

## بررسی اثر فرایند صیقل کاری با پلاستیسیته کم بر روی عمر خستگی شفت ناچدار چرخان

سوران حسینی فرد\*  
دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
سید حجت موسوی  
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### چکیده

یکی از مناسبترین روشها برای ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح قطعات، فرایند صیقل کاری با پلاستیسیته کم است که می تواند رفتار خستگی مناسبی برای قطعات فلزی فراهم کند. این فرایند می تواند بدون نیاز به بهینه سازی محیط، مواد و یا طراحی اجزاء، تنش های کششی سطح را کاهش دهد یا به طور کامل حذف کند. در این فرایند یک ساچمه غلتش آزاد با یک نیروی عمودی مناسب در سطح قطعه کار حرکت می کند و با تغییر شکل پلاستیک سطح، تنش های پسماند فشاری مناسبی در عمق قطعه فراهم می کند. در این پژوهش، مدل اجزاء محدود این فرایند در دو حالت یک و دو ساچمه ای بر روی یک شفت از جنس آلایژ آلومینیم ۷۰۷۵-T۶ ارائه شده و تأثیرات آن بر روی تنش های پسماند مطالعه و با استفاده از رهیافت مبتنی بر کرنش، عمر خستگی قطعه بررسی شده است. نتایج نشان می دهند که استفاده از دو ساچمه به جای یک ساچمه در این فرایند، می تواند تنش های پسماند فشاری در راستای محوری و شعاعی قطعه را ۱٫۵ برابر افزایش دهد. عمق تأثیرگذاری تنش ها نیز در حالت دو ساچمه بیشتر از یک ساچمه است. همچنین، حد استحکام خستگی در نمونه مورد نظر با فرایند صیقل کاری با پلاستیسیته کم دو ساچمه ای، نسبت به نمونه بدون فرایند مذکور و یک ساچمه ای به ترتیب حدود ۳ و ۲ برابر افزایش می یابد. **واژه های کلیدی:** صیقل کاری با پلاستیسیته کم، مدل سازی اجزاء محدود، تنش پسماند، عمر خستگی.

## Investigating the Effect of Low Plasticity Burnishing (LPB) Process on Fatigue life of Rotating Notched Shaft

S. Hassanifard Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
S. H. Mosavi Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### Abstract

One of the most appropriate methods for providing compressive residual stresses in the surface layer of parts is low plasticity burnishing that can increase fatigue life of metals. Low plasticity burnishing reduces or completely eliminates surface tensile stresses, without optimizing the environment, materials or design components. During this process, a free-rolling ball with proper vertical load is moved on the work-piece in order to create plastic deformation and compressive residual stress. In this study, finite element modeling of the process on Aluminum Alloy 7075-T6 shaft is presented in two conditions, single and double ball. Effect of the process on residual stresses and fatigue life of work-piece by strain-based approach is investigated. Results show that, using double ball instead of single ball in this process can increase axial and radial compressive residual stresses up to 1.5. Also, residual stress depth in double ball condition is higher than single ball condition. The fatigue strength in the work-piece with double ball LPB against without LPB and single ball is increased 3 and 2 times, respectively.

**Keywords:** Low Plasticity Burnishing (LPB), Finite Element Modeling, Residual stress, Fatigue life.

### ۱- مقدمه

در فرایند ساچمه زنی<sup>۱</sup> ذرات ریز نسبتاً کروی (ساچمه) با سرعت بالا با سطح قطعه برخورد می کنند و ابتدا سطح را تحت کشش قرار می دهند و سپس گودی با یک ناحیه تنش های فشاری به جا می گذارند. این فرایند به صورت گسترده در صنعت به کار گرفته می شود، درحالی که محدودیت های خاصی از جمله سرد کاری با درصد بالا و عمق کم تنش های پسماند فشاری در زمینه بهبود سطح دارد. سرد کاری با درصد بالا باعث سختی می شود، که در پی آن عمر خستگی کاهش پیدا می کند. از طرفی سرد کاری کمتر باعث پایداری تنش های پسماند فشاری می گردد. در فرایند شوک لیزر زنی<sup>۲</sup> نیز یک پالس با انرژی زیاد به صورت مستقیم به سطح قطعه تابانده می شود، درحالی که سطح با یک لایه آب و یک لایه ماده جذبی پوشش داده شده است، که ماده جذبی باعث جذب بهتر انرژی پالس به شکل پلاسما می گردد. برهمکنش پالس لیزر و ماده جذبی موجب ایجاد یک موج ضربه ای می گردد که در میان مواد انتشار می یابد. این موج ضربه ای امکان ایجاد ترک داخلی را فراهم می کند. این فرایند بسیار هزینه بر است و زمان

هوایماهای مربوط به نیروی دریایی به خاطر وجود رطوبت در معرض آسیب های مربوط به خوردگی قرار می گیرند و پیرو آن عمر قطعات به شدت کاهش می یابد، که در این صورت بایستی قطعات تعویض و یا تعمیر گردند که این کار باعث افزایش هزینه ها می گردد. هزینه سالانه تخمین زده شده برای بازرسی خوردگی و تعمیر و تعویض قطعات مقداری بالغ بر یک هزار میلیون دلار است. یکی از راه حل های مناسب برای افزایش مقاومت در مقابل خوردگی و افزایش عمر خستگی استفاده از روش های بهبود سطح است [۱].

در صنعت چندین روش مختلف برای بهبود سطح وجود دارد که می توانند یک لایه فشاری از تنش های پسماند را در عمق قطعات فراهم کنند. این فرایندها به منظور افزایش عمر خستگی قطعات به کار گرفته می شوند. تنش پسماند کششی که معمولاً از فرایندهای تولید، جوشکاری و غیره به وجود می آیند، باعث کاهش استحکام خستگی می شوند، درحالی که تنش پسماند فشاری برای بهبود مکانیکی قطعات مفید هستند.

<sup>۱</sup> Shot Peening

<sup>۲</sup> Laser Sock Peening

سطح کم تر است و این درصد کم باعث پایداری بیشتر تنش های پسماند فشاری می گردد. ژوانگ و همکارانش [۶] در کار خود به بررسی و تحلیل تنش های پسماند به دست آمده از فرایند LPB چندمسیری، هم به صورت مدل سازی سه بعدی و هم تجربی پرداخته اند. تطابق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی مشاهده شده است. پارامترهای مختلفی از جمله نیروی صیقل کاری، سرعت پیشروی، قطر ساچمه و تعداد مسیرهای صیقل کاری در فرایند LPB تأثیر گذارند. سیمیکری و همکارانش [۷] نیز در مقاله خود بر روی تأثیرات این فرایند در زبری سطح، میکروسختی، بی عیبی سطح و عمر خستگی روی قطعه کار AISI 1045، با رویکردی تماماً تجربی متمرکز شده اند. پارامترهای مؤثر در فرایند LPB را به ترتیب تأثیر گذاری بر روی زبری سطح و پاسخ عمر خستگی معرفی کرده اند که به ترتیب اهمیت عبارتند از: فشار ساچمه، سرعت صیقل کاری، قطر ساچمه و تعداد مسیرهای صیقل کاری. به منظور کم کردن مقدار زبری سطح بایستی فشار، سرعت و تعداد مسیرها زیادت را و قطر ساچمه کم تر گردد. در حالی که، برای بالا بردن مقدار سختی سطح باید همه پارامترهای ذکر شده کم شوند و برای بهبود عمر خستگی تمام پارامترها افزایش یابند. محمدی و همکاران [۲] در کار خود تلاش کرده اند که در یک مدل سازی سه بعدی اجزاء محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس<sup>۲</sup> این پارامترها را برای ماده Ti-6Al-4V بهینه سازی کنند و تأثیر این پارامترها را بر روی تنش های پسماند و کرنش پلاستیک مؤثر بررسی نمایند. نتایج نشان می دهد که استفاده از مدل سازی گسترش یافته برای بررسی تأثیر پارامترها روی توزیع تنش های پسماند و کرنش پلاستیک مؤثر در عمق قطعه، مناسب است. فو و همکارانش [۸] نیز تأثیرات این فرایند را هم از نظر تجربی و هم از نظر مدل سازی، بر روی آلیاژ نیتینول بررسی کرده اند که تطابق مناسبی را بین این نتایج ارائه داده اند.

در کار حاضر، با استفاده از محیط نرم افزار آباکوس یک شبیه سازی سه بعدی از فرایند LPB، برای بررسی تأثیرات این فرایند بر روی آلیاژ آلومینیوم پر کاربرد 7075-T6 و نتایج آن بر روی عمر خستگی سیکل پر چرخه مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور صحت سنجی کار نیز نتایج تجربی یکی از مقالات به صورت شبیه سازی اعتبارسنجی شده است. برای پیش بینی عمر خستگی قطعه کار از رهیافت خستگی بر مبنای کرنش اسمیت، واتسون و تاپر (SWT) استفاده شده است. در این تحلیل، دو حالت در نظر گرفته شده است. یک بار با استفاده از یک ساچمه و سپس با استفاده از دو ساچمه به صورت دوطرفه عملیات LPB انجام شده و نتایج مربوط به تنش های پسماند در سه راستای اصلی و عمر خستگی هر دو حالت با حالت بدون LPB مقایسه شده است. در این کار، فرایند بر روی یک شفت ناچ دار چرخان انجام شده است.

## ۲- مدل سازی

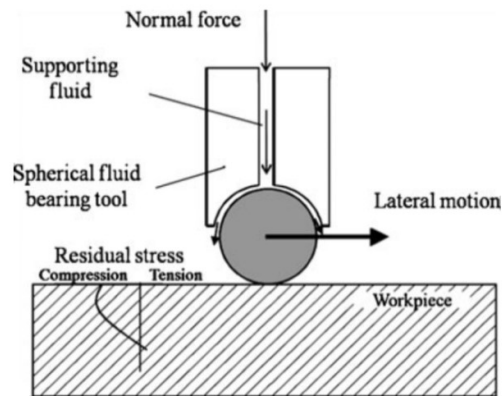
برای شبیه سازی فرایند LPB از بسته نرم افزاری اجزاء محدود آباکوس ۶٫۱۳ [۹] استفاده شده است. این نرم افزار توانایی تحلیلی بالایی دارد، به طوری که می تواند با استفاده از الگوریتم دینامیکی صریح برای تشریح این کار به کار گرفته شود و از الگوریتم استاتیکی نیز برای

زیادی برای انجام نیاز دارد و مقرون به صرفه نیست [۲]. فرایندهای متداول برای کاهش عوامل مکانیکی مرتبط با خوردگی در وسایل نقلیه به طور معمول توسط روش حفاظتی، تعویض آلیاژها یا اصلاح در طراحی به منظور کاهش تنش ها در مقابل محیط های خوردنده ایزوله می شوند.

فرایند صیقل کاری با پلاستیسیته کم (LPB)<sup>۱</sup> یکی دیگر از فرایندهای بهبود سطح است که برای اولین بار در سال ۱۹۹۶ توسط مرکز تحقیقات لامبدا در سینسیناتی اوهایوی آمریکا برای بهبود خواص خستگی اجزاء موتورهای توربین گازی معرفی شده است [۳]، که می تواند بدون نیاز به بهینه سازی محیط، مواد و یا طراحی اجزاء تنش های کششی سطح را کاهش دهد یا به طور کامل حذف کند. شکل ۱ نمای کلی دستگاه LPB را نشان می دهد. این فرایند یک لایه تنش های پسماند فشاری با عمق مناسب را فراهم می کند. در این فرایند یک ساچمه غلتش آزاد با یک نیروی عمودی مناسب در سطح قطعه کار حرکت می کند که بر اساس آن ماده تغییر شکل پیدا کرده و تنش های پسماند فشاری ایجاد می گردد، که می توانند عملکرد عمر خستگی و ویژگی های سطح را بهبود بخشند. ساچمه توسط یک یاتاقان سیالی حمایت می شود و به راحتی می تواند در هر جهتی غلتش کند. سیال هم به عنوان کنترل کننده فشار ساچمه است و هم نقش خنک کننده را دارد که می تواند مانع آسیب های سطحی هنگام عملیات گردد. این سیال از اصطکاک بین ساچمه و قطعه کار نیز ممانعت می کند. این فرایند بسیار کم هزینه بوده و در کمترین زمان قابل اجرا است.

تاکنون در مورد فرایند LPB، هم به صورت تجربی و هم به صورت مدل سازی تحقیقات مختلفی انجام شده است. در زمینه مطالعات تجربی، توسط مرکز تحقیقات لامبدا بر روی مواد مختلف از جمله آلومینیوم [۱]، نیکل [۳]، فولاد [۴] و تیتانیوم [۵]، در راستای بررسی تلورانس آسیب و عمر خستگی مطالعه صورت گرفته است.

نتایج حاصل از این مطالعات حاکی از آن است که مقدار و عمق تنش های پسماند در فرایند LPB در مقایسه با فرایند



شکل ۱- نمای کلی LPB [۲]

ساچمه زنی و سایر فرایندهای بهبود سطح مناسب تر است. همچنین، درصد سردکاری در فرایند LPB در مقایسه با سایر فرایندهای بهبود

<sup>۲</sup> ABAQUS

<sup>۱</sup> Low Plasticity Burnishing

در المان بندی قطعه کار به منظور تحلیل دینامیکی و استاتیکی و در نظر گرفتن کاهش زمان تحلیل، از المان C3D8R (المان مکعبی ۸ گرهی با کنترل ساعت شنی<sup>۱</sup> و انتگرال گیری کاهش یافته) استفاده می شود. ساچمه طراحی شده برای انجام فرایند نیز صلب در نظر گرفته می شود. زیرا این کار باعث کاهش روند محاسبات در شبیه سازی می گردد. به منظور المان بندی ساچمه از المان صلب دینامیکی استفاده می شود. ابعاد ساچمه با توجه به مقاله [۳] کره ای به شعاع ۶۳۵ میلی متر است. برای تعریف تماس بین قطعه و ساچمه از برهم کنش سطح به سطح و روش تماسی پنالتی استفاده می شود. در شرایط آزمایشگاهی اصطکاک بین ساچمه و قطعه، با توجه به حضور سیال بسیار کم می گردد، به همین خاطر ضریب اصطکاک در شبیه سازی ها خیلی کم انتخاب می شود. در این مقاله مقدار ۰/۰۰۱ مورد استفاده قرار گرفته است.

برای معرفی خواص قطعه کار روش های مختلفی در نرم افزار ارائه شده است. اما از آنجایی که در این مبحث تنش و کرنش مطرح است، بیشتر داده ها یا به صورت تابعی از تنش تسلیم و کرنش پلاستیک مطرح می شود، یا به صورت ضرایب جانسون-کوک. مطالعات در این زمینه حاکی از آن است که به علت جامع تر بودن رابطه جانسون-کوک نسبت به روش دیگر، از این روش جواب های دقیق تری حاصل می گردد. لذا از رابطه جانسون-کوک استفاده می کنیم.

در بحث شرایط مرزی، ساچمه با سرعت زاویه ای به مقدار rpm ۶۰۰ حول راستای محوری چرخش می کند. این در حالی است که شفت در همه راستاها از نظر جابجایی و چرخشی بسته شده است. برای این قید گذاری ها از روش کوپلینگ<sup>۲</sup> استفاده می گردد. و همچنین برای ساچمه، قید گذاری ها در مرکز آن و به نقطه مرجع اعمال می گردد. شبیه سازی این فرایند تا مرحله بررسی عمر خستگی دارای پنج مرحله اساسی است که سه مرحله آن تحلیل دینامیکی در ابتدا و دو مرحله استاتیکی در پایان کار است.

مرحله اول وارد کردن نیرو از سمت ساچمه به قطعه کار، مرحله دوم انجام فرایند، مرحله سوم باربرداری، مرحله چهارم پایا کردن نتایج و مرحله آخر بررسی عمر خستگی شفت با استفاده از تنش های پسماند است. تعریف مقیاس جرم<sup>۳</sup> برای کاهش زمان محاسبات و افزایش دقت در نتایج تحلیل های دینامیکی بسیار کاربردی است. از آنجایی که فرایند LPB طبیعی دینامیکی دارد و همچنین اندازه المان ها در ناحیه فرایند شده ریزتر است، زمان محاسبات در حالتی که از روش مقیاس جرم استفاده نشود، بسیار طولانی خواهد شد و بازه های زمانی نامساوی تحلیل باعث خطا در نتایج می گردد. تعریف این تکنیک برای تحلیل منجر به کاهش زمان تحلیل و افزایش دقت محاسبات با بازه های زمانی ثابت می گردد. بعد از پایا کردن مدل در مرحله چهارم، تنش های پسماند در راستاهای اصلی به دست می آیند.

## ۲-۲- اعتبارسنجی مدل سازی

به منظور صحت سنجی شبیه سازی فرایند LPB، تنش های پسماند حاصل از تحلیل تجربی پروی و همکاران [۱۲] با یک مدل

پایدارسازی نتایج تنش و کرنشی و همچنین برای بررسی عمر خستگی استفاده می شود.

فرایند LPB یک فرایند غلتش آزاد است که حرکت تناوبی دارد. یکی از پارامترهای اساسی در تحلیل دینامیکی این فرایند برای رسیدن به جواب دقیق تر استفاده از تعریف خواص پلاستیسیته ماده به صورت مدل جانسون-کوک است. به خاطر اینکه این مدل می تواند همزمان خواص ماده را به صورت تابعی از دما، کرنش اعمالی و نرخ کرنش بیان کند. معادله مربوط به مدل جانسون-کوک در رابطه (۱) بیان شده است:

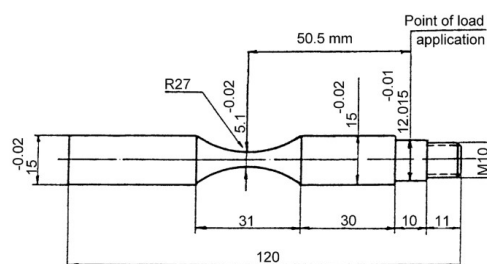
$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) + (1 + CLn\dot{\varepsilon}^*) (1 - T^*m) \quad (1)$$

که در آن،  $\sigma$ ،  $\varepsilon$  و  $T^*$  به ترتیب تنش، کرنش و دمای مؤثر هستند و  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$  نرخ کرنش بی بعد است، که در آن  $\dot{\varepsilon}_0$  نرخ کرنش پلاستیک مؤثر و  $\dot{\varepsilon}_0 = 1s^{-1}$  است.  $A$ ،  $B$ ،  $n$ ،  $m$  نیز ثابت ماده هستند، به طوری که،  $A$  استحکام تسلیم،  $B$  و  $n$  به ترتیب ضریب و توان کرنش سختی اند،  $C$  ضریب نرخ کرنش و  $m$  توان نرمی حرارتی است [۱۰].

قطعه کار به کار گرفته شده در مقاله حاضر، یک شفت ناچ دار چرخان با استاندارد GOST2860-65 [۱۱] برای تست خستگی خمشی چرخشی است، که در شکل ۲ ابعاد آن آورده شده است.

## ۲-۱- مدل سازی عددی

در کار حاضر، با استفاده از ابعاد موجود در شکل ۲، قطعه کار به صورت یک شفت ناچ دار تست خستگی چرخشی خمشی مدل سازی می شود. هدف از این کار بررسی تأثیرات تنش پسماند حاصل از فرایند LPB بر روی عمر خستگی قطعه کار است. آلیاژ مورد استفاده در کار حاضر، آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 است. خواص این ماده، مربوط به ضرایب جانسون-کوک و خواص مکانیکی به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ بیان شده است.



شکل ۲- نمونه تست خستگی (همه ابعاد بر اساس میلی متر) [۱۱]

جدول ۱- ضرایب جانسون-کوک آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 [۱۰]

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	T <sub>melt</sub> (°C)
۵۴۶	۶۷۸	۰/۷۱	۰/۰۲۴	۱/۵۶	۵۸۲

جدول ۲- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 [۱۰]

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\nu$	$\sigma_y$ (MPa)
۲۸۱۰	۷۱	۰/۳۱	۵۰۲

<sup>1</sup> Hourglass Control

<sup>2</sup> Coupling

<sup>3</sup> Mass scale

یک بهبودیافتگی در قطعه کار به شمار می‌رود. هرچقدر عمق تنش‌های پسماند فشاری ایجادشده بیشتر باشد استحکام بیشتری در قطعه حاصل می‌گردد و پایداری مناسبی برای تنش‌ها فراهم می‌کند.

جدول ۲- ضرایب جانسون-کوک برای اینکونل ۷۱۸ [۱۳]

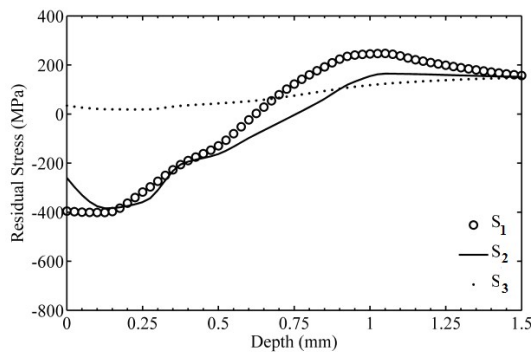
A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	$T_{melt}$ (°C)
۱۰۲۹,۱	۱۴۷۷,۵	۰,۳۲۶	۰,۰۱۷	۱,۹	۱۳۰۰

جدول ۴- خواص مکانیکی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ [۱۳]

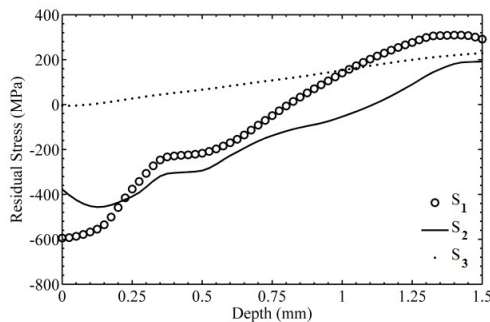
$\rho$ (kg / m <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\nu$	$\sigma_y$ (MPa)
۸۱۹۰	۲۰۹	۰,۲۹	۱۰۲۹,۱

### ۳-۱- نتایج فرایند LPB

فرایند LPB باعث ایجاد لایه‌ای از تنش‌های پسماند فشاری در نزدیکی سطح قطعه کار، معمولاً تا عمق ۱ الی ۱,۵ میلی‌متر می‌گردد [۱۴]. در این شبیه‌سازی، تنش‌های پسماند حاصل از فرایند LPB تحت بار ۱۵۰۰ نیوتون و در ۲ مسیر بررسی شده است. نتایج حاصل از این فرایند به‌صورت پروفیل تنش‌های پسماند در سه راستای اصلی در حالت‌های یک و دو ساچمه‌ای به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ رسم شده است. با توجه به نمودارها، فرایند LPB باعث ایجاد لایه مناسبی از تنش‌های پسماند فشاری تا عمق ۱ میلی‌متر می‌گردد. این تنش‌ها با توجه به روابط تنش میانگین و تنش دامنه باعث افزایش عمر خستگی قطعه خواهند شد.



شکل ۴- تأثیر فرایند LPB بر روی تنش‌های پسماند برای یک ساچمه

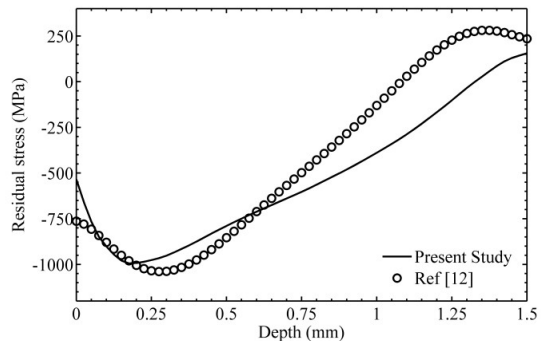


شکل ۵- تأثیر فرایند LPB بر روی تنش‌های پسماند برای دو ساچمه

ارائه‌شده مقایسه شده است. در این مدل، یک قطعه مکعبی به طول ۱۰۱,۱ میلی‌متر، عرض ۳۸,۱ میلی‌متر و ضخامت ۹,۵ میلی‌متر به‌عنوان نمونه در نظر گرفته شده است. ساچمه طبق استاندارد، به قطر ۱۲,۷ میلی‌متر فرض شده است. فرایند در حالت کنترل جایجایی، به دلیل نبود جزئیات نیرو و سرعت پیشروی در این مقاله، با روش سعی و خطا به مقدار نیروی ۴۰۰۰ نیوتون و سرعت پیشروی ۰,۵ متر بر ثانیه، مقادیر تنش پسماند به مقدار مناسبی رسیده است. برای انجام این فرایند تنها یک مسیر از فرایند در شرایط بارگذاری با استفاده از کنترل جابه‌جایی صورت پذیرفته است.

همان‌طور که از نمودار شکل ۳ مشخص است، تطابق مناسبی بین نتایج مقاله و مدل‌سازی حاضر وجود دارد، که نشان از صحت کار حاضر است. تفاوت موجود در نمودار نیز می‌تواند به نوع روش تحلیل، استفاده از داده‌های متفاوت و کمبود داده‌های مقاله مربوط باشد.

ماده مورد بررسی در این کار اینکونل ۷۱۸<sup>۱</sup> است، که خواص مورد استفاده آن در صحت‌سنجی در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده است [۱۳]. موادی از جمله، اینکونل ۷۱۸، Ti-6Al-4V، و آلومینیوم T6-۷۰۷۵ برای این‌که بعد از برش، تراشکاری، فرایند ماشین‌کاری و سایر فرایندها سطح مناسبی داشته باشند، نیاز به عملیات بهبود سطح دارند. به همین خاطر برای بررسی تأثیرات فرایند LPB در بهبود سطح قطعه، پروی و همکاران اینکونل ۷۱۸ را انتخاب کرده‌اند و در کار حاضر نیز ما آلیاژ آلومینیوم T6-۷۰۷۵ را مورد مطالعه قرار داده‌ایم.



شکل ۳- اعتبارسنجی مدل‌سازی با استفاده از پروفیل تنش‌های پسماند به‌دست‌آمده از نتایج تجربی توسط مرجع [۱۲]

### ۳-۲ نتایج شبیه‌سازی عددی

به‌طور کلی، تنش‌های پسماند در یک جسم می‌تواند مضر یا مفید باشد. تنش‌های پسماند کششی معمولاً مضر هستند و سطح جسم را ترد می‌کنند و یا استحکام مکانیکی را کاهش می‌دهند. درحالی‌که تنش‌های پسماند فشاری معمولاً مفید هستند و عمر خستگی را بهبود می‌بخشند. در همین راستا، تلاش می‌شود تا با استفاده از روش‌های مختلفی در قطعات تنش‌های پسماند فشاری فراهم گردد.

در این فرایندها با استفاده از برخورد، صیقل‌کاری و هر عمل فیزیکی در سطح قطعه، در عمق قطعه تنش‌های پسماند با شرایط فشاری فراهم می‌گردد، که از نظر رفتار خستگی و استحکام مکانیکی

<sup>۱</sup> Inconel 718

راستاهای مختلف محاسبه شده و با استفاده از معادلات تنش و کرنش دامنه و تنش میانگین برای محاسبه  $\varepsilon_a$  و  $\varepsilon_{max}$  مورد استفاده قرار گرفته است. روابط (۳) الی (۵) ذکر شده به ترتیب تنش دامنه معادل، تنش میانگین معادل و کرنش دامنه معادل را بیان می کنند.

$$\sigma_{eqa} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \frac{(\sigma_{xa} - \sigma_{ya})^2 + (\sigma_{ya} - \sigma_{za})^2}{2} + (\sigma_{xa} - \sigma_{za})^2 + 6(\tau_{xya}^2 + \tau_{zxa}^2 + \tau_{zya}^2) \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$\sigma_{eqm}^2 = \sigma_{xm}^2 + \sigma_{ym}^2 + \sigma_{zm}^2 \quad (4)$$

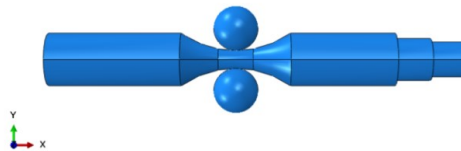
$$\varepsilon_{eqa} = \left( \frac{2}{3}(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2) + \frac{1}{3}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{xz}^2 + \gamma_{yz}^2) \right)^{1/2} \quad (5)$$

جدول ۵- ثابت های عمر خستگی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ [۱۵]

$b$	$c$	$E(GPa)$	$\sigma'_f(MPa)$	$\varepsilon'_f$
-۰٫۱۴۳	-۰٫۰۶۱۹	۷۱	۱۴۶۶	۰٫۲۶۲

به منظور مقایسه نتایج عمر خستگی با فلز پایه، ابتدا عمر خستگی در نمونه شفت برای فلز پایه بررسی شده است. سپس در همان شرایط برای قطعه LPB شده مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج عمر خستگی با نتایج شفت ناچ دار LPB شده مقایسه شده است. برای بررسی عمر خستگی، با استفاده از نرم افزار برنامه نویسی متلب<sup>۳</sup> روش SWT نوشته شده است. به طوری که، خروجی های مربوط به تنش و کرنش برای سه سیکل از بارگذاری عمر خستگی مد نظر را به صورت داده های ورودی به متلب وارد شده و با استفاده از تنش های مختلف، عمر خستگی حاصل گردیده است.

تنش های وارده بر اساس رفتار فلز پایه و رفتار فلز LPB شده با استفاده از یک و دو ساچمه طوری انتخاب شده است که در بازه عمر خستگی ۱۰<sup>۳</sup> تا ۱۰<sup>۸</sup> حاصل گردد. نمودار دامنه تنش-عمر حاصل از آن ها در شکل ۸ آورده شده است. این نمودار به صورت نیمه لگاریتمی در راستای عمر رسم گردیده است. از خروجی های موجود پیدا است که عمر خستگی بی نهایت برای نسبت دامنه  $R = -1$  برای فلز پایه در بازه دامنه تنش ۱۰۰ الی ۱۵۰ مگاپاسکال اتفاق می افتد، این در حالی است که برای قطعه LPB شده توسط یک ساچمه و دو ساچمه این دامنه به ترتیب در بازه ۲۵۰ الی ۳۰۰ مگاپاسکال و ۴۰۰ الی ۴۵۰ مگاپاسکال قرار دارد. این بهبود، نشان از عملکرد مناسب فرایند LPB در افزایش عمر خستگی است. نتایج عددی مربوط به عمر خستگی نیز در جدول ۶ به ازای تنش های مختلف برای مقایسه بهتر حالت های ذکر شده آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود به ازای تنش دامنه ۴۰۰ مگاپاسکال عمر خستگی برای فلز پایه ۹۵۰۰ دور، برای قطعه LPB شده با یک ساچمه ۴۵ هزار دور و برای قطعه LPB شده با دو ساچمه ۶۸ میلیون دور تخمین زده شده است. در واقع در حالت دو ساچمه ای به ازای این مقدار تنش، قطعه به عمر بی نهایت می رسد.



شکل ۶- شبیه سازی فرایند LPB

با توجه به این که قید بندی حرکتی شفت طوری است که در هنگام چرخش قسمت پایین را نمی توان قید بندی کرد و بایستی از نظر حرکتی آزاد باشد، احتمال لنگی به خاطر وارد کردن نیرو از طرف ساچمه به شفت وجود دارد. به همین خاطر باید یک صفحه نگه دارنده پشتی به کار گرفته شود. به منظور بررسی نتایج هر دو حالت، یکبار فرایند با استفاده از یک ساچمه و یکبار با استفاده از دو ساچمه برای اجرای عملیات استفاده شده است، که می تواند هم جلوی لنگی را بگیرد هم اینکه فرایند را با تنش های پسماند مناسب ارائه دهد. نتایج گواه از دقت و صحت مناسب کار در حالت دو ساچمه ای نسبت به حالت یک ساچمه ای است. پس از انجام فرایند LPB بایستی با یک شبیه سازی استاتیکی، تنش های پسماند را به صورت پایا در آورد.

### ۲-۳- بررسی عمر خستگی حاصل از تنش پسماند فرایند LPB

برای بررسی عمر خستگی پر چرخه<sup>۱</sup> در مقاله حاضر، از روش اسمیت، واتسون و تاپپر<sup>۲</sup> (SWT) بر مبنای کرنش استفاده شده است. این روش برای سیکل پر چرخه مناسب تر است [۱۵]:

$$\varepsilon_a \sigma_{max} = \frac{\sigma'_f{}^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f (2N_f)^{b+c} \quad (2)$$

در این رابطه  $\varepsilon_a$ ،  $\sigma_{max}$ ،  $E$  و  $N_f$  به ترتیب، کرنش دامنه، تنش بیشینه، مدول الاستیسیته و عمر خستگی هستند.  $b$ ،  $c$ ،  $\sigma'_f$  و نیز، ثابت های مربوط به عمر خستگی هستند که مقادیر لازم آن ها برای آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به اینکه تأثیرات تنش های پسماند در عمر خستگی مطرح است، بحث تنش میانگین معادل از اهمیت بسزایی برخوردار است. از آنجایی که روش SWT تأثیرات تنش میانگین را نیز در خود جای داده است، در کار مورد استفاده قرار گرفته است.

نرم افزار آباکوس قابلیت این را دارد که خروجی های حاصل از یک فرایند را به صورت تنش، کرنش و سایر پارامترها، دوباره به سیستم وارد کند و در تحلیلی دیگر به صورت داده های اولیه روی قطعه کار به کار گیرد. در همین راستا، رفتار حاصل از فرایند LPB، برای تحلیل خستگی در نرم افزار بازخوانی می شود. برای بررسی عمر خستگی از روش آزمون خمش چرخان با فرکانس ۴۶ هرتز و نسبت دامنه  $R = -1$  استفاده شده است. به همین خاطر بارگذاری چرخه ای طبق شرایط شکل ۷ با اعمال بارگذاری متناظر با فرکانس و نیروی مورد نظر بررسی شده است. پس از پایا شدن دامنه تنش ها و کرنش ها نتایج مورد نیاز در

<sup>۱</sup> High Cycle Fatigue (HCF)

<sup>۲</sup> Smith, Watson and Topper (SWT)

<sup>۳</sup> MATLAB

۱- فرایند LPB می‌تواند به راحتی و بدون کمترین هزینه عمر قطعات را بهبود بخشد و تنش‌های پسماند فشاری با عمق مناسب و پایداری بالا در سطوح مختلف فراهم کند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که عمق این تنش‌های پسماند فشاری ایجاد شده در حالت دو ساچمه‌ای ۱ میلی‌متر و در حالت تک ساچمه‌ای ۰٫۷۵ میلی‌متر است. تنش‌های پسماند فشاری ایجاد شده نیز در حالت دوساچمه‌ای در دو راستای  $S_1$  و  $S_2$  مخصوصاً تا عمق ۰٫۵ میلی‌متر حدود ۱٫۵ برابر حالت تک ساچمه است.

۲- با انجام فرایند LPB، حد استحکام خستگی به طور چشمگیری افزایش پیدا می‌کند. در حالت دو ساچمه حد استحکام خستگی ۳ برابر فلز پایه حاصل شده است. این در حالی است که برای حالت تک ساچمه افزایش در حدود ۲ برابر محاسبه شده است.

۳- با در نظر گرفتن خطاهای انسانی، هزینه و زمان در محیط آزمایشگاهی، مدل سازی اجزاء محدود می‌تواند یک روش مناسب برای پیش‌بینی عمر خستگی و تنش‌های پسماند باشد.

۴- مدل ارائه شده توسط جانسون-کوک یک مدل مناسب برای شبیه سازی فرایندهای بهبود سطح از جمله فرایند صیقل کاری با پلاستیسیته کم است.

۵- عمق تنش‌های پسماند ایجاد شده در حدود ۱ میلی‌متر است. که این مقدار در مقایسه با سایر فرایندهای بهبود سطح از جمله ساچمه زنی و غلتک زنی عمیق مقدار قابل توجهی است.

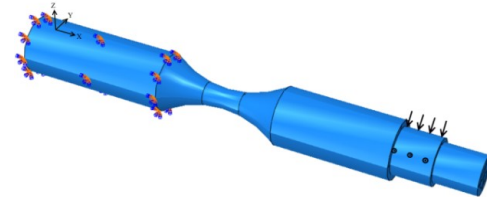
۶- عمق تنش‌های پسماند فشاری ایجاد شده در حالت دو ساچمه‌ای در مقایسه با حالت تک ساچمه‌ای بیشتر است. زیرا که دو ساچمه علاوه بر جلوگیری از لنگی، به صورت دوطرفه سطح جسم را تحت فشار مناسبی قرار می‌دهد.

## ۵- مراجع

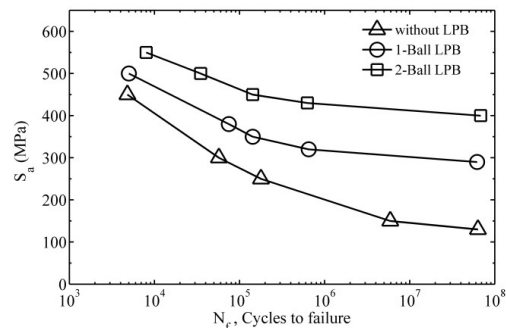
- [1] Prevý P. S., Cammett J., Low cost corrosion damage mitigation and improved fatigue performance of low plasticity burnished 7075-T6, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 10, No. 5, pp. 548-555, 2001 .
- [2] Mohammadi F., Sedaghati R., Bonakdar A., Finite element analysis and design optimization of low plasticity burnishing process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 70, No. 5-8, pp. 1337-1354, 2014 .
- [3] Prevý P. S., The effect of cold work on the thermal stability of residual compression in surface enhanced IN718, DTIC Document, 2000 .
- [4] Cammett J., Prevý P., Fatigue strength restoration in corrosion pitted 4340 alloy steel via low plasticity burnishing. pp.2001. Retrieved July 19, 2002 .
- [5] Prevý P. S., Shepard M. J., Smith P. R., The effect of Low Plasticity Burnishing (LPB) on the HCF performance and FOD resistance of Ti-6Al-4V, DTIC Document, pp. 2001 .
- [6] Zhuang W., Wicks B., Multipass low-plasticity burnishing induced residual stresses :three-dimensional elastic-plastic finite element modelling, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 218, No. 6, pp. 663-668, 2004 .
- [7] Seemikeri C., Brahmankar P., Mahagaonkar S., Investigations on surface integrity of AISI 1045 using LPB tool, Tribology International, Vol. 41, No. 8, pp. 724-734, 2008 .

جدول ۶- نتایج عمر خستگی

عمر (دور)	دامنه تنش (MPa)	
$63 \times 10^7$	۱۳۰	فلز پایه
$86 \times 10^5$	۲۰۰	
$81 \times 10^5$	۲۵۰	
$57 \times 10^4$	۳۰۰	
$95 \times 10^3$	۴۰۰	
$62 \times 10^7$	۲۷۰	تک ساچمه‌ای
$13 \times 10^7$	۳۰۰	
$14 \times 10^5$	۳۵۰	
$45 \times 10^4$	۴۰۰	
$51 \times 10^3$	۴۸۰	دو ساچمه‌ای
$68 \times 10^7$	۴۰۰	
$14 \times 10^5$	۴۵۰	
$35 \times 10^4$	۵۰۰	
$81 \times 10^3$	۵۵۰	



شکل ۷- شرایط مرزی و باگذاری



شکل ۸- نتایج مربوط به عمر خستگی پر چرخه برای آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، نتایج مربوط به فرایند صیقل کاری با پلاستیسیته کم بر روی یک شفت ناچدار چرخان به صورت موضعی مورد بررسی قرار گرفته است. به طوری که در محل بحرانی شفت فرایند به صورت دو مسیری انجام گرفته و تأثیرات آن بر روی یک المان بحرانی انتخابی بررسی شده است.

پارامترها با توجه به ادبیات اخیر، طوری انتخاب شده که نتایج مناسب به دست بدهد. در ابتدا نیز برای صحت سنجی یک شرایط آزمایشگاهی به صورت شبیه سازی بررسی شده است. با بررسی تنش‌های پسماند و عمر خستگی می‌توان به نتایج زیر پی برد:

- [8] Fu C., Guo Y., McKinney J., Wei X., Process mechanics of low plasticity burnishing of Nitinol alloy, *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 21, No. 12, pp. 2607-2617, 2012 .
- [9] A. Version, 6.13, 2013, 'Abaqus Analysis User's Manual', Dassault Systmes, Providence, RI, USA .
- [10] Brar N., Joshi V., Harris B., Constitutive model Constants for Al7075-T651 and Al7075-T6, *Proceedings of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter*. Vol. 1195. No. 1. AIP Publishing, 2009.
- [11] Eleiche A., Megahed M., Abd-Allah N., The shot-peening effect on the HCF behavior of high-strength martensitic steels, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, No. 1, pp. 502-508, 2001.
- [12] Prevéy P., Telesman J., Gabb T., Kantzos P., FOD resistance and fatigue crack arrest in low plasticity burnished IN718, in *Proceeding of 5<sup>th</sup> Nat. Turbine Eng. HCF Conference*. pp.2000 .
- [13] Li F.-L., Xia W., Zhou Z.-Y., Finite element calculation of residual stress and cold-work hardening induced in Inconel 718 by Low Plasticity Burnishing, 2010 Third International Conference on Information and Computing. Vol. 2. IEEE, 2010 .
- [14] P Prevéy. S., Cammett J. T., The influence of surface enhancement by low plasticity burnishing on the corrosion fatigue performance of AA7075-T6, *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, No. 9, pp. 975-982, 2004 .
- [15] Dowling N., *Mechanical Behavior of Materials Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*, Assessment of methods for prediction of the notched fatigue limit based on test data by Böhm and Magin. pp.2007.