مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1394، دوره 15، شماره 7، ص‌ص 426-434

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه عددی توزیع تنش‌های پسماند در فرایند غلتک‌زنی عمیق آلومینیوم 7075

فرج الله زارع جونقانی[1]، غلامحسین مجذوبی[2]، احسان خادمی[3*]

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی همدان، همدان
* همدان، صندوق پستی 579 -65155، e.khademi@hut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 13 فروردین 1394
پذیرش: 16 خرداد 1394
ارائه در سایت: 30 خرداد 1394

کلید واژگان:
فرایند غلتک‌زنی
روش اجزاء محدود
تنش پسماند
الگوی مومسان شابوش

چکیده

تنش‌های پسماند به تنش‌هایی گفته می‌شوند که پس از برداشته شدن تمام نیروهای خارجی همچنان در ماده باقی می‌مانند. بر اساس نوع بارگذاری تنش‌های پسماند می-توانند به دو صورت کششی و فشاری در ماده باقی بمانند. تنش‌های پسماند فشاری در جسم می‌توانند استحکام ماده در برابر بارهای وارده به ویژه استحکام خستگی را بهبود ببخشند. یکی از روش‌های ایجاد تنش‌های پسماند فشاری استفاده از فرایند غلتک زنی عمیق است که با توجه به سادگی و پایین بودن هزینه به‌طور گسترده در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله مدل‌سازی فرایند غلتک‌زنی آلومینیوم 7075و شبیه‌سازی آن به کمک روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد و تأثیر عوامل مهمی همچون قطر ساچمه در ابزار غلتک‌زن، گام پیشروی، عمق نفوذ و تعداد عبور بر روی توزیع تنش پسماند بررسی می‌شوند. از الگوی سخت شوندگی چرخه‌ای شابوش در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. ثابت‌های این الگو از آزمایش چرخه‌ای کرنش کنترل آلومینیوم 7075 محاسبه شده‌اند. برای راستی آزمایی نتایج شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود از نتایج آزمایش و شبیه‌سازی‌های پژوهش‌های پیشین استفاده شده است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که عمق و میزان تنش پسماند فشاری با افزایش قطر ساچمه غلتک‌زن، میزان عمق نفوذ و تعداد عبور غلتک افزایش می‌یابد ولی با افزایش گام پیشروی میزان تنش پسماند و یکنواختی توزیع تنش پسماند کاهش می‌یابد. هم‌چنین الگوی مومسان شابوش می‌تواند رفتار ماده در بارگذاری‌های کم چرخه مانند فرایند غلتک‌زنی را پیش‌بینی نموده و به‌کارگیری روش اجزاء محدود در محاسبه تنش پسماند به جای روش‌های تجربی علاوه بر کاهش هزینه و زمان توزیع تنش پسماند در عمق بیشتری را نمایان می‌سازد.

Studying the distribution of residual stresses in deep rolling process of Al 7075

Farajollah Zare Jouneghani[1], Gholamhossein Majzoobi[2], Ehsan Khademi[3*]

1- Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
3- Department of Robotics Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran
* P.O.B. 579 -65155 Hamedan, Iran, e.khademi@hut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 April 2015
Accepted 06 June 2015
Available Online 20 June 2015

Keywords:
Deep rolling
Numerical simulation
residual stress
Chaboche plasticity model

ABSTRACT

Residual stresses are those which remain in the material even after removing the entire external load. Residual stresses may be compressive or tensile depending on the type of the loading. Compressive residual stresses improve the mechanical properties particularly the fatigue life of material. Compressive residual stresses can be induced by different techniques. Due to its easiness and low cost, deep rolling is one of the widely used techniques in industry to create compressive residual tresses. Deep rolling process is numerically simulated in this work and the effects of some important rolling parameters such as ball diameter, feed rate, penetration depth and number of passes on the distribution of residual stress are investigated. Chaboche cyclic plasticity model is used in the simulations. The constants of the Chaboche model are calculated from the strain control cyclic tests on Al 7075. The results are validated using the experimental and numerical results reported in the literature. The results indicate that the depth and magnitude of the compressive residual stress increase with increase in the ball diameter, depth of penetration and number of passes. Also, the value of residual stress and its uniformity decrease by increasing the feed rate. In addition, Chaboche cyclic plasticity model can simulate material behavior in a low cycle loading such as deep rolling and using finite element method instead of experimental methods for measuring residual stresses reduces cost and time of solution and reveals more depth of residual stress distribution.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
F. Zare Jouneghani, Gh. Majzoobi, E. Khademi, Studying the distribution of residual stresses in deep rolling process of Al 7075, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 426-434, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.47.5]

1- پیشگفتار

امروزه یکی از چالش‌های مهندسی مکانیک بررسی نقش تنش پسماند در چگونگی تغییر استحکام مواد است. تنش‌های پسماند به دو روش عمده عمدی و غیر عمدی می‌توانند در ماده به وجود آیند. روش‌های غیرعمدی، غالباً شامل فرایندهای تولید و ساخت مانند آهنگری و نورد می‌شوند که نهایتاً تنش‌های پسماندی را در قطعه باقی می‌گذارند. از طرف دیگر روش‌های عمدی که به منظور افزایش استحکام ماده به کار می‌روند به چند دسته کلی مکانیکی، حرارتی و روکش‌کاری تقسیم‌بندی می‌شوند که هر یک از این عملیات داری مزایا و معایبی هستند [1].

از جمله روش‌های عمدی مکانیکی ایجاد تنش‌های پسماند می‌توان به روش‌هایی مانند غلتک‌زنی و ساچمه‌پاشی اشاره نمود. عملیات غلتک‌زنی عمیق یک نوع از عملیات بهبود سطح است که در آن با استفاده از ابزار ساچمه‌ای یا غلتکی تغییر شکل مومسان در قطعه ایجاد گشته و در نتیجه تنش‌های پسماند فشاری در لایه‌های نزدیک سطح به وجود می‌آید [2].

از جمله مزایای روش غلتک‌زنی می‌توان به ایجاد سطحی صیقلی با زبری بسیار کمتر در مقایسه با سایر عملیات‌های مکانیکی نظیر ساچمه‌پاشی اشاره نمود. پژوهش‌های متعددی در زمینه استفاده از عملیات غلتک‌زنی به منظور افزایش استحکام ماده صورت پذیرفته است. برای نمونه مجذوبی و همکاران [3] اثر غلتک‌زنی و ساچمه‌پاشی بر بهبود عمر خستگی سایشی را مورد بررسی قراردادند و پژوهشی توسط رودریگز و همکاران [4] انجام پذیرفت که در آن به بررسی اثر فرایند غلتک‌زنی بر مشخصات سطحی میله‌ای از جنس آلیاژ فولاد 1045 پرداخته شد.

با توجه به این که فرایند غلتک‌زنی عمیق به صورت هم‌زمان استحکام خستگی و مشخصه‌های سطحی را بهبود می‌بخشد، آگاهی از چگونگی تأثیر عوامل مهم در این فرایند بر روی ویژگی‌های مکانیکی از اهمیت بسزایی برخوردار است. اندازه‌گیری تنش پسماند و پی بردن به نحوه توزیع آن در عمق قطعه به کمک روش‌های غیرمخرب مانند استفاده از امواج فراصوتی پرهزینه و زمان‌بر است ولی اگر روش اجزاء محدود به صورت دقیق به‌کار گرفته شود می‌تواند راه‌حل مناسبی برای این مشکلات باشد. شبیه‌سازی فرایند غلتک‌زنی به کمک روش اجزاء محدود توسط محققانی مانند ین و همکاران [5] صورت پذیرفته است به طوری که آن‌ها توانستند مدل اجزاء محدود دوبعدی و سه‌بعدی برای شبیه‌سازی فرایند غلتک‌زنی ارائه دهند. از آنجایی که در مدل دوبعدی امکان جریان ماده در راستای محیطی وجود ندارد دقت مدل‌سازی کاهش می‌یابد. در سوی دیگر نیز آن‌ها شبیه‌سازی سه‌بعدی را با فرضیاتی از جمله نادیده گرفتن انحنای نمونه انجام دادند.

شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در فرایند غلتک‌زنی عمیق، ماده در زیر غلتک ابتدا تحت بارگذاری فشاری قرار می‌گیرد و سپس با عبور غلتک نیروهای کششی به آن وارد می‌شود. در انجام شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود استفاده از معادلات ساختاری پیشرفته که توانایی توصیف رفتار پیچیده ماده در شرایط بارگذاری چرخه‌ای را داشته باشد بسیار مهم و ضروری است. تاکنون بسیاری از محققان معادلات ساختاری متفاوتی برای توصیف رفتار ماده در بارگذاری‌های چرخه‌ای پیشنهاد کرده‌اند. (پراگر [6]، آرمسترانگ فردریک [7]، شابوش [8]). یکی از پرکاربردترین مدل‌های سخت‌شوندگی چرخه‌ای، الگوی خمیری شابوش است [8]. نحوه به دست آوردن ثابت‌های الگوی خمیری شابوش توسط پژوهشگران متعددی مورد مطالعه قرار گرفته است [9].

در این مقاله ابتدا مروری بر فرایند غلتک‌زنی انجام شده و سپس مدل نزدیک به واقعیت و سه‌بعدی از فرایند غلتک‌زنی به کمک روش اجزاء محدود ارائه می‌شود که در آن از الگوی سخت‌شوندگی شابوش به منظور توصیف رفتار ماده استفاده شده است. در شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود تأثیر عوامل مهمی از جمله قطر ساچمه در ابزار غلتک‌زن، گام پیشروی، عمق نفوذ و تعداد عبور بر توزیع تنش پسماند مورد بررسی قرار خواهند گرفت. برای این منظور ثابت‌های الگوی خمیری شابوش برای آلیاژ آلومینیوم 7075 به دست آمده و با استفاده از زیرروال مدل ماده[1] به نرم‌افزار آباکوس معرفی خواهد شد. به منظور ارزیابی مدل ماده استفاده شده، مقایسه‌ای بین نتایج انجام خواهد شد.

2- تعریف مسئله

فرآیند غلتک‌زنی عمیق، عملیات بهبود سطح مکانیکی است که در آن از یک ابزار ساچمه‌ای برای ایجاد تغییر شکل مومسان عمیق و در نتیجه تنش پسماند در لایه‌های سطحی نمونه استفاده می‌شود که در حین فرآیند یک ساچمه وظیفه عملیات غلتک‌زنی را بر عهده دارد و سایر تجهیزات وظیفه ایجاد و کنترل حرکت نسبی بین غلتک و قطعه و حرکت دورانی قطعه و هم‌چنین کنترل عمق نفوذ غلتک را بر عهده دارند. در شکل 1 فرآیند غلتک‌زنی یک میله استوانه‌ای از جنس آلومینیوم 7075 به قطر 7/1 میلی‌متر که با استفاده از دستگاه ماشین تراش صورت پذیرفته نشان داده شده است. اساس انتخاب این نوع آلیاژ آلومینیوم بالا بودن نسبت استحکام به وزن و استفاده صنعتی گسترده به ویژه در صنعت هواپیماسازی و مخازن تحت فشار است [10]. با انجام آزمایش کشش ساده توسط دستگاه اینسترون و با به‌کارگیری کشیدگی‌سنج[2] از میله مورد مطالعه، ضریب کشسانی برابر69 گیگاپاسکال و استحکام کششی نهایی برابر با 650 مگاپاسکال به دست آمده است.

در فرایندهایی همچون غلتک‌زنی، آگاهی از مقدار و نوع تنش پسماند برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی ماده از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا مواردی هم چون عمر خستگی خمشی مواد با تنش های پسماند سطحی رابطه مستقیمی دارد. با توجه به این که عمق نفوذ تنش پسماند در این فرایند حدود چند میلی‌متر بوده و سطح از صافی مناسب برای چسباندن کرنش سنج برخوردار نیست، روش متداول سوراخ‌زنی‌مرکزی[3] برای اندازه‌گیری تنش پسماند قابل‌استفاده نیست. در ضمن روش‌های مخرب دیگر همچون برش‌سیم[4] و روش‌های غیرمخرب مانند پراش نوترونی[5] یا امواج فراصوتی[6] نه‌تنها به تجربه بالا و امکانات فنی نیاز دارند بلکه هزینه زیادی را در پی خواهند داشت و در ضمن بسیاری از مواقع در دسترس نیستند. استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود برای تعیین تنش پسماند یکی از روش‌های غیرمخرب اندازه‌گیری تنش پسماند است که نه‌تنها تخریبی روی قطعه به جا نمی‌گذارد بلکه معایب ذکرشده را نیز در بر ندارد. نکته‌ای که در استفاده از این روش باید مورد توجه قرار گیرد این‌است که فرضیات شبیه‌سازی به واقعیت مسئله نزدیک باشد به گونه‌ای که اعتبار نتایج توسط آزمایش‌ها تأیید گردند. در ادامه به نحوه مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایند غلتک‌زنی عمیق پرداخته می‌شود.

1- UMAT subroutine
2- Extensometer
3- Center hole drilling
4- Wire cut
5- Neutron diffraction
6- Ultrasonic

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.47.5]

شکل 1 فرآیند غلتک‌زنی عمیق آلومینیوم 7075

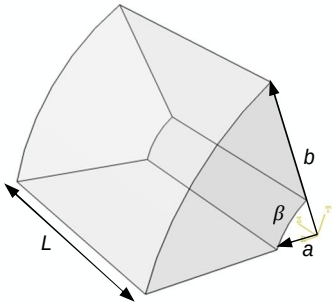
3- شبیه‌سازی اجزاء محدود

3-1- روند شبیه‌سازی

شبیه‌سازی اجزاء محدود عملیات غلتک‌زنی عمیق با استفاده از نرم افزار آباکوس 6.10 انجام شده است. در شبیه‌سازی‌ها از مدل سه‌بعدی استفاده شده است تا هندسه مسئله به واقعیت فرایند نزدیک باشد. به منظور کاهش تعداد المان‌ها و زمان‌حل، هندسه نمونه به صورت قطاعی از یک میله استوانه‌ای در نظر گرفته شده است. در شکل 2 مدل هندسی در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی نشان داده شده است. ابعاد در نظر گرفته شده برای مدل هندسی نیز در جدول 1 ارائه شده است. در شبیه‌سازی‌ها ساچمه به صورت صلب فرض شده و نیز از سرعت دورانی نمونه صرف‌نظر شده است. شبیه‌سازی به صورت صریح[1] با استفاده از مقیاس جرم[2] انجام شده است.

پس از بررسی همگرایی ابعادی المان‌ها، در نهایت از تعداد 23040 المان مکعبی از نوع C3D8R با ابعاد 100 میکرومتر برای مش بندی[3] مدل هندسی استفاده شده است. این نوع المان دارای 8 گره با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته است. در انتگرال‌گیری کاهش یافته با توجه به اینکه از یک نقطه انتگرال‌گیری گوس استفاده می‌شود زمان انجام محاسبات کاهش می‌یابد. در شکل 3 مدل مونتاژ شده و مش‌بندی شده قطاعی از میله و ساچمه نشان داده شده است.

در شبیه‌سازی‌ها تماس میان غلتک و قطعه از نوع تماس سطح به سطح در نظر گرفته شده است که به این منظور ابتدا با مطالعه اثر ضریب اصطکاک بر توزیع تنش پسماند یک جفت تماسی با ضریب اصطکاک صفر در مدل وارد

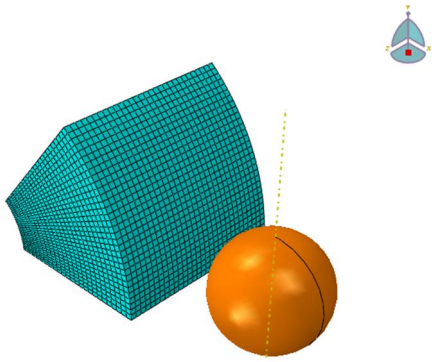


شکل 2 مدل هندسی شبیه‌سازی شده

1- Explicit
2- Mass scale
3- Meshing

جدول 1 ابعاد هندسه مدل اجزاء محدود

L (میلی متر)	3
β(درجه)	50
a (میلی متر)	1
b (میلی متر)	3/55



شکل 3 مدل مونتاژ شده و مش‌بندی شده نمونه و ساچمه

شده است. در شبیه‌سازی‌های پیشین نیز به منظور کاهش زمان حل از ضریب اصطکاک صفر بین نمونه و غلتک استفاده شده است [11].

بارگذاری در شبیه‌سازی عملیات غلتک‌زنی به صورت کنترل جابجایی اعمال شده است به‌گونه‌ای که ابتدا ساچمه سطح نمونه را به اندازه مورد نظر فشرده کرده و سپس با حرکت دورانی نمونه و جابجایی عرضی ساچمه عملیات غلتک‌زنی شبیه‌سازی شده است. به این ترتیب گرچه در عمل میله چرخیده و غلتک ثابت است ولی حرکت آن‌ها نسبت به هم با شبیه‌سازی یکسان است میزان نفوذ ساچمه و میزان جابجایی عرضی (گام پیشروی) از جمله متغیرهای فرایند غلتک‌زنی می‌باشند که در هر شبیه‌سازی تغییر می‌یابند و در بخش4-2 بررسی خواهند شد.

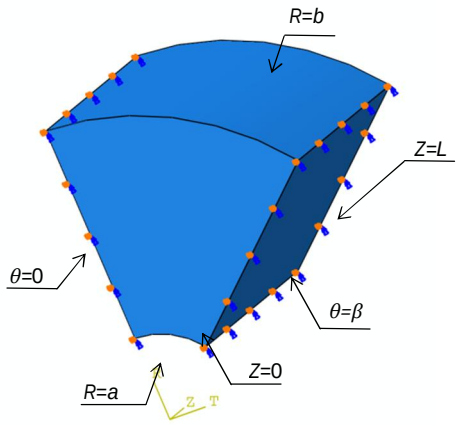
یکی از موارد مهم در شبیه‌سازی اعمال شرایط مرزی است تا مدل‌سازی مسئله با واقعیت هم‌خوانی داشته باشد. همان‌طور که در شکل 4 نشان داده شده است صفحات $\theta=0$ و $\theta=\beta$ طوری مقید شده‌اند که فقط در راستای r قابلیت جابجایی داشته باشند و صفحات $Z=0$ و $Z=L$ نیز به صورت صفحات آزاد در نظر گرفته‌شده‌اند. هم‌چنین، صفحه $R=a$ نیز فقط دارای حرکت دورانی حول محور Z است.

3-2- مدل ماده

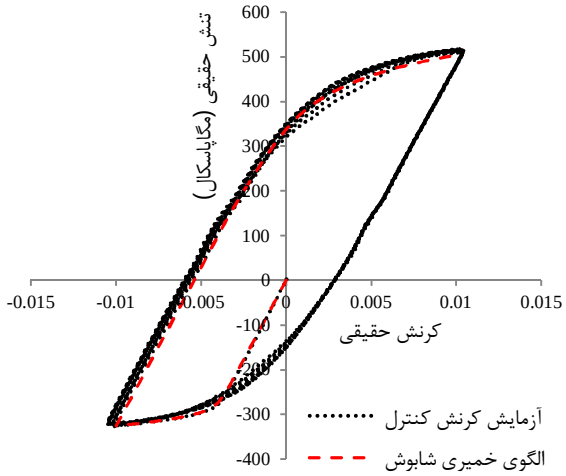
با توجه به این‌که شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد در فرایند غلتک‌زنی عمیق به ماده یک‌چرخه بارگذاری فشاری-کششی وارد می‌شود، برای بررسی رفتار چرخه‌ای این ماده، آزمایش چرخه‌ای بر روی نمونه‌هایی که بر اساس استاندارد خستگی کم‌چرخه E606 تهیه شده‌اند صورت پذیرفته است. آزمایش‌ها با استفاده از کشیدگی سنج و به صورت کرنش کنترل با بازه کرنش 2 درصد تا رسیدن به چرخه پایدار انجام شده‌اند. با توجه به این‌که در فرایند غلتک‌زنی، ماده ابتدا تحت فشار قرار می‌گیرد در آزمایش نیز بارگذاری با اعمال نیروی فشاری آغاز گردیده است. در شکل 5 منحنی تنش-کرنش آزمایشی در بارگذاری چرخه‌ای کرنش کنترل آلومینیوم 7075 نشان داده شده است.

برای وارد نمودن مدل‌ماده از الگوی سخت‌شوندگی شابوش با چهار تنش بازگشتی استفاده‌شده‌است تا منحنی تنش-کرنش با دقت بالایی شبیه‌سازی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.47.5]



شکل 4 شرایط مرزی اعمال‌شده در شبیه‌سازی اجزاء محدود



شکل 5 رفتار آلومینیوم 7075 در آزمایش بارگذاری چرخه‌ای و نتایج الگوی سخت‌شوندگی شابوش

گردد. به منظور ساده‌سازی مدل ماده از عبارت سخت‌شوندگی همسانگرد در آن صرف‌نظر شده و الگوی خمیری در نظر گرفته شده فقط مبتنی بر سختی جنبشی است. الگوی مومسان شابوش، شامل چند عبارت تنش بازگشتی به شکل رابطه آرمسترانگ- فردریک است که هر یک از این تنش‌های بازگشتی بخشی از نمودار تنش-کرنش را مدل‌سازی می‌کنند و به شکل زیر تعریف می‌گردند [8]:

$$X = \sum_{i=1}^{m} X_i \, dX_i = \frac{2}{3} C_i d\varepsilon^p - \gamma_i X_i dp \qquad (1)$$

در رابطه (1)، C_i و γ_i ثابت‌های ماده می‌باشند که از آزمایش به دست می‌آیند، هم‌چنین dp کرنش تجمعی مومسان[1] است و طبق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$dp = \frac{2}{3}\left(d\varepsilon^p : d\varepsilon^p\right)^{1/2} = d\lambda \qquad (2)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه (1) در حالت بارگذاری تک‌محوره و اضافه نمودن تنش تسلیم اولیه، تنش در هر نقطه به صورت زیر نوشته می‌شود [8]:

$$\sigma_x = \sigma_0 + \sum_{i=1}^{4} \frac{C_i}{\gamma_i}\left[1 - e^{-\gamma_i(\varepsilon_x^p)}\right] \qquad (3)$$

که در رابطه فوق، σ_0 تنش تسلیم نخستین و ε_x^p مقدار کرنش مومسان در هر نقطه از نمودار تنش-کرنش است.

ثابت‌های این مدل‌ماده غالباً از نیم‌چرخه کششی حلقه پایدار[2] تعیین می‌شوند [12] ولی خادمی و همکاران [13] نشان دادند در مواردی که ماده تنها یک یا چند چرخه بارگذاری را تجربه می‌کند باید ثابت‌ها از نیم چرخه‌های ابتدایی منحنی پسماند[3] محاسبه شوند که برای این منظور لازم است هر چرخه به دو نیم چرخه تقسیم و ثابت‌های الگوی خمیری شابوش برای هر نیم چرخه به صورت مجزا محاسبه گردد. به این ترتیب ثابت‌های الگوی شابوش برای نخستین نیم‌چرخه فشاری و نخستین نیم‌چرخه کششی به صورت جداگانه به دست آمده‌اند که این ثابت‌ها در جدول 2 نشان داده شده‌اند.

با توجه به این که قابلیت وارد نمودن ثابت‌های به دست آمده در نرم‌افزار آباکوس وجود ندارد از یک زیرروال ماده استفاده شده است به نحوی که اگر میانگین تانسور تنش مثبت باشد از ثابت‌های نیم‌چرخه کششی و در غیر این صورت از ثابت‌های نیم‌چرخه فشاری جدول 2 استفاده شود. جزئیات بیشتر در مورد ساختار زیرروال مورد استفاده در پژوهش بنرا و همکاران [14] قابل مطالعه است. در شکل 5 مقایسه‌ای از نمودار تنش-کرنش به دست آمده از الگوی سخت‌شوندگی شابوش و آزمایش نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است درحالی‌که شکل منحنی تنش-کرنش به شدت غیر-خطی است و نیز مقادیر مطلق تنش نهایی کششی و فشاری تفاوت محسوسی دارند (حدود 200 مگاپاسکال)، مدل‌ماده و ثابت‌های به دست آمده به خوبی منحنی تنش-کرنش را در نخستین نیم‌چرخه فشاری و کششی پیش‌بینی می‌نمایند که نشان‌دهنده توانایی الگوی سخت‌شوندگی شابوش با چهار تنش بازگشتی و صحت زیر روال ماده و روش تعیین ثابت‌ها است.

4- نتایج شبیه‌سازی عددی

برای به دست آوردن توزیع تنش پسماند، میانگین تنش پسماند چند مسیر که از سطح تا عمق نمونه امتداد دارند در نظر گرفته شده است. در شکل 6 مسیر اندازه‌گیری برای یکی از مسیرها که در امتداد خط AB است نشان داده شده است.

جدول 2 ثابت‌های مدل شابوش

ثابت‌ها	نیم‌چرخه کششی	نیم‌چرخه فشاری
تنش تسلیم (مگاپاسکال)	238.3	234.4
C_1 (مگاپاسکال)	255122/5	383641
γ_1	3094	15304/8
C_2 (مگاپاسکال)	45050/3	19156/6
γ_2	397/6	861/2
C_3 (مگاپاسکال)	5008/4	4313
γ_3	0	0
C_4 (مگاپاسکال)	182011	145571
γ_4	3055/7	7077/1

1- Comulativeplastic strain

2- Stabilized cycle
3- Hysteresis curve

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.47.5]

4-1- صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی

برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌های انجام شده از نتایج آزمایشی غلتک‌زنی که توسط روتگر و همکاران [15] انجام شده استفاده شده است. در آزمایش روتگر و همکارانش غلتک‌زنی عمیق بر روی میله‌ای فولادی با قطر 21/5 میلی‌متر از آلیاژ AISI 52100 انجام شده است.

بعدها ین و همکارانش [5] مدل اجزاء محدودی برای آزمایش روتگر ارائه دادند که در آن از مدل ماده ساده‌ای به شکل زیر استفاده نمودند:

$$\bar{\sigma} = C\bar{\varepsilon}_p^n \dot{\varepsilon}_p^m + \bar{\sigma}_y \quad (4)$$

که مقادیر ثابت‌های رابطه فوق در جدول 3 آورده شده است.

به منظور مقایسه شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود این مقاله با نتایج تجربی و شبیه‌سازی‌های ین و همکاران [5]، از مدل‌ماده ارائه شده در بخش 3-2 استفاده شده است به نحوی که ثابت‌های الگوی سخت‌شوندگی شابوش با چهار تنش بازگشتی برای فولاد ذکرشده به‌دست آمده‌اند. سایر موارد به‌کار گرفته شده در شبیه‌سازی مانند ابعاد نمونه و ساچمه در جدول 4 آورده شده است.

برای اعتبارسنجی روند شبیه‌سازی و مدل‌ماده مقاله حاضر، نتایج تنش پسماند حاصل از شبیه سازی‌ها با نتایج تجربی روتگر و همکاران [15] و شبیه‌سازی ین و همکاران [5] مقایسه شده است. شکل 7 مقایسه تنش پسماند در راستای محوری قطعه و شکل 8 مقایسه تنش پسماند در راستای محیط قطعه را نشان می‌دهند. همان‌طور که در نمودار شکل 7 مشخص است، نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود این مقاله هم‌خوانی مناسبی با نتایج تجربی دارد و نسبت به شبیه‌سازی ارائه شده توسط ین و همکاران پیش‌بینی بهتری از توزیع تنش پسماند در راستای محور قطعه را ارائه می‌دهد. به عنوان نمونه در شبیه‌سازی حاضر تنش پسماند فشاری بر روی سطح قطعه بسیار به نتایج تجربی نزدیک است درحالی‌که شبیه‌سازی ین و همکاران تنش پسماند روی سطح را کششی پیش‌بینی می‌کند.

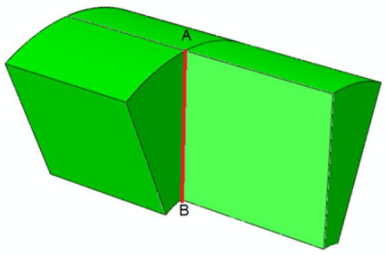
با توجه به نمودارهای شکل 8، نتایج شبیه‌سازی حاضر برای پیش‌بینی تنش پسماند در راستای محیط قطعه نیز وضعیت مشابهی دارد. گرچه کمینه تنش پسماند فشاری در عمق قطعه بیشتر از مقادیر تجربی است ولی شبیه‌سازی حاضر نسبت به شبیه‌سازی ین و همکاران تنش پسماند روی سطح و عمق تغییر علامت تنش پسماند را بهتر پیش‌بینی می‌کند. با توجه به شکل‌های 7 و 8 می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی می‌تواند تنش پسماند در عمق بیشتری از قطعه را نمایان سازد درحالی‌که روش‌های معمول تجربی اندازه‌گیری تنش پسماند عمق نفوذ چندانی ندارند.

یکی از دلایل بهبود نتایج شبیه سازی های اجزاء محدود استفاده از مدل سه بعدی نزدیک به واقعیت است. در شبیه سازی های دو بعدی ین و همکاران [5] امکان جریان ماده در راستای عمق وجود ندارد و در نتیجه تنش پسماند با دقت مناسبی به دست نمی‌آید. در شبیه سازی های سه بعدی نیز آن‌ها از انحنای نمونه صرف نظر نمودند که گرچه شبیه سازی‌ها را ساده تر می‌کند ولی از دقت آن‌ها خواهد کاست. از طرف دیگر مدل ماده انتخابی در پژوهش ارائه شده رفتار ماده در بارگذاری چرخه‌ای را بهتر پیش‌بینی می‌نماید که نقش بسزایی در بهبود نتایج حل عددی دارد.

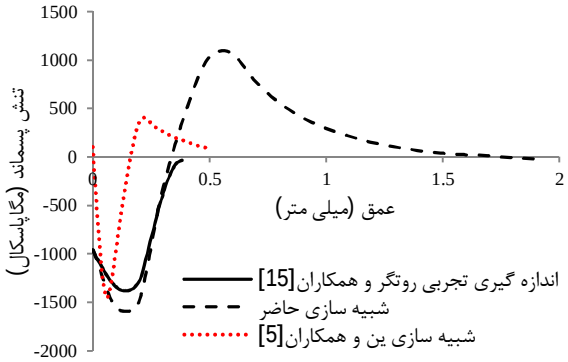
به منظور صحت‌سنجی بیشتر شبیه‌سازی‌ها، نیروی وارده از سطح نمونه به ساچمه با نتایج آزمایش روتگر و همکاران [15] مورد مقایسه قرار گرفته است. برای تعیین نیروی وارد بر غلتک، یک نقطه مرجع[1] بر روی غلتک ایجادشده که در نهایت میانگین نیروی وارده شده به این نقطه مرجع به عنوان نیروی غلتک زنی در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در نمودار شکل 9 مشخص است با استفاده از شبیه‌سازی حاضر میانگین نیرو در فرایند غلتک‌زنی عمیق برابر با 1131 نیوتن به‌دست می‌آید که این مقدار به نیروی 1098 نیوتنی محاسبه شده در آزمایش بسیار نزدیک است. در نهایت با توجه به مقایسه انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که روند شبیه‌سازی و مدل‌ماده به‌کار گرفته شده از اعتبار مناسبی برای پیش‌بینی تنش پسماند ماده در فرایند غلتک‌زنی عمیق برخوردار است.

4-2- بررسی توزیع تنش پسماند

پارامترهای مورد بررسی در فرآیند غلتک‌زنی که در این مقاله به آن‌ها پرداخته شده است عبارت‌اند از: قطر ساچمه غلتک‌زن، گام پیشروی، عمق نفوذ و تعداد عبور. در شبیه‌سازی‌ها متغیرهای فرایند غلتک‌زنی مطابق جدول 5 در نظر گرفته شده‌اند.



شکل 6 مسیر اندازه‌گیری توزیع تنش پسماند



شکل 7 مقایسه‌ی تنش پسماند در راستای محوری

جدول 4 مقادیر پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی

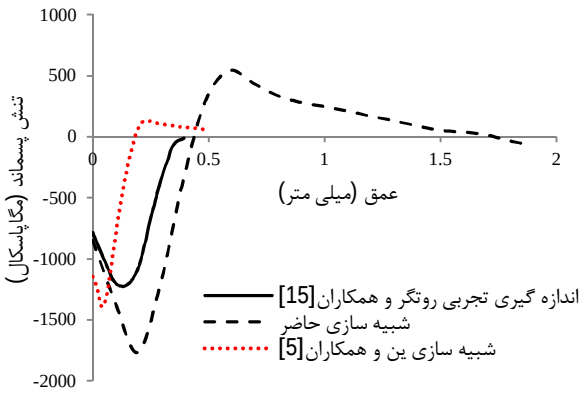
ساچمه	نمونه			
D (میلی متر)	L (میلی متر)	β (میلی متر)	a (میلی متر)	b (میلی متر)
6	4	50	6/75	10/75

1- Reference Point

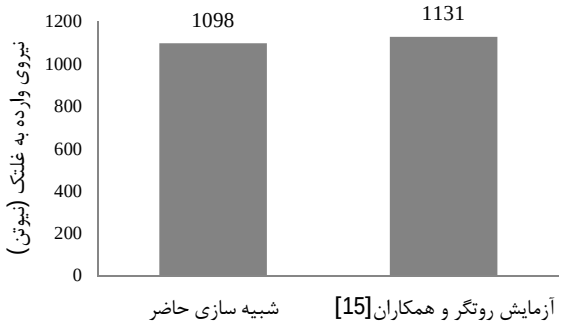
جدول 3 خواص مکانیکی و ثابت‌های رابطه 4 برای فولاد AISI 52100

خواص ماده	مقدار
ضریب ارتجاعی(گیگا پاسکال)	210
ضریب پواسون	0/3
C	300
n	0/3
m	0/1
$\bar{\sigma}_y$(مگاپاسکال)	2500
$\dot{\varepsilon}_p$	0/01

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.47.5]



شکل 8 مقایسه‌ی تنش پسماند در راستای محیطی



شکل 9 مقایسه نیروی فرایند غلتکزنی عمیق

4-2-1- تأثیر قطر ساچمه بر توزیع تنش پسماند

به منظور بررسی تأثیر قطر ساچمه بر تنش پسماند، شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن سه قطر متفاوت 6، 8 و 11 میلی‌متر برای ساچمه انجام پذیرفته است.

در این حالت گام پیشروی، عمق نفوذ و تعداد عبور مطابق جدول 5 و برای تمام شبیه‌سازی‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. در نمودارهای شکل‌های 10 تا 12 توزیع تنش پسماند در عمق قطعه در سه راستای شعاعی (S11)، محیطی (S22) و محوری (S33) نشان داده شده است.

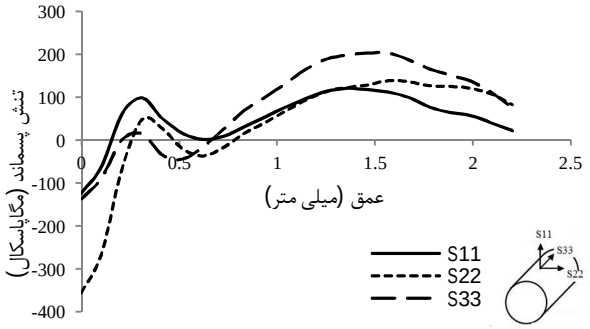
همان‌طور که از نمودارهای شکل‌های 10 تا 12مشخص است با افزایش قطر ساچمه تنش پسماند فشاری در دو راستای محیطی و محوری بر روی سطح اندکی افزایش می‌یابد درحالی‌که تنش پسماند کششی در عمق قطعه به میزان کمی کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه مقدار تنش پسماند فشاری در راستای محوری بر روی سطح از حدود 120- مگاپاسکال برای قطر ساچمه 6 میلی‌متر تا 170- مگاپاسکال برای قطر ساچمه 11 میلی متر افزایش می‌یابد و در راستای مماسی نیز با افزایش قطر ساچمه از 6 به 11 میلی متر تنش پسماند فشاری از حدود 350- تا 450- مگاپاسکال افزایش می‌یابد. هم‌چنین عمق تنش پسماند در راستای محوری برای هر حالت با ساچمه‌های 6، 8 و 11 میلی‌متر در حدود 200 میکرون و در راستای مماسی برابر با 300 میکرون است. در هر حال تنش های پسماند فشاری محوری و شعاعی در سطح نمونه به یکدیگر نزدیک هستند درحالی‌که تنش پسماند فشاری محیطی حدوداً سه برابر بیشتر از آن‌ها است.

4-2-2- تأثیر گام پیشروی بر توزیع تنش پسماند

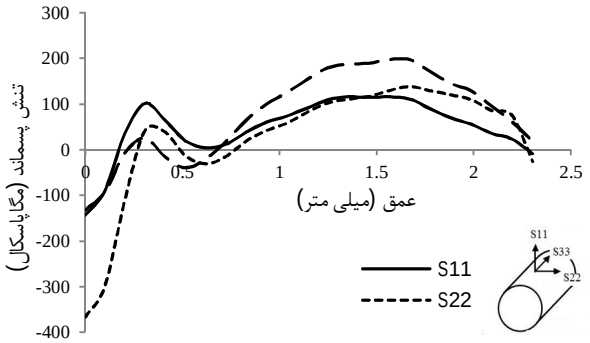
به منظور بررسی اثر گام پیشروی در عملیات غلتکزنی بر روی توزیع تنش پسماند، شبیه‌سازی در دو حالت با گام‌های 0/08 و 0/16 میلی‌متر انجام شده

جدول 5 پارامترهای طراحی شده برای انجام شبیه‌سازی (ابعاد به میلی‌متر)

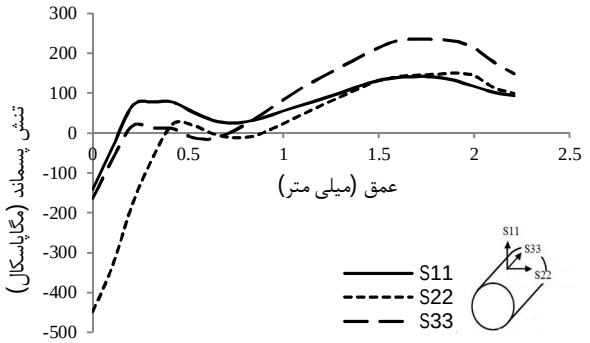
متغیر	قطرساچمه	گام پیشروی	عمق نفوذ	تعداد عبور
قطر ساچمه	6، 8 و 11	0/08	0/05	1
گام پیشروی	6	0/08 و 0/16	0/05	1
عمق نفوذ	6	0/16	0/05 و 0/1	1
تعداد عبور	6	0/16	0/05	1و 2



شکل 10 نمودار تنش پسماند برای قطر ساچمه 6 میلی‌متر



شکل 11 توزیع تنش پسماند برای قطر ساچمه 8 میلی‌متر



شکل 12 توزیع تنش پسماند برای قطر ساچمه 11 میلی‌متر

است. در نمودارهای شکل های 13 و 14 تنش پسماند در راستاهای مختلف برای هر حالت گام پیشروی نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودارهای شکل‌های 13 و 14 مشخص است با افزایش گام پیشروی، تنش پسماند فشاری در راستای شعاعی (S11) از مقدار 123 به مقدار 327 مگاپاسکال افزایش یافته درحالی‌که تنش پسماند در راستای مماسی (S22) از مقدار 355 مگاپاسکال در گام پیشروی 0/08 میلی‌متر به مقدار 208 مگاپاسکال در گام پیشروی 0/16 میلی‌متر کاهش یافته است. علت این امر را می‌توان روی هم افتادن نواحی کششی اطراف ساچمه بر نواحی فشاری گام قبلی دانست. تنش پسماند در راستای محوری (S33) با افزایش گام تغییر

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.47.5]

زیادی نداشته است.

4-2-3- تأثیر عمق نفوذ بر توزیع تنش پسماند

به منظور بررسی اثر عمق نفوذ در عملیات غلتکزنی بر روی توزیع تنش پسماند، شبیه‌سازی در دو حالت با عمق‌های 50 و 100 میکرون انجام شده است. در نمودارهای شکل‌های 15 و 16 تنش پسماند در راستاهای مختلف برای هر حالت عمق نفوذ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ها مشخص است با افزایش عمق نفوذ تنش پسماند فشاری در راستاهای محوری و محیطی بر روی سطح نمونه افزایش یافته است که در این میان بیشترین افزایش تنش پسماند مربوط به تنش پسماند محیطی است. از طرف دیگر تنش پسماند شعاعی بر روی سطح نمونه کاهش می‌یابد.

4-2-4- تأثیر تعداد عبور بر توزیع تنش پسماند

به منظور بررسی اثر تعداد عبور در عملیات غلتکزنی بر روی توزیع تنش پسماند، شبیه‌سازی در دو حالت با تعداد عبور 1 و 2 انجام شده است. در نمودارهای شکل‌های 17 و 18 توزیع تنش پسماند در راستاهای مختلف برای هر حالت تعداد عبور نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودارهای این شکل ها مشخص است با افزایش تعداد عبور، مقدار تنش پسماند در راستاهای محوری و محیطی بر روی سطح نمونه افزایش یافته است که بیشترین افزایش مربوط به تنش پسماند محیطی است. تنش پسماند فشاری شعاعی در سطح نمونه با افزایش تعداد عبور کاهش می‌یابد.

4-2-5- بررسی نیروی غلتکزنی

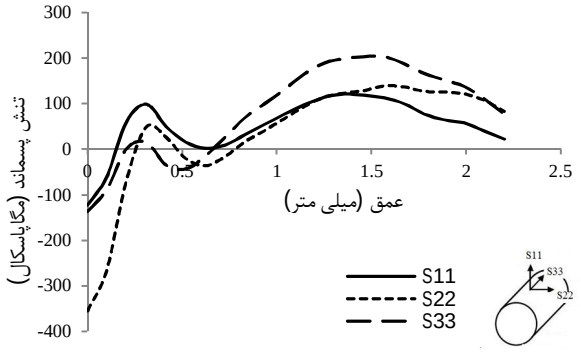
در جدول 6 مقدار نیروی بیشینه در هر حالت شبیه‌سازی آورده شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود در حالت‌های مربوط به قطر ساچمه 11 و 8 میلی‌متر نیز نیرو نسبت به سایر حالت‌ها افزایش یافته که این امر به دلیل افزایش سطح تماس این ساچمه‌ها نسبت به حالت با ساچمه 6 میلی‌متر است. هم‌چنین بیشترین نیروی مورد نیاز برای عملیات غلتکزنی با عمق 100 میکرون حتی با قطر 6 میلی متر است که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر عمق نفوذ نسبت به قطر ساچمه است.

4-2-6- بررسی انرژی بر همگرایی نتایج

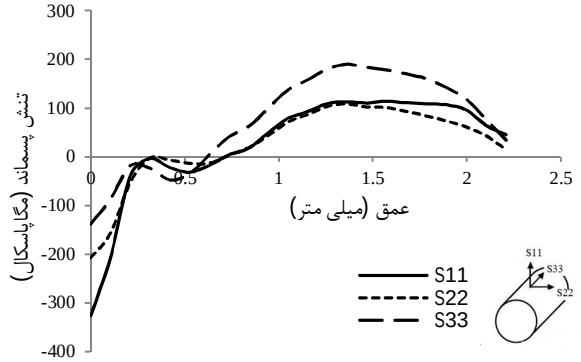
برای بررسی همگرایی در استفاده از نوع ساعت شنی[1] و مقدار مقیاس جرم[2] می‌بایست نسبت انرژی‌ها کنترل شود. معمولاً به منظور بررسی همگرایی نسبت انرژی مصنوعی به انرژی داخلی و برای کنترل مقدار مقیاس جرم نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی بررسی می‌شوند. شکل‌های 19 و 20 تغییر این نسبت‌ها با زمان برای یک حالت شبیه‌سازی را نشان می‌دهند. این نسبت‌ها در تمامی شبیه‌سازی‌ها کنترل شده‌اند. همان‌طور که از نمودار شکل 19 مشخص است نسبت پایدار انرژی مصنوعی به انرژی داخلی کمتر از مقدار 5 درصد است و نیز با توجه به نمودار شکل 20 نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی در حالت پایدار شده کمتر از 2 درصد است که این مقادیر در محدوده قابل قبولی قرار دارند [16].

5- نتیجه‌گیری

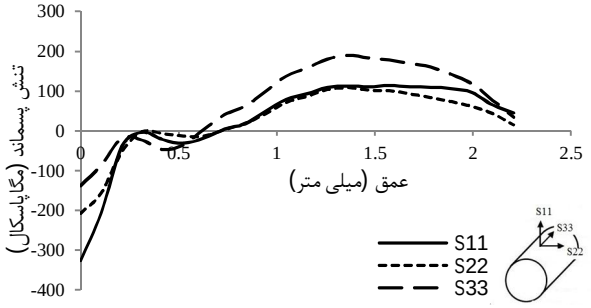
در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود تأثیر عوامل مهمی در فرایند غلتکزنی عمیق همچون قطر ساچمه در ابزار غلتکزن، گام پیشروی، عمق نفوذ و تعداد عبور بر روی توزیع تنش پسماند آلومینیوم 7075 مورد بررسی قرار گرفتند. در شبیه‌سازی‌ها یک مدل سه‌بعدی نزدیک به واقعیت در نظر گرفته شد که در آن از مدل ماده مومسان شابوش برای پیش‌بینی رفتار سخت‌شوندگی ماده استفاده شده است. صحت‌سنجی روش عددی پیشنهادی



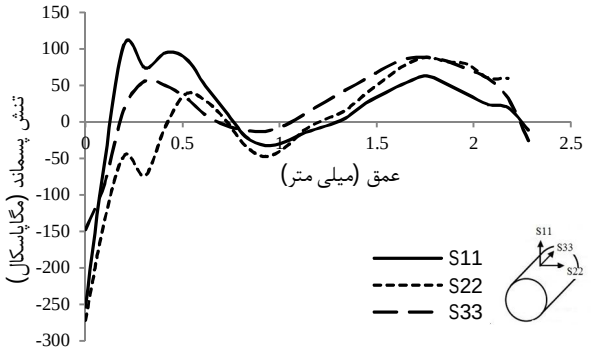
شکل 13 توزیع تنش پسماند برای گام پیشروی 0/08 میلی‌متر



شکل 14 توزیع تنش پسماند برای گام پیشروی 0/16 میلی‌متر



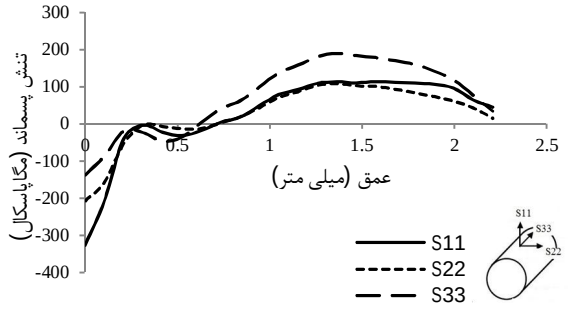
شکل 15 توزیع تنش پسماند برای عمق نفوذ 0/05 میلی‌متر



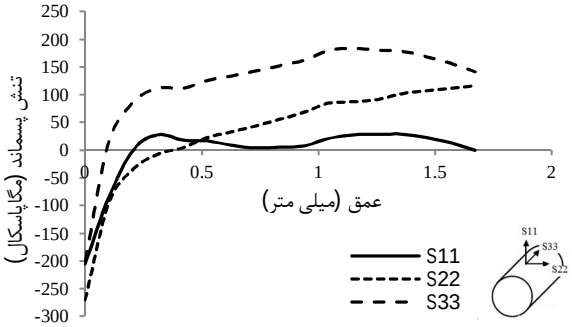
شکل 16 توزیع تنش پسماند برای عمق نفوذ 0/1 میلی‌متر

1- Hourglass
2- Mass scaling factor

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.47.5]



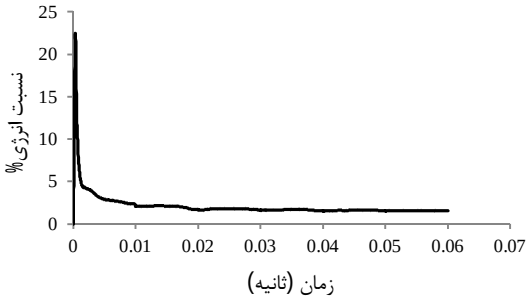
شکل 17 توزیع تنش پسماند برای یک بار عبور



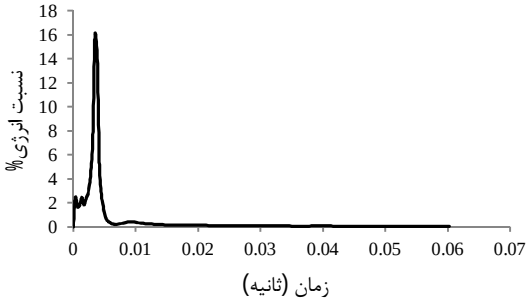
شکل 18 توزیع تنش پسماند برای دو بار عبور

جدول 6 نیروی اعمال‌شده در عملیات غلتک‌زنی

نیرو (نیوتن)	متغیرهای غلتک‌زنی
423/75	d= 6, f=0/16, P=50, Ps=1
499/8	d= 8, f=0/08, P=50, Ps=1
587/5	d= 11, f=0/08, P=50, Ps=1
881	d= 6, f=0/16, P=100, Ps=1
361	d= 6, f=0/16, P=50, Ps=2



شکل 19 نمودار نسبت انرژی مصنوعی به انرژی داخلی



شکل 20 نمودار نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی

با مقایسه نتایج آن با آزمایش و شبیه‌سازی‌های پیشین صورت پذیرفت. پس از بررسی چگونگی توزیع تنش پسماند با عوامل اشاره‌شده، نتایج زیر قابل‌استخراج است:

1- با افزایش قطر ساچمه تنش پسماند فشاری در دو راستای محیطی و محوری بر روی سطح اندکی افزایش می‌یابد ولی تنش پسماند کششی در عمق قطعه به میزان کمی کاهش می‌یابد.

2- با کاهش گام پیشروی هم‌پوشانی سطح و یکنواختی توزیع تنش پسماند افزایش می‌یابد و با افزایش گام پیشروی تنش پسماند فشاری کاهش می‌یابد.

3- با افزایش عمق نفوذ در عملیات غلتک‌زنی، تنش پسماند فشاری افزایش می‌یابد و عمق آن بیشتر می‌گردد.

4- با افزایش تعداد عبور ساچمه بر روی نمونه تنش پسماند فشاری روی سطح افزایش یافته و به حالت اشباع خود نزدیک‌تر می‌شود. در ضمن سطح غلتک‌زنی نیز یکنواخت‌تر می‌گردد.

5- الگوی مومسان شابوش می‌تواند رفتار ماده در بارگذاری‌های کم‌چرخه مانند فرایند غلتک‌زنی را به خوبی پیش‌بینی نماید.

6- استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود در اندازه‌گیری توزیع تنش پسماند به جای روش‌های تجربی علاوه بر هزینه پایین، زمان کم و در دسترس بودن، عمق بیشتری از تنش پسماند را نیز نمایان می‌سازد.

6- فهرست علائم

C_i	ثابت الگوی ماده شابوش (پاسکال)
d	قطر ساچمه غلتک زن (میلی متر)
f	گام پشروی (میلی متر)
P	عمق نفوذ (میکرو متر)
Ps	تعداد عبور
X	تنش بازگشتی (پاسکال)

علائم یونانی

g_i	ثابت بدون بعد الگوی شابوش
ε_x^p	کرنش مومسان
σ_0	تنش تسلیم نخستین

7- مراجع

[1] I. Altenberger, Deep rolling–the past, the present and the future, in *Conf Proc: ICSP-9*, pp. 144-155, 2005.

[2] P. Prabhu, S. Kulkarni, S. Sharma, K. Jagannath, C. Bhat, Deep Cold Rolling Process on AISI 4140 Steel and Optimization of Surface Roughness by Response Surface Methodology, 2012 .

[3] G. Majzoobi, K. Azadikhah, J. Nemati, The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 516, No. 1, pp. 235-247, 2009 .

[4] A. Rodríguez ,L. L. de Lacalle, A. Celaya, A. Lamikiz, J. Albizuri, Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 206, No. 11, pp. 2817-2824, 2012 .

[5] Y. Yen, P. Sartkulvanich, T. Altan, Finite element modeling of roller burnishing process, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 1, pp. 237-240, 2005 .

[6] W. Prager, Recent developments in the mathematical theory of plasticity, *Journal of Applied Physics*, Vol. 20, No. 3, pp. 235-241, 1949 .

[7] P. J. Armstrong, C. Frederick, *A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect*: Central Electricity Generating Board [and] Berkeley Nuclear Laboratories, Research & Development Department, 1966 .

[8] J.-L. Chaboche, Time-independent constitutive theories for cyclic

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.47.5]

plasticity, *International Journal of Plasticity,* Vol. 2, No. 2, pp. 149-188, 1986 .

[9] G. Majzoobi, E. Khademi, S. Pourolajal, An investigation into strain rate dependency of Chaboche plasticity model, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 14, 2015. (in persian)

[10] G. Majzoobi, J. Nemati, A. Novin Rooz, G. Farrahi, Modification of fretting fatigue behavior of AL7075–T6 alloy by the application of titanium coating using IBED technique and shot peening, *Tribology International,* Vol. 42, No. 1, pp. 121-129, 2009 .

[11] M. Sayahi, S. Sghaier, H. Belhadjsalah, Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 67, No. 5-8, pp. 1665-1673, 2013 .

[12] M. Rezaiee-Pajand, S. Sinaie, On the calibration of the Chaboche hardening model and a modified hardening rule for uniaxial ratcheting prediction, *International Journal of Solids and Structures,* Vol. 4 ,6No. 16, pp. 3009-3017, 2009 .

[13] E. Khademi, G. H. Majzoobi, N. Bonora, D. Gentile, Experimental modeling of Strain Dependent Cyclic Plasticity for Prediction of Hysteresis Curve, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. Accepted manuscript.

[14] N. Bonora, G. Majzoobi, E. Khademi, Numerical implementation of a new coupled cyclic plasticity and continum damage model, *Computational Materials Science,* Vol. 81, pp. 538-547, 2014 .

[15] K. Röttger, *Walzen hartgedrehter oberflaechen*: Shaker,2003 .

[16] D. Systèmes, Abaqus 6.10 online documentation, *Abaqus User Subroutines Reference Manual,* 2010 .

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.47.5]