ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه عددی توزیع تنشهای پسماند در فرایند غلتکزنی عمیق آلومینیوم 7075

فرج الله زارع جونقانی¹، غلامحسین مجذوبی²، احسان خادمی^{**}

1- كارشناسي ارشد، مهندسي مكانيك، دانشگاه بوعلى سينا، همدان

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

* همدان، صندوق يستى e.khademi@hut.ac.ir ،65155- 579

چکیدہ	اطلاعات مقاله
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	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 13 فروردین 1394 پذیرش: 16 خرداد 1394 ارائه در سایت: 30 خرداد 1394
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	کلید واژگان:
غلتکزنی ألومینیوم 7075و شبیهسازی أن به کمک روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار میگیرد و تأثیر عوامل مهمی همچون قطر ساچمه در	فرايند غلتكزني
ابزار غلتکزن، گام پیشروی، عمق نفوذ و تعداد عبور بر روی توزیع تنش پسماند بررسی میشوند. از الگوی سخت شوندگی چرخهای شابوش در	روش اجزاء محدود
شبیهسازیها استفاده شده است. ثابتهای این الگو از آزمایش چرخهای کرنش کنترل آلومینیوم 7075 محاسبه شدهاند. برای راستی آزمایی نتایج	تنش پسماند
شبیهسازیهای اجزاء محدود از نتایج آزمایش و شبیهسازیهای پژوهشهای پیشین استفاده شده است. نتایج این مقاله نشان میدهد که عمق و	الگوی مومسان شابوش
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 Jouneghani¹, Gholamhossein Majzoobi², 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	Abstract
Original Research Paper Received 02 April 2015 Accepted 06 June 2015 Available Online 20 June 2015	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
<i>Keywords:</i> Deep rolling Numerical simulation residual stress Chaboche plasticity model	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.

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,

فرج الله زارع جونقانی و همکاران

1- پیشگفتار

امروزه یکی از چالش های مهندسی مکانیک بررسی نقش تنش پسماند در چگونگی تغییر استحکام مواد است. تنش های پسماند به دو روش عمده عمدی و غیر عمدی می توانند در ماده به وجود آیند. روش های غیرعمدی، غالباً شامل فرایندهای تولید و ساخت مانند آهنگری و نورد می شوند که نهایتاً تنش های پسماندی را در قطعه باقی می گذارند. از طرف دیگر روش های عمدی که به منظور افزایش استحکام ماده به کار می روند به چند دسته کلی مکانیکی، حرارتی و روکش کاری تقسیم بندی می شوند 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 ساچمه پاشی 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 می توان به ایجاد سطحی صیقلی با زبری بسیار کمتر در مقایسه با سایر عملیاتهای مکانیکی نظیر ساچمه پاشی 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 ساچمه پاشی 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 میله ای 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 می بخشد، آگاهی از چگونگی تأثیر عوامل مهم در این فرایند بر روی ویژگیهای مکانیکی از اهمیت بسزایی برخوردار است. اندازه گیری تنش پسماند و پی بردن به نحوه توزیع آن در معق قطعه به کمک روشهای غیر مخرب مانند استفاده از امواج فراصوتی پرهزینه و زمان بر است ولی اگر روش اجزاء محدود به صورت دقیق به کار گرفته شود می تواند راه حل مناسبی برای این مشکلات باشد. شبیه سازی فرایند غلتکزنی به کمک روش اجزاء محدود توسط محققانی مانند ین و فرایند غلتکزنی به کمک روش اجزاء محدود توسط محققانی مانند ین و محدود دوبعدی و سه بعدی برای شیه سازی فرایند غلتکزنی ارائه دهند. از آنجایی که در مدل دوبعدی امکان جریان ماده در راستای محیطی وجود ندارد دقت مدل سازی کاهش می باد. در سوی دیگر نیز آنها شبیه سازی

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 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 ماده¹ به نرمافزار آباکوس معرفی خواهد شد. به منظور ارزیابی مدل ماده استفاده شده، مقایسهای بین نتایج انجام خواهد شد.

2- تعريف 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 1/1 میلیمتر اساس انتخاب این نوع آلیاژ آلومینیوم بالا بودن نسبت استحکام به وزن و است اساس انتخاب این نوع آلیاژ آلومینیوم بالا بودن نسبت استحکام به وزن و به کارگیری کشیدگی سنج² از میله مورد مطالعه، ضریب کشسانی برابر به کارگیری کشیدگی 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 ^د برای اندازه گیری تنش پسماند قابل استفاده نیست. در ضمن روشهای مخرب دیگر همچون برشسیم⁴و روشهای غیرمخرب مانند پراش نوترونی⁶یا امواج فراصوتی⁶ نه تنها 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 شبیه سازی اجزاء محدود برای تعیین تنش پسماند یکی از روشهای غیرمخرب اندازه گیری تنش پسماند است که نهتنها تخریبی روی قطعه به جا نمی گذارد 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



شكل 1 فرآيند غلتكزني عميق آلومينيوم 7075

3 - شبیهسازی اجزاء محدود

3 -1- روند شبيهسازی

شبیه سازی اجزاء محدود عملیات غلتک زنی عمیق با استفاده از نرم افزار آباکوس 6.10 انجام شده است. در شبیه سازی ها از مدل سه بعدی استفاده شده است تا هند سه مسئله به واقعیت فرایند نزدیک باشد. به منظور کاهش تعداد المان ها و زمان حل، هند سه نمونه به صورت قطاعی از یک میله استوانه ای در نظر گرفته شده است. در شکل 2 مدل هند سی در نظر گرفته شده برای شبیه سازی نشان داده شده است. ابعاد در نظر گرفته شده برای مدل هند سی نیز در جدول 1 ارائه شده است. در شبیه سازی ها ساچمه به صورت صلب فرض شده و نیز از سرعت دورانی نمونه صرف نظر شده است. شبیه سازی به صورت صریح¹ با استفاده از مقیاس جرم² 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 بندی³ 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 مش بندی شده قطاعی از میله و ساچمه نشان داده شده است.

در شبیه سازی ها 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



-1+

3- Meshing



جدول 1 ابعاد هندسه مدل اجزاء محدود



شكل 3 مدل مونتاژ شده و مشبندى شده نمونه و ساچمه

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

بارگذاری در شبیه سازی عملیات غلتکزنی به صورت کنترل جابجایی اعمال شده است به گونه ای که ابتدا ساچمه سطح نمونه را به اندازه مورد نظر فشرده کرده و سپس با حرکت دورانی نمونه و جابجایی عرضی ساچمه عملیات غلتکزنی شبیه سازی شده است. به این ترتیب گرچه در عمل میله چرخیده و غلتک ثابت است ولی حرکت آن ها نسبت به هم با شبیه سازی یکسان است میزان نفوذ ساچمه و میزان جابجایی عرضی (گام پیشروی) از جمله متغیرهای فرایند غلتکزنی می باشند که در هر شبیه سازی تغییر می-یابند و در بخش 4-2 بررسی خواهند شد.

یکی از موارد مهم در شبیه سازی اعمال شرایط مرزی است تا مدل سازی مسئله با واقعیت همخوانی داشته باشد. همان طور که در شکل 4 نشان داده r مسئله با واقعیت همخوانی داشته باشد. همان طور که در شکل 4 نشان داده شده است صفحات $0=\theta$ و $\beta=\theta$ طوری مقید شده اند که فقط در راستای r قابلیت جابجایی داشته باشند و صفحات 0=2 و I=1 نیز به صورت صفحات آزاد در نظر گرفته شده اند. هم چنین، صفحه R=a نیز فقط دارای حرکت دورانی حول محور I است.

3 – 2 – مدل ماده

با توجه به این که شبیه سازی ها نشان می دهد در فرایند غلتکزنی عمیق به ماده یک چرخه بار گذاری فشاری -کششی وارد می شود، برای بررسی رفتار چرخهای این ماده، آزمایش چرخهای بر روی نمونه هایی که بر اساس استاندارد خستگی کم چرخه 606 تهیه شدهاند صورت پذیرفته است. آزمایش ها با استفاده از کشیدگی سنج و به صورت کرنش کنترل با بازه فرایند غلتکزنی، ماده ابتدا تحت فشار قرار می گیرد در آزمایش نیز بارگذاری با اعمال نیروی فشاری آغاز گردیده است. در شکل 5 منحنی تنش -کرنش آزمایشی در بارگذاری چرخه ای 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

¹⁻ Explicit 2- Mass scale



شکل 4 شرایط مرزی اعمال شده در شبیه سازی 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 می گردند [8]:

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

در رابطه (1)، _t*i و γ* ثابتهای ماده میباشند که از آزمایش به دست میآیند، همچنین dp کرنش تجمعی مومسان¹است و طبق رابطه زیر بیان میشود:

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

با انتگرال گیری از رابطه (1) در حالت بار گذاری تکمحوره و اضافه نمودن تنش تسلیم اولیه، تنش در هر نقطه به صورت زیر نوشته می شود [8]:

$$\sigma_{x} = \sigma_{0} + \sum_{i=1}^{4} \frac{C_{i}}{\gamma_{i}} \Big[\mathbf{1} - e^{-\gamma_{i}(\varepsilon_{x}^{p})} \Big]$$

که در رابطه فوق، σ_0 تنش تسلیم نخستین و \mathcal{E}^p_{χ} مقدار کرنش مومسان در هر نقطه از نمودار تنش-کرنش است.

(3)

ثابتهای این مدلماده غالباً از نیم چرخه کششی حلقه پایدار² تعیین می شوند [12] ولی خادمی و همکاران [13] نشان دادند در مواردی که ماده تنها یک یا چند چرخه بارگذاری را تجربه می کند باید ثابتها از نیم چرخههای ابتدایی منحنی پسماند³ 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 نیم چرخه فشاری و نخستین نیم چرخه 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 خطی است و نیز مقادیر مطلق تنش نهایی کششی و فشاری تفاوت محسوسی دارند (حدود 200 مگاپاسکال)، مدل ماده 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 مینمایند که نشاندهنده توانایی الگوی سختشوندگی شابوش با چهار تنش

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 اندازه گیری برای یکی از مسیرها که در امتداد خط AB است نشان داده شده است.

جدول 2 ثابتھای مدل شاہوش			
نيمچرخه فشارى	نيمچرخه كششى	ثابتها	
234.4	238.3	تنش تسليم (مگاپاسکال)	
383641	255122/5	مگاپاسکال) <i>(</i> مگا	
15304/8	3094	γ1	
19156/6	45050/3	مگاپاسکال) <i>C</i> 2	
861/2	397/6	γ2	
4313	5008/4	مگاپاسکال) <i>(</i> مگاپاسکال	
0	0	γ ₃	
145571	182011	مگاپاسکال) <i>C</i> 4	
7077/1	3055/7	γ4	

2- Stabilized cycle

¹⁻ Comulativeplastic strain

³⁻ Hysteresis curve

4-1- صحتسنجی نتایج شبیهسازی عددی

برای صحتسنجی شبیه سازی های 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 میله ای فولادی با قطر 21/5 میلی متر 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:

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

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

به منظور مقایسه شبیه سازی های اجزاء محدود این مقاله با نتایج تجربی و شبیه سازی های ین و همکاران [5]، از مدل ماده ارائه شده در بخش 2-3 استفاده شده است به نحوی که ثابت های الگوی سخت شوندگی شابوش با چهار تنش بازگشتی برای فولاد ذکر شده به دست آمده اند. سایر موارد به کار گرفته شده در شبیه سازی مانند ابعاد نمونه و ساچمه در جدول 4 آورده شده است.

برای اعتبارسنجی روند شبیهسازی و مدل ماده 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. همان طور 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 در حالی که شبیهسازی ین و همکاران تنش پسماند روی سطح را کششی پیشبینی میکند.

با توجه به نمودارهای شکل 8، نتایج شبیه سازی 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 شبیه سازی حاضر نسبت به شبیه سازی ین و همکاران تنش پسماند روی سطح و عمق تغییر علامت تنش پسماند را بهتر پیش بینی می کند. با توجه به شکل های 7 و 8 می توان نتیجه گرفت که شبیه سازی می تواند تنش پسماند در عمق بیشتری از قطعه را نمایان سازد در حالی که روش های معمول تجربی اندازه گیری 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

جدول3 خواص مکانیکی و ثابتهای رابطه 4 برای فولاد AISI 52100

مقدار	خواص ماده
210	ضریب ارتجاعی(گیگا پاسکال)
0/3	ضريب پواسون
300	С
0/3	п
0/1	т
2500	(مگاپاسکال) $ar{\sigma}_y$
0/01	$\dot{\varepsilon}_p$

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 مرجع¹ 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. همان طور که در نمودار شکل 9 مشخص است با استفاده از شبیهسازی حاضر میانگین نیرو در فرایند غلتکرنی عمیق برابر با 1131 نیوتن به دست 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 مدل ماده به کار گرفته شده از اعتبار مناسبی برای پیش بینی تنش پسماند ماده در فرایند غلتکرنی عمیق برخوردار است.

4-2- بررسى توزيع 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 شبیه سازی ها متغیرهای فرایند غلتکزنی مطابق جدول 5 در نظر گرفته شدهاند.



¹⁻ Reference Point

مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1394، دورہ 15، شمارہ 7

DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.47.5





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. همان طور که در نمودارهای شکلهای 13 و 14 مشخص است با افزایش گام پیشروی، تنش پسماند فشاری در راستای شعاعی (S11) از مقدار 213 به مقدار 327 مگاپاسکال افزایش یافته در حالی که 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 می توان روی هم افتادن نواحی کششی اطراف ساچمه بر نواحی فشاری گام قبلی دانست. تنش پسماند در راستای محوری (S33) با افزایش گام تغییر



شکل 9 مقایسه نیروی فرایند غلتکزنی عمیق

4-2-1- تأثير قطر ساچمه بر توزيع 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 شبیه سازی ها یکسان در نظر گرفته شده است. در نمودارهای شکل های 10 تا 12 توزیع تنش پسماند در عمق قطعه در سه راستای شعاعی (S11)، محیطی (S22) و محوری (S33) نشان داده شده است.

همان طور 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 150 - مگاپاسکال افزایش مییابد. هم پیماند فشاری از حدود 150 - مگاپاسکال افزایش مییابد. هم میلیمتر تا 100 - مگاپاسکال افزایش مییابد. می تا میماند فشاری از 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

زیادی نداشته است.

4-2-3- تأثير عمق نفوذ بر توزيع تنش پسماند

به منظور بررسی اثر عمق نفوذ در عملیات غلتکزنی بر روی توزیع تنش یسماند، شبیه سازی در دو حالت با عمق های 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. همان طور که از شکل ها مشخص است با افزایش عمق نفوذ تنش یسماند 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 می یابد.

4-2-4- تأثير تعداد عبور بر توزيع 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. همان طور 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 بيشترين افزايش مربوط به تنش پسماند محيطي است. تنش پسماند فشاري 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 می شود 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 شنی¹ و مقدار مقیاس جرم² مىبايست نسبت انرژىها كنترل شود. معمولاً به منظور بررسى همگرايى نسبت انرژی مصنوعی به انرژی داخلی و برای کنترل مقدار مقیاس جرم نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی بررسی می شوند. شکل های 19 و 20 تغییر این نسبتها با زمان برای یک حالت شبیهسازی را نشان میدهند. این نسبتها در تمامی شبیهسازیها کنترل شدهاند. همان طور 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 قبولي قرار دارند [16].

5- نتيجه گيري

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 سخت شوندگی ماده استفاده شده است. صحت سنجی روش عددی پیشنهادی





مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1394، دوره 15، شماره 7

¹⁻ Hourglass 2- Mass scaling factor





با مقایسه نتایج آن با آزمایش و شبیه سازی های پیشین صورت پذیرفت. پس از بررسی چگونگی توزیع تنش پسماند با عوامل اشاره شده، نتایج زیر قابل استخراج است:

- 1- با افزایش قطر ساچمه تنش پسماند فشاری در دو راستای محیطی و محوری بر روی سطح اندکی افزایش می یابد ولی تنش پسماند کششی در عمق قطعه به میزان کمی کاهش می یابد.
- 2- با کاهش گام پیشروی هم پوشانی 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 می گردد.
- 4- با افزایش تعداد عبور ساچمه بر روی نمونه تنش پسماند فشاری روی سطح افزایش یافته و به حالت اشباع خود نزدیک تر می شود. در ضمن سطح غلتکزنی نیز یکنواخت تر می گردد.
- 5- الگوی مومسان شابوش میتواند رفتار ماده در بارگذاریهای کمچرخه مانند فرایند غلتکزنی را به خوبی پیش بینی نماید.
- استفاده از شبیه سازی اجزاء محدود در اندازه گیری توزیع تنش پسماند به جای روش های تجربی علاوه بر هزینه پایین، زمان کم و در دسترس بودن، عمق بیشتری از تنش پسماند را نیز نمایان می-سازد.

6- فهرست علائم

ثابت الگوی ماده شابوش (پاسکال)	<i>C</i> ثابت الگوی ماده شابوش
--	--------------------------------

- d قطر ساچمه غلتک زن (میلی متر)
 - ِ _ گام پشروی **(**میلی متر)
 - P عمق نفوذ (ميكرو متر)
 - تعداد عبور

علائم يونانى

ى د الگوى شابوش	g	
ان	كرنش مومس	εŗ

7- مراجع

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

C

- [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

زمان (ثانيه)

شکل 20 نمودار نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی

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.

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