ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir



تأثير رفتار كارسختي فلز در تحليل تئوري و تجربي فرآيند فورج قالب باز ورق چند لايه

على پرويزى*1، اميد رضاپور2، محمدعلى صغرى2

1 - استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- كارشناسيارشد مهندسي مكانيك، دانشگاه آزاد اسلامي واحد علوم و تحقيقات، تهران

* تېران، صندوق پستى aliparvizi@ut.ac.ir ،11155-4563

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این مقاله، ابتدا با استفاده از روش قاچی که روشی مناسب برای حل تحلیلی مسائل شکلدهی می باشد، تأثیر در نظر گرفتن اثرات کارسختی در مدل تحلیلی فرآیند فورج قالب باز ورق سهلایه مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارت دیگر، با فرض مدل اصطکاک کولمب و در دوحالت با درنظر گرفتن و بدون درنظر گرفتن اثرات کرنش سختی، فرآیند فورج قالب باز ورق سهلایه تحلیل و بررسی شده است. سپس این فرآیند در	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 31 فروردین 1395 پذیرش: 26 اردیبهشت 1395 ابائه در سایت: 23 بر 1395
نرمافزار المانمحدود آباکوس شبیهسازی و نتایج آن برای صحهگذاری نتایج تحلیل قاچی انجام شده، استفاده میشود. نتایج نشان میدهد که با	کلید واژگان:
درنظر گرفتن رفتار کارسختی فلز، ضمن بهدستآوردن نتایج دقیقتر، مقدار تنش و نیروی بیشتری برای شکلدهی حاصل میشود. علاومبر	فورج قالب باز
مطالعات تحلیلی، برای بررسی امکان ساخت ورق چندلایه با روش فورج، آزمایش فورج قالب باز ورق دولایه انجام و یک ورق دولایه از جنس	ورق چندلایه
ألومينيوم و مس ساخته شده است. نتايج أزمايش.ها نشاندهنده كيفيت مناسب اتصال دو ورق ألومينيم و مس به يكديگر از طريق عمليات فورج	روش قاچی
است؛ بنابراین میتوان از این روش برای تولید ورق،های چند لایه در صنایع مختلف استفاده کرد.	شبیهسازی المان محدود کارسختی

Work hardening effect in theoretical and experimental analyses of clad sheet forging process

Ali Parvizi^{*1}, Omid Rezapour², Mohammad Ali Safari²

1- School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* P.O.B. 11155-4563 Tehran, Iran, aliparvizi@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	Abstract
Original Research Paper Received 19 April 2016 Accepted 15 May 2016 Available Online 13 July 2016	The slab method can rapidly predict the rolling force and torque in metal forming processes and a large amount of CPU time can be saved. Up to now, the work hardening effect has not been considered in the slab analysis for forging process of double-layer clad sheet. Evaluation of considering or eliminating the work hardening effect on material behavior in the slab analysis of three layer clad sheet forging process
Keywords: Open die forging Clad sheet Slab method FEM Simulation Work hardening	and investigating the subsequent effects on the process outputs are novel subjects considered in this paper. The pressure distribution as well as the forging force is investigated for both conditions. In addition, three layer clad sheet forging process is entirely simulated using ABAQUS/Explicit software. The results show that considering the work hardening effect on material behavior will result into having higher stresses and forces in the process. Moreover, the results of considering the work hardening effect have better agreements with those from simulation. Finally, some experiments were performed on forging process can be used for producing multi-layer clad sheets in various industries.

1-مقدمه

اجزای محدود³ از جمله روشهایی است که برای تحلیل فرآیند فورج و نورد ورقهای چند لایه استفاده میشوند. با فرض مدل اصطکاک برشی ثابت⁴، هوسو و تیزو [1] فرآیند فورج قالب

باز ورق دولایه را در حالت کرنش صفحهای با به کارگیری دو روش تحلیلی کران بالا و قاچی مورد بررسی قرار دادند. با درنظر گرفتن اثرات کشش ورق از جلو و عقب، یانگ و همکاران [2] اثرات فشار نورد نامتقارن را از طریق ایجاد یک مدل کرنش صفحهای بر پایه روش قاچی مورد ارزیابی و بررسی قرار دادند. تیزو و هانگ [3] برای دستیابی به حداقل ضخامت قابل حصول، ورقهای چند لایه با خواص ویژهای نظیر استحکام بالا، هدایت الکتریکی بالا، مقاومت بالا در برابر خوردگی، جرم و چگالی پایین، به طور گسترده در صنایع نظامی، هوا فضا و خودروسازی استفاده میشوند. روشهای مختلفی برای ساخت و شکلدهی ورقهای چند لایه وجود دارد که نورد، فورچ، تفجوشی و کشش عمیق برخی از این موارد است. در طی سالهای گذشته، تحقیقات زیادی در زمینه تحلیل و ساخت این ورقها با استفاده از روش نورد به انجام رسیده، اما تحقیقات انجام گرفته در زمینه تولید این ورقها با استفاده از روش فورج بسیار محدود بوده است. روش قاچی¹، روش کران بالا² و روش

¹ Slab method

A. Parvizi, O. Rezapour, M. A. Safari, Work hardening effect in theoretical and experimental analyses of clad sheet forging process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 43-50, 2016 (in Persian)

² Upper bound method

³ Finite element method (FEM) ⁴ Constant shear friction

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

 $h_1 \frac{dq_1}{dx} - \tau_1 + \tau_{21} = \mathbf{0}$

 $h_2 \frac{dq_2}{dx} - \tau_{21} - \tau_{23} = 0$

 $h_3 \frac{dq_3}{dx} + \tau_{\mathbf{23}} \cdot \tau_{\mathbf{3}} = \mathbf{0}$

 $h = h_1 + h_2 + h_3$

h $\frac{dq}{dx}$ - $(\tau_1 + \tau_3) = 0$

 $hdq = h_1 dq_1 + h_2 dq_2 + h_3 dq_3$

1-2- حالت 1: معيار تسليم بدون درنظر گرفتن اثر كرنشسختى

نمای کلی فرآیند فورج قالب باز ورق سهلایه در شکل 1 نمایش داده شده

است. انجام فرآیند در حالت سرد (دمای اتاق) فرض شده و از تغییرات دما در

حین فرآیند صرفنظر می گردد. همچنین فرض کرنش صفحه ای در این تحلیل

برقرار است. جنس لایههای 1 و 3 یکسان و مبدأ مختصات در وسط سطح

حرکت میکند. از معیار تسلیم فونمایزز²و مدل اصطکاک کولمب در این

تحليل استفاده مىشود و جنس ورقها در حالت الاستيك- پلاستيک ايدهآل ُ

است. در شکل 1، P معرف نیرو و p معرف تنش عمودی یا فشار است. مطابق

شکل 2، برای هر لایه، یک المان به پهنای dx درنظر گرفته شده و معادله

تعادل افقی برای هر کدام نوشته می شود. معادلات تعادل افقی برای لایه های

با توجه به روابط (5,4)، سه معادله تعادل افقى با هم جمع مىشوند تا يک

با استفاده از معیار تسلیم فونمایزز در حالت کرنش صفحهای، معیار تسلیم

معادله برای کل ورق سه لایه بهصورت رابطه (6) بهدست آید.

هر لایه با صرفنظر از تنشهای برشی بهصورت روابط (7-9) است.

قالبها صلب فرض شدهاند و قالب بالا با سرعت ثابت به طرف پایین

زیرین لایهی سوم قرار گرفته است.

2،1 و 3 به ترتيب به صورت روابط (1-3) است.

که در روابط (5,4) به شرح زیر است.

(1)

(2)

(3)

(4)

(5)

(6)

مطالعهای را با استفاده از روش قاچی انجام دادند. فرهادنیا و سلیمی [4] با درنظر گرفتن یک ماده الاستوپلاستیک با خاصیت کرنش صفحهای، اقدام به تحلیل و اصلاح فرآیند نورد نامتقارن با روش قاچی کردند. سلیمی و ساسانی [5] با درنظر گرفتن شرایط کلی نورد نامتقارن یعنی قطر، سرعت و شرایط اصطکاکی متفاوت غلتکها، مدل تحلیلی اصلاح شدهای بر پایه روش قاچی و کرنش صفحهای برای تحلیل خصوصیات فرآیند و پیشبینی انحناء ورق ارائه کردند. سلیمی و کدخدایی [6] با درنظر گرفتن تنش برشی و عمودی غیریکنواخت در تحلیل قاچی، مدلی تئوری برای تحلیل کرنش صفحهای نورد نامتقارن ورق ارائه كردند. هوانگ و تيزو [7] فرآيند نورد نامتقارن را از طريق آزمایش تجربی و درنظر گرفتن تنشهای برشی و نرمال یکنواخت در تحلیل قاچی مورد بررسی قرار دادند. هانگ و همکاران [8] فرآیند نورد متقارن ورق چند لایه را با درنظر گرفتن دو مدل اصطکاکی برشی ثابت و کولمب مورد تحلیل قرار داده و با هم مقایسه کردند. هوانگ و تیزو [9] از یک مدل تحلیلی بر پایه روش قاچی برای ارزیابی زمینه تنش در طول تماس در نورد نامتقارن سرد و گرم ورق فلزی دو لایه بهره جستند. تیزو و هانگ [10] از مدل اصلاح شدهای برای تحلیل تنش در طول فاصله نوردکاری برای نورد نامتقارن استفاده كردند. فرآيند نورد نامتقارن جهت اتصال ورق دو لايه از طريق 4 ناحیه توسط پن و همکاران [11] مورد تحلیل قرار گرفت، همچنین کومار و دیکسیت [12] فرآیند نورد ورق را توسط روش قاچی و با درنظر گرفتن اثرات کرنش سختی و اصطکاک مورد تحلیل و بررسی قرار دادند.

سگاوا و کاوانامی [13] فرآیند نورد نامتقارن دو لایه را با به کار بردن روش المان محدود پلاستیک صلب، شبیه سازی کردند. کیم و همکاران [14] به کمک نرمافزار آباکوس، ساختار لایههای کامپوزیتی تغییر فرم یافته را بهصورت فرآیند نورد متقارن سهلایه شبیهسازی و تحلیل کردند. با درنظر گرفتن تاثیرات بارگذاری در ابتدا و انتهای فرآیند، داوسون و تامسون [15] اقدام به شبیهسازی فرآیند نورد سرد کردند. نوویک و همکاران [16] توسط نرمافزار آباکوس¹، فرآیند نورد ورق سهلایه را شبیهسازی کردند تا تأثیر هندسه ورق و غلتک را روی تمرکز کرنش در ورق بررسی کنند.

پیشینه پژوهش در زمینه ساخت ورقهای چند لایه بسیار محدود است. هوانگ و همکاران [17] ورق دولایه از جنسهای آلومینیوم، مس و فولاد نرم را توسط نورد نامتقارن تولید کردند. مامالیس و همکاران [18] ورقهای دولایه و سهلایه از جنسهای نقره، مس و روی را توسط روش انفجاری و نورد ساختند. دانشمنش و کریمی [19] ورق سهلایه از جنسهای آلومینیوم، فولاد نرم و مس را با روش نورد تولید کردند.

در این مقاله، به منظور امکان بررسی تأثیرات کارسختی بر خروجی عملیات، فرآیند فورج قالب باز ورق سهلایه با درنظر گرفتن و بدون درنظر گرفتن اثرات کرنش سختی در رفتار مواد از طریق تحلیل قاچی مورد مطالعه قرار می گیرد. سپس فرآیند فورج ورق سه لایه در نرمافزار المان محدود آباکوس شبیهسازی و نتایج آن برای صحه گذاری نتایج تحلیلی استفاده می شود، همچنین برای بررسی امکان ساخت ورق چندلایه با روش فورج، آزمایش فورج قالب باز ورق دولایه انجام و یک ورق دولایه از جنس آلومینیوم و مس ساخته می شود. نتایج آزمایش ها نشان دهنده کیفیت مناسب اتصال دو ورق آلومينيم و مس به يكديگر از طريق عمليات فورج است.

2- حل تحليلي با روش قاچي

Fig. 1 Schematic illustration for compression of three-layer sheet with Coulomb friction model



¹ ABAQUS

شکل 1 فرآیند فورج قالب باز ورق سه لایه با مدل اصطکاکی کولمب

² Von Mises 3 Elastic-perfect plastic

مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1395، دوره 16،شماره 7



Fig. 2 Stress states of elements for three layer

شکل 2 حالت تنش در المانهای هر سه لایه

$$p + q_1 = 2k_1 \qquad 1$$
 لايه (7)

$$p + q_2 = 2k_2$$
 (8)

$$p + q_3 = 2k_3$$
 k_3 (9)

معيار تسليم هر لايه را در ضخامت لايه ضرب نموده و سه معيار تسليم با هم جمع می شوند. سپس حاصل بر ضخامت کل ورق (h) تقسیم می شود تا یک معيار تسليم كلى براى ورق سەلايه بەصورت روابط (11,10) بەدست آيد.

$$p + q = 2\alpha k_1 \tag{10}$$

$$\alpha = \beta + \gamma \frac{k_2}{k_1} + (1 - \beta - \gamma) \frac{k_3}{k_1},$$

$$\beta = \frac{h_1}{h}, \gamma = \frac{h_2}{h}$$
(11)

اگر از دو طرف رابطه (10) دیفرانسیل گرفته شود، مشخص می شود که dp و dq برابر و قرینه یکدیگر به صورت رابطه (12) هستند.

$$dq = -dp \tag{12}$$

تنشهای برشی در مدل اصطکاک کولمب ثابت به صورت رابطه (13) است.

$$\frac{dp}{dx} + \left(\frac{\mu_1 + \mu_3}{h}\right)p = 0 \tag{14}$$

رابطه (14) یک معادله دیفرانسیل خطی مرتبه اول است که با حل آن، رابطه توزيع فشار در طول ناحيه تماس سنبه با ورق بهصورت رابطه (15) بهدست مىآيد.

$$\mathbf{p} = c \exp\left[-\frac{\mu_1 + \mu_3}{h} x\right] \tag{15}$$

مقدار ثابت c با استفاده از شرایط مرزی ورق در لبهها بهصورت روابط (17,16) بەدست مىآيد.

$$x = \frac{b}{2} \to q = \mathbf{0} \to p = 2\alpha k_1 \tag{16}$$

$$c = 2\alpha k_1 \exp\left[\frac{\mu_1 + \mu_3}{h} \frac{b}{2}\right]$$
(17)

با جایگذاری مقدار ثابت c در رابطه (15)، رابطه کامل توزیع فشار برای ورق سەلايە بە صورت رابطە (18) بەدست مىآيد.

$$\frac{p}{2k_1} = \alpha \exp\left[\frac{\mu_1 + \mu_3}{h} \left(-x + \frac{b}{2}\right)\right]$$
(18)

روابط مربوط به توزيع تنشهای افقی نيز با استفاده از معيار تسليم (روابط (10-7)) و رابطه توزيع فشار، به صورت روابط (19-21) بهدست مي آيند.

$$\frac{q}{\mathbf{2}k_{I}} = \alpha - \frac{p}{\mathbf{2}k_{I}} = \alpha \left(\mathbf{1} - \exp\left[\frac{\mu_{\mathbf{1}} + \mu_{\mathbf{3}}}{h} \left(-x + \frac{b}{\mathbf{2}} \right) \right] \right)$$
(19)

$$\frac{q_{1}}{2k_{1}} = 1 - \frac{p}{2k_{1}}$$
$$= 1 - \alpha \exp\left[\frac{\mu_{1} + \mu_{3}}{h}\left(-x + \frac{b}{2}\right)\right] = \frac{q_{3}}{2k_{3}}$$
(20)

$$\frac{\mathbf{v}_{\mathbf{z}}}{\mathbf{z}k_{\mathbf{z}}} = 1 - \frac{\mathbf{p}}{\mathbf{z}k_{\mathbf{z}}} = 1 - \left(\frac{\mathbf{k}_{\mathbf{1}}}{k_{\mathbf{z}}}\right) \frac{\mathbf{p}}{\mathbf{z}k_{\mathbf{1}}}$$
$$= 1 - \frac{k_{\mathbf{1}}}{k_{\mathbf{z}}} \left(\alpha \exp\left[\frac{\mu_{\mathbf{1}} + \mu_{\mathbf{3}}}{h}\left(-x + \frac{b}{\mathbf{z}}\right)\right]\right)$$
(21)

به دلیل یکسان بودن جنس لایههای 1 و3 ($k_1 = k_3$)، روابط توزیع تنش افقی این دو لایه با هم برابر می شوند (رابطه (20)). مقدار نیروی مورد نیاز برای عمليات فورج ورق سه لايه، با انتگرال گيرى از رابطه توزيع فشار بهصورت رابطه (22) بەدست مىآيد.

$$P = 2 \int_{0}^{\frac{b}{2}} p dx = -\frac{4 k_1 a h}{\mu_1 + \mu_3} \left(1 - \exp\left[\frac{(\mu_1 + \mu_3)b}{2h}\right] \right)$$
(22)

همان طور که ملاحظه می شود فرمول نیرو و روابط توزیع تنش در مدل اصطكاكي كولمب (معيار تسليم بدون تنش برشي)، فقط وابسته به ضرايب اصطکاک ورق با قالبهای بالا و پایین $(\mu_{3} \, e_{\pi})$ است؛ بنابراین در این مدل اگر تعداد لایه ها بیشتر شود فقط ضرایب اصطکاک لایه اول و آخر با قالبهای بالا و پایین در روابط ظاهر می شوند و ضرایب اصطکاک بین لایه های وسط تأثیری در معادلات و روابط نخواهند داشت.

2-2- حالت 2: معيار تسليم با در نظر گرفتن اثر كرنشسختى

یکی از فرضیات یادشده این بود که ماده در حالت الاستیک- پلاستیک ايدهآل قرار دارد، به عبارت ديگر نمودار تنش- كرنش آن پس از تسليم، بهصورت یک خط افقی فرض می شود. این فرض در واقعیت چندان دقت ندارد، زیرا زمانی که قطعه وارد ناحیه پلاستیک شود و تغییر شکل دهد، تنش علی پرویزی و همکاران

تسلیم آن (برای ادامه تغییر شکل یا مراحل بعدی تغییر شکل) افزایش یافته و رفتار ماده سخت تر می شود. به عبارت دیگر، هرچه تغییر شکل بیشتری روی قطعه اعمال شود، رفتار قطعه سخت تر شده و تغییر شکل آن مشکل تر می گردد. در این بخش، با استفاده از رابطه بین تنش و کرنش در ناحیه پلاستیک، کرنش سختی در معیار تسلیم اعمال می شود. تئوری های مختلفی برای تعیین رابطه بین تنش و کرنش در ناحیه پلاستیک ارائه شدهاند که در این تحقیق از رابطه هولومون¹ برای این منظور به صورت (23) استفاده می گردد.

$$\sigma = C\varepsilon^n \tag{23}$$

اگر نمودار این رابطه روی محورهای لگاریتمی ترسیم شود، C برابر با مقدار تنش به ازای کرنش 1 و n برابر با شیب نمودار خواهد بود. در رابطه بالا به جای کرنش، کرنش معادل (٤) قرار می گیرد که عبار تست از روابط (25,24).

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_y, \ \varepsilon_y = \ln \frac{h_0}{h}$$
(24)

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln\left(\frac{h_0}{h}\right) \tag{25}$$

در روابط بالا، h_0 ضخامت اولیه ورق و h ضخامت نهایی آن است. با جای گذاری رابطه (25) در رابطه (23) بهدست میآید.

$$\sigma = C \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^n \left(\ln\left(\frac{h_0}{h}\right)\right)^n \tag{26}$$

با استفاده از معیار تسلیم فون مایزز در حالت کرنش صفحهای، معیار تسلیم هر لایه با صرف نظر از تنش برشی بهصورت روابط (27-29) است.

$$p + q_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{01} \tag{27}$$

$$p + q_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{02} \tag{28}$$

$$p + q_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{03} \tag{29}$$

اگر رابطه (26) بهجای تنش تسلیم (σ_0) در معیار تسلیم هر لایه جایگذاری شود، روابط (30-32) بهدست میآید.

$$p + q_{\mathbf{1}} = C_{\mathbf{1}} \left(\frac{\mathbf{2}}{\sqrt{\mathbf{3}}}\right)^{n_{\mathbf{1}}+1} \left(\ln\left(\frac{h_{\mathbf{0}\mathbf{1}}}{h_{\mathbf{1}}}\right)\right)^{n_{\mathbf{1}}}$$
(30)

$$p + q_2 = C_2 \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n_2+1} \left(\ln\left(\frac{h_{02}}{h_2}\right)\right)^{n_2}$$
(31)

$$p + q_3 = C_3 \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n_3+1} \left(\ln\left(\frac{h_{03}}{h_3}\right)\right)^{n_3}$$
(32)

برای بهدست آوردن یک معیار تسلیم برای کل ورق سهلایه، ابتدا معیار تسلیم هر لایه را در ضخامت لایه ضرب کرده و سپس سه معیار تسلیم با هم جمع میشوند. با تقسیم رابطه بهدستآمده بر ضخامت کل ورق (h) و با استفاده از روابط (33-37)، معیار تسلیم ورق سه لایه بهدست میآید.

$$p + q = \alpha \tag{33}$$

$$\alpha = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \tag{34}$$

$$\lambda_{1} = \frac{h_{1} C_{1}}{h} \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n_{1}+1} \left(\ln\left(\frac{h_{01}}{h_{1}}\right)\right)^{n_{1}}$$
(35)

1 Hollomon

$$\lambda_2 = \frac{h_2 C_2}{h} \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n_2+1} \left(\ln\left(\frac{h_{02}}{h_2}\right)\right)^{n_2}$$
(36)

$$\lambda_3 = \frac{h_3 C_3}{h} \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{h_3+1} \left(\ln\left(\frac{h_{03}}{h_3}\right)\right)^{h_3}$$
(37)

اگر از دو طرف رابطه (33) دیفرانسیل گرفته شود، مانند قسمت پیشین مشخص می شود که dp و pd برابر و قرینه یکدیگر هستند و به همین ترتیب، ادامه تحلیل نیز مانند قسمت پیشین انجام می شود و در نهایت رابطه توزیع فشار به صورت رابطه (38) به دست می آید.

$$\frac{p}{2k_1} = \frac{\alpha}{2k_1} \exp\left[\frac{\mu_1 + \mu_3}{h}\left(-x + \frac{b}{2}\right)\right]$$
(38)

باید توجه شود که در رابطه بالا، پارامتر α از رابطه (34) بهدست میآید. روابط مربوط به توزیع تنشهای افقی نیز با استفاده از معیار تسلیم (روابط (30-(33)) و رابطه توزیع فشار، به صورت روابط (40-34) بهدست میآیند.

$$\frac{q}{2k_1} = \frac{\alpha}{2k_1} \left(1 - \exp\left[\frac{\mu_1 + \mu_3}{h} \left(-x + \frac{b}{2} \right) \right] \right)$$
(39)

$$\frac{q_{1}}{2k_{1}} = \frac{q_{3}}{2k_{3}} = \frac{C_{1}}{2k_{1}} \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n_{1}+1} \left(\ln\frac{h_{01}}{h_{1}}\right)^{n_{1}} - \frac{\alpha}{2k_{1}} \exp\left[\frac{\mu_{1}+\mu_{3}}{h}\left(-x+\frac{b}{2}\right)\right]$$
(40)

$$\frac{q_2}{2k_2} = \frac{C_2}{2k_2} \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n_2 - 1} \left(\ln\frac{h_{02}}{h_2}\right)^{n_2} - \frac{\alpha}{2k_2} \exp\left[\frac{\mu_1 + \mu_3}{h} \left(-x + \frac{b}{2}\right)\right]$$
(41)

مقدار نیروی مورد نیاز برای عملیات فورج ورق سهلایه، با انتگرالگیری از رابطه توزیع فشار (42) بهدست میآید.

$$P = 2 \int_{0}^{\frac{b}{2}} p dx = -\frac{2\alpha h}{\mu_{1} + \mu_{3}} \left(1 - \exp\left[\frac{(\mu_{1} + \mu_{3})b}{2h}\right] \right)$$
(42)

3-شبیهسازی فرآیند با روش المانمحدود

جهت صحتسنجی نتایج حاصل از روش تحلیلی قاچی، شبیهسازی فرآیند فورج ورق سهلایه بهصورت سهبعدی در نرمافزار المانمحدود آباکوس انجام شده است (شکل 3). به دلیل این که تحلیل در حالت کرنش صفحهای انجام شده، در شبیهسازی سطوح عقب و جلوی ورقها در جهت Z محدود شدهاند تا در این جهت افزایش طول ندهند.



Fig. 3 Simulation of three layer clad sheet forging by finite element method in ABAQUS/CAE

شکل 3 شبیهسازی فرآیند فورج ورق سهلایه به روش المانمحدود در نرمافزار آباکوس

در این شبیهسازی به دلیل ساده بودن شکل ورقها، از روش مشیندی منظم¹ و المانهای مکعبی (C3D8R) استفاده شده است. هر لایه به 6600 المان تقسيم بندى شده؛ بنابراين تعداد كل المان ها برابر 19800 (و تعداد گرهها برابر 27770) است. قالبها صلب هستند و تغییرشکل نمی دهند؛ بنابراین مشبندی برای آنها تعریف نمی شود. قالب پایین ثابت درنظر گرفته شده و قالب بالا با سرعت ثابت 25 میلیمتر بر ثانیه به سمت پایین حرکت مىكند. مقدار جابهجايى قالب بالا برابر 0.8 ميلىمتر است. از تئورى هولومون برای تعریف رابطه تنش و کرنش در ناحیه پلاستیک استفاده شده تا کرنش سختی در شبیه سازی اعمال شود. مطابق جدول های 1 و 2 جنس لايه هاى 1 و 3 آلومينيوم و جنس لايه 2 مس تعريف شده كه از مرجع [11] استخراج شده است.

4-آزمايش فورج ورق دولايه

برای بررسی امکان ساخت ورق چندلایه با روش فورج، آزمایش فورج قالب باز ورق دولایه انجام شد. ابتدا سطوح ورقها که یکی آلومینیومی و دیگری مسی، توسط دستگاه سمبادهزنی است. کاملا صاف و هموار شده تا در زمان فورج، هیچ فضای خالی بین دو ورق وجود نداشته باشد. کاغذهای سمباده به شکل دایرهای و با قطر 20 سانتیمتر ابتدا از نوع دانه درشت مورد استفاده قرار گرفته و به تدریج نوع دانه ریزتر شده است.

پس از سمبادهزنی ورقهای آلومینیومی و مسی به دلیل تفاوت دمای تبلور دوباره در دو کوره مجزا به ترتیب با دماهای 480 و 750 درجه سانتی گراد قرار گرفتند. سپس ورقهای داغشده بین دو صفحه قالب در داخل یک پرس هیدرولیک 250 تن قرار گرفته و فرآیند فورج گرم قالب باز انجام

جدول 1 جنس و تنش تسليم لايهها

Fal	ole	1	Material	and	yield	stress	of	the	layers	
-----	-----	---	----------	-----	-------	--------	----	-----	--------	--

تنش تسليم (MPa)	جنس	لايەھا
77	آلومينيوم	لايەھاي 1 و 3
103	مس	لايەي 2

جدول 2 مقادیر عددی پارامترهای کرنش سختی

Table 2 Numerical quantities of strain hardening parameters

جنس	(MPa)	n
آلومينيوم	185	0.14
مس	588	0.28



Fig. 4 Scanning electron microscope

شكل 4 ميكروسكوپ الكتروني روبشي

1 Structured

5-بحث و بررسي نتايج

1-5- نتايج تحليل و شبيهسازي

نمودار توزیع فشار بهدست آمده از شبیه سازی همراه با حالتهای 1 و 2 که از روش تحلیلی قاچی بهدستآمده، در شکل 5 نشان داده شده است.

همان طور که در شکل 5 مشخص است، نمودار توزیع فشار به دست آمده از شبیهسازی به نمودار حالت 2 تحلیل نزدیک است. حالت 2 تحلیل، کرنش سختی را در معیار تسلیم درنظر می گیرد؛ بنابراین پاسخ دقیق تری ارائه مىدهد، اما حالت 1 ماده را الاستيك- پلاستيك ايده آل فرض مىكند كه در نتیجه ماده نرمتر شده و فشار بسیار کمتری، تقریبا نصف مقدار شبیهسازی را برای فورج نیازمند است.

شکلهای 6-الف، ب، ج نمودار توزیع تنش افقی بهدستآمده از شبیه سازی را همراه با حالت های 1 و 2 تحلیل قاچی، به ترتیب برای ورق سهلایه، لایههای 1 و 3 و لایه 2 نمایش میدهند. نمودار توزیع تنش افقی لايههاي 1 و 3 يكسان است، زيرا هر دو از يك جنس است. همان طور كه در شکل 6-الف) مشخص است، تنش افقی در لبههای ورق برابر صفر است، زیرا در لبهها هیچ مانعی در برابر حرکت ورق وجود ندارد.

مانند نمودار توزیع فشار، در نمودارهای توزیع تنش افقی نیز نتایج بهدستآمده از شبیهسازی به نتایج حالت 2 تحلیل نزدیک است. لایههای 1 و 3 (از جنس آلومينيوم) نسبت به لايه 2 (از جنس مس) نرمتر هستند و تمایل بیشتری به گسترش در راستای عرضی (x) دارند، اما لایه 2 از گسترش آنها جلوگیری میکند؛ بنابراین تنش افقی لایههای 1 و 3 در نزدیکی لبهها منفی است، و تحت فشار هستند (شکل 6-ب). به این ترتیب، لایه 2 سختتر از لایههای 1 و 3 است و تمایل کمتری به گسترش عرضی دارد، اما لایههای 1 و 3، لایه 2 را همراه با خود می کشند؛ بنابراین تنش افقی لایه 2 در نزدیکی لبهها مثبت و تحت کشش است (شکل 6-ج).



شکل 5 نمودار توزیع فشار برای فورج ورق سه لایه b = 80 mm, h = 5.3 mm, $\mu_1 = \mu_3 = 0.1$, $\mu_2 = 0.2$ $\beta = 0.34$, $\gamma = 0.3$, $k_1 = k_3 = 44.4$ MPa, $k_2 = 59.4$ MPa $C_1 = C_3 = 185$ MPa, $C_2 = 588$ MPa, $n_1 = n_3 = 0.14$, $n_2 = 0.28$

² Scanning electron microscope (SEM)



Fig. 7 Compression force with respect to frictional coefficient ratio شكل 7 تغييرات نيروى فورج برحسب نسبت ضريب اصطكاك

h = 5.3 mm, $\mu_2 = 0.2$ $k_1{=}\,k_3{=}\,44.4$ MPa , $k_2{=}\,59.4$ MPa

نمودار تغییرات نیروی فورج برحسب نسبت عرض به ضخامت ورق که از شبیهسازی بهدستآمده همراه با حالت 2 تحلیل قاچی در شکل 8 نمایش داده شده است. هر مقدار نسبت عرض به ضخامت ورق بیشتر می شود، یعنی ورق عریضتر و نازکتر میشود، نیروی مورد نیاز برای فورج افزایش پیدا می کند. همان طور که مشاهده می شود دو نمودار تطابق مناسبی دارند که این صحت روش قاچی ارائهشده را اثبات می کند.

2-5- نتايج آزمايش

ورق دولایه ساختهشده توسط آزمایش فورج قالب باز در شکلهای 9 نشان داده شده است، همچنین عکسهای بهدستآمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی با مقیاس های 10 و 20 میکرومتر در شکل های 10 نمایش داده شدەاند.





شكل 8 تغييرات نيروى فورج بر حسب نسبت عرض به ضخامت ورق h = 5.3 mm , $\mu_1 = \mu_3 = 0.1$, $\mu_2 = 0.2$ $k_1 = k_3 = 44.4$ MPa , $k_2 = 59.4$ MPa



(c)-(c)

Fig. 6 Horizontal stress distribution in a) three layer clad sheet, b) layers 1 and 3, c) layer 2

شکل 6 نمودار توزیع تنش افقی برای فورج الف) ورق سهلایه، ب) لایه 1 و 3، ج) لايه 2

b = 80 mm , h = 5.3 mm , $\mu_1 = \mu_3 = 0.1$, $\mu_2 = 0.2$

 $\beta = 0.34$, $\gamma = 0.3$, $k_1 = k_3 = 44.4$ MPa, $k_2 = 59.4$ MPa $C_1 {=}\ C_3 {=}\ 185 \ {\rm MPa}$, $C_2 {=}\ 588 \ {\rm MPa}$, $n_1 {=}\ n_3 {=}\ 0.14$, $n_2 {=}\ 0.28$

نمودار تغییرات نیروی فورج برحسب نسبت ضریب اصطکاک که از شبیه سازی به دست آمده، همراه با حالت 2 تحلیل قاچی، در شکل 7 نمایش داده شده است. هنگامی که نسبت ضریب اصطکاک کوچکتر از 0.5 است، دو منحنی به هم نزدیک هستند و تقریبا نیروی یکسانی ارائه میدهند؛ اما زمانی که این نسبت بزرگتر از 0.5 شود، حالت 2 تحلیل قاچی به دلیل نمایی بودن رابطه آن، با شیب زیاد افزایش پیدا کرده و از منحنی شبیهسازی دور میشود.



(لف)-(b)-(ب) Fig. 9 (a) front (b) side view of two layer clad sheet شكل 9 ورق دولايه ساختهشده توسط فرآيند فورج قالب باز الف) نما از جلو ب) نما از كنار





(b)-(b)

Fig. 10 SEM photo of Al-Cu layers in (a) 20 (b) 10 micrometer scale شكل 10 عكسهاى بهدستآمده از ميكروسكوپ الكترونى روبشى الف) مقياس 20 ميكرومتر، ب) مقياس 10 ميكرومتر

خطوط و ناهمواریهای ایجاد شده در شکل b-10 به دلیل عملیات برش ورق است که توسط سمبادهزنی برطرف میشوند. همانطور که از شکلها مشخص است، هیچ فضای خالی بین دو لایه وجود ندارد و آلومینیوم و مس کاملا به یکدیگر چسبیدهاند.

8-نتیجه گیری

نتایج اصلی بهدستآمده از مطالعه تأثیر رفتار کارسختی فلز در تحلیل تئوری و تجربی فرآیند فورج قالبباز ورق چندلایه به شرح زیر است.

- مقدار فشار و تنشهای افقی در مرکز ورق، بیشترین مقدار و در لبههای ورق، کمترین مقدار را داراست.
- لایه وسط به دلیل سخت ر بودن و تنش تسلیم بالاتر نسبت به لایه های بالا و پایین، تنش افقی کمتری را داراست.
- حالت دوم تحلیل قاچی، فشار بیشتری را نسبت حالت نخست ارائه میدهد، زیرا کرنش سختی ورق را درنظر می گیرد که سبب سخت ر شدن ورق می شود.
- با افزایش نسبت ضریب اصطکاک میان لایههای نخست و سوم و قالبها، نیروی لازم برای فورج ورق افزایش مییابد.
- با افزایش نسبت عرض به ضخامت ورق، نیروی لازم برای فورج ورق افزایش مییابد؛ به عبارت دیگر هرچه ورق عریض تر و نازک تر شود، نیروی بیشتری برای فورج آن مورد نیاز است.

7- مراجع

- H. H. Hsu, G. Y. Tzou, Two analytical models of double-layer clad sheet compression forming based on the upper bound and the slab methods, *Materials Processing Technology*, Vol. 140, No. 5, pp. 604-609, 2003.
- [2] T. Yong, G. Yan-hui, W. Z. Dong, W. G. Dong, Analysis of rolling pressure in asymmetrical rolling process by slab method, *Iron and Steel Research*, Vol. 38, No. 2, pp. 22-26, 2009.
- [3] G.-Y. Tzou, M. N. Huang, Study on the minimum thickness for the asymmetrical cold- and-hot PV rolling of sheet considering shear friction, *Materials Processing Technology*, Vol. 119, No. 4, pp. 229-233, 2001.
- [4] F. Farhatnia, M. Salimi, An analytical approach to asymmetrical hot-sheet rolling considering the effects of the shear stress and internal moment at the roll gap, *Engineering, Science and Technology*, Vol. 3, No. 4, pp. 147-163, 2011.
- [5] M. Salimi, F. Sassani, Modified slab analysis of asymmetrical plate rolling, *Engineering, Science and Technology*, Vol. 44, No. 5 pp. 1999-2023, 2002.
- [6] M. Salimi, M. Kadkhodaei, Slab analysis of asymmetrical sheet rolling, *Engineering, Science and Technology*, Vol. 150, No. 7, pp. 215-222, 2004.
- [7] Y. M. Hwang, G. Y. Tzou, Analytical and experimental study on asymmetrical sheet rolling, *Mechanical Sciences*, Vol. 39, No. 3, pp. 289-303, 1997.
- [8] M. N. Huang, G. -Y. Tzou, S. W. Syu, Investigation on comparisons between two analytical models of sandwich sheet rolling bonded before rolling, *Materials Processing Technology*, Vol. 140, No. 8, pp. 598-603, 2003.
- [9] Y. M. Hwang, G. Y. Tzou, An analytical approach to asymmetrical cold-and hot–rolling of clad sheet using the slab method, *Materials Processing Technology*, Vol. 62, No. 4, pp. 249 – 259, 1996.
- [10] G. Y. Tzou , M. N. Huang, Analytical modified model of the cold bond rolling of unbounded double-layers sheet considering hybrid friction, *Materials Processing Technology*, Vol. 140, No. 7, pp. 622-627, 2003.
- [11] S. C. Pan, M. N. Huang, G.-Y. Tzou, S. W. Syu, Analysis of asymmetrical cold and hot bond rolling of unbounded clad sheet under constant shear friction, *Materials Processing Technology*, Vol. 177, No. 5, pp. 114 -120, 2006.
- [12] D. Kumar, U. S. Dixit, A slab method study of strain hardening and friction effects in cold foil rolling process, *Materials Processing Technology*, Vol. 171, No. 7, pp. 331–340, 2006.
- [13] A. Segawa, T. Kawanwmi, Rolling-deformation characteristics of clad materials determined by model experiments and numerical simulation: Numerical simulation of clad rolling by the rigidplastic FEM, *Materials Processing Technology*, Vol. 53, No. 7, pp. 544-551, 1995.

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.15.0

877, 2006.

- [17] Y. M. Hwang, T. H. Chen, H. H. Hsu, Analysis of asymmetrical clad sheet rolling by stream function method, *Mechanical Sciences*, Vol. 38, No. 4, pp. 443-460, 1996.
- [18] A. G. Mamalis, N. M. Vaxevanidis, A. Szalay, Cold rolling of multi-layer explosively clad strips, *Mathematic Tools and Manufacturing*, Vol. 36, No. 9, pp. 1033-1044, 1996.
- [19] H. Danesh Manesh, A. Karimi Taheri, Theoretical and experimental investigation of cold rolling of tri-layer strip, *Materials Processing Technology*, Vol. 166, No. 4, pp. 163–172, 2005.
- [14] E. Y. Kim, J. Hyung, H. w. Kim, S. H. Choi, Evolution of deformation texture in Al/Al-Mg/Al composite sheets during cold-roll cladding, *Materials Science and Engineering* A, Vol. 530, No. 8, pp. 244-252, 2011.
- [15] P. R. Dawson, E. G. Tompson, Finite element analysis of steady state elasto-visco-plastic flow by the initial stress rate method, *Numerical Methods in Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 47-57, 1978.
- [16] F. Nowicke Jr, A. Zavaliangos, H. C. Rogers, The effect of roll and clad sheet geometry on the necking instability during rolling of clad sheet metals, *Mechanical Sciences*, Vol. 48, No. 5, pp. 868–