است. که دقت شبیه‌سازی انجام شده را نشان می‌دهد.

با برازش تابع توانی به نقاط به دست آمده از آزمایش و شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که در خستگی کم‌چرخه کمتر از  $10^3$  چرخه ساچمه‌زنی تأثیر زیادی بر عمر

مقدار تنش اعمالی به نمونه تأثیر تنش پسماند بیشتر است. زیرا، در این ناحیه تنش پسماند فشاری رهاسازی نمی‌شود و باعث بسته شدن ترک و همچنین به تأخیر انداختن جوانه زنی و رشد ترک می‌شود. به طور کلی هرچه تنش اعمالی به نمونه کمتر باشد تأثیر تنش‌های پسماند فشاری ناشی از فرایند ساچمه زنی بر عمر خستگی قطعات بیشتر است.

تنش پسماند فشاری در این فرایند در نزدیکی سطح ایجاد می‌شود. این تنش‌های فشاری عامل اصلی در به تأخیر انداختن جوانه زنی و رشد ترک در سطح نمونه است. درحالی‌که با رشد ترک به سمت عمق نمونه و خارج شدن از ناحیه تنش پسماند فشاری تأثیر آن به شدت کم و به صفر می‌رسد.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل‌های اجزای محدود برای شبیه‌سازی فرایند ساچمه زنی و خستگی توسعه یافت. عمر خستگی نمونه‌های ساده و نمونه‌های ساچمه زنی شده به وسیله آزمایش و اجزای محدود محاسبه شد. فرایند ساچمه زنی با پوشش ۵۰ درصد شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل مورد بررسی و بحث قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل به شرح زیر است:

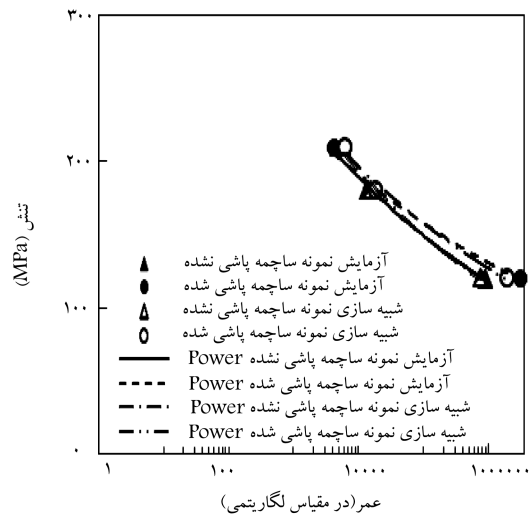
۱. نتایج عددی تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد.
۲. نشان داده شد ساچمه زنی تأثیر زیادی در عمرهای کم، که در سطوح تنش بالا اتفاق می‌افتد، ندارد. در حالی‌که، در عمرهای بالا تأثیر زیاد دارد.
۳. تنش پسماند فشاری ناشی از فرایند ساچمه زنی در نزدیکی سطح ایجاد می‌شود که با به تأخیر انداختن جوانه زنی و رشد ترک در این ناحیه عمر خستگی را افزایش می‌دهد. در حالی‌که، با رشد ترک به سمت عمق نمونه و خارج شدن از ناحیه تنش پسماند فشاری تأثیر آن به شدت کم و به صفر می‌رسد.

## پانویس‌ها

1. peening parameters
2. avrami
3. quenching
4. santam
5. almen intensity
6. instron
7. material damping
8. coffin-Manson

## منابع (References)

1. Fu, P., Zhan, K. and Jiang, C. "Micro-structure and surface layer properties of 18CrNiMo7-6 steel after multi-step shot peening", *Materials & Design*, **51**, pp. 309-314 (2013).
2. Seitzl, S., Keršner, Z., Bilek, V. and Knésl, Z. "Glass fibre reinforced cement based composite: Fatigue and frac-



شکل ۱۱. نمودار تنش - عمر برای نمونه‌های ساده و ساچمه‌زنی شده.

ندارد. این نتیجه را هم نتایج آزمایشگاهی و هم نتایج عددی نشان می‌دهد. حتی می‌توان گفت عمر نمونه‌ی ساده در عمرهای پایین بیشتر است. در عمرهای بالاتر عمر نمونه‌ی ساچمه‌زنی شده بیشتر می‌شود و این اختلاف با افزایش تعداد چرخه‌ها افزایش می‌یابد. این نتیجه بیان‌کننده‌ی این امر است که ساچمه‌زنی بر چرخه‌ی پرتکرار تأثیر زیادی دارد.

دلیل این پدیده به سازوکار شکست در خستگی کم چرخه و پرچرخه مربوط است. در عمرهای کم به دلیل بالا بودن مقدار تنش اعمالی، نمونه بیشتر وارد ناحیه‌ی خمیری می‌شود. در ناحیه‌ی خمیری نیز به دلیل آزادسازی تنش پسماند این تنش‌ها نمی‌توانند تأثیر بسزایی داشته باشند. برای چرخه‌های پرتکرار یا عمر بالا به دلیل کم بودن

ture parameters", *Applied and Computational Mechanics*, **3**(2), pp. 363-374 (2009).

3. Farrahi, G.H., Lebrijn, J.L. and Couratin, D. "Effect of shot peening on residual stress and fatigue life of a spring steel", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **18**(2), pp. 211-220 (1995).
4. Bhuvanaghana, B., Srinivasanb, S.M. and Maffeo, B. "Optimization of the fatigue strength of materials due to shot peening a survey", *International Journal of Structural Changes in Solids Mechanics and Applications*, **2**, pp. 33-63 (2010).
5. Gdoutos, E., *Fracture Mechanics: An Introduction*, Solid Mechanics and Its Applications, 2nd edn. Vol. 123, Springer, Dordrecht (2005).
6. Stephens, R.I., Fatemi, A., Stephens, R.R. and Fuchs, H.O., *Metal Fatigue in Engineering*, John Wiley & Sons (2000)
7. Kim, T., Lee, H., Kim, M. and Jung, S. "A 3D FE model for evaluation of peening residual stress under angled

- multi-shot impacts”, *Surface and Coatings Technology*, **206**(19-20), pp. 3981-3988 (2012).
8. Bagherifard, S. and Guagliano, M. “Fatigue behavior of a low-alloy steel with nanostructured surface obtained by severe shot peening”, *Engineering Fracture Mechanics*, **81**(0), pp. 56-68 (2012).
  9. Bagherifard, S., Ghelichi, R. and Guagliano, M. “Numerical and experimental analysis of surface roughness generated by shot peening”, *Applied Surface Science*, **258**(18), pp. 6831-6840 (2012).
  10. Gangaraj, S.M.H., Guagliano, M. and Farrahi, G.H. “An approach to relate shot peening finite element simulation to the actual coverage”, *Surface and Coatings Technology*, **243**(0), pp. 39-45 (2014).
  11. *Properties and Selections: Nonferrous Alloys and Special-Purposed Materials*, ASM International, Handbook Committee (1992).
  12. Kirk, D. “Shot peening coverage: Prediction and control”, *The Shot Peenet*, Spring, pp. 24-32 (2009).
  13. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, E8M - 04, ASTM (2004).
  14. *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*, E466 - 96 R02, ASTM (2002).
  15. Standard, J2277-200301, *Shot Peening Coverage*, Developed by Surface Enhancement Committee (1 Jan 2003).
  16. Sajuri, Z., Miyashita, Y. and Mutoh, Y. “Effect of loading frequency on fatigue behavior of magnesium alloy in humid environment”, *Jurnal Mekanikal*, **22**, pp. 115-131 (December 2006).
  17. Bhuvanaraghan, B., Srinivasan, S.M. and Maffeo, B. “Numerical simulation of Almen strip response due to random impacts with strain-rate effects”, *International Journal of Mechanical Sciences*, **53**(6), pp. 417-424 (2011).
  18. Frija, M., Hassine, T. Fathallah, R. Bouraoui, C. and Dogui, A. “Finite element modelling of shot peening process: Prediction of the compressive residual stresses, the plastic deformations and the surface integrity”, *Materials Science and Engineering: A*, **426**(1), pp. 173-180 (2006).
  19. Fatemi, A., Plaseied, A., Khosrovaneh, A. and Tanner, D. “Application of bi-linear log-log S-N model to strain-controlled fatigue data of aluminum alloys and its effect on life predictions”, *International Journal of Fatigue*, **27**(9), pp. 1040-1050 (2005).
  20. Sharma, S. and Mishra, R. “Fatigue crack growth behavior of friction stir processed aluminum alloy”, *Scripta Materialia*, **59**(4), pp. 395-398 (2008).