



## تأثیر رفتار کارسختی فلز در تحلیل تئوری و تجربی فرآیند فورج قالب باز ورق چند لایه

علی پرویزی<sup>1\*</sup>، امید رضاپور<sup>2</sup>، محمدعلی صفری<sup>2</sup>

1- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

\* aliparvizi@ut.ac.ir، 11155-4563 صندوق پستی تهران

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 31 فروردین 1395

پذیرش: 26 اردیبهشت 1395

ارائه در سایت: 23 تیر 1395

کلید واژگان:

فورج قالب باز

ورق چندلایه

روش قاجی

شبیه‌سازی المان محدود

کارسختی

### چکیده

در این مقاله، ابتدا با استفاده از روش قاجی که روشی مناسب برای حل تحلیلی مسائل شکل‌دهی می‌باشد، 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 دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن اثرات کرنش‌سختی، فرآیند فورج قالب باز ورق سه‌لایه تحلیل و بررسی شده است. سپس این فرآیند در نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی و نتایج آن برای صحنه‌گذاری نتایج تحلیل قاجی انجام شده، استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن رفتار کارسختی فلز، ضمن به‌دست‌آوردن نتایج دقیق‌تر، مقدار تنش و نیروی بیشتری برای شکل‌دهی حاصل می‌شود. علاوه بر مطالعات تحلیلی، برای بررسی امکان ساخت ورق چندلایه با روش فورج، آزمایش فورج قالب باز ورق دو لایه انجام و یک ورق دو لایه از جنس آلومینیوم و مس ساخته شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده کیفیت مناسب اتصال دو ورق آلومینیوم و مس به یکدیگر از طریق عملیات فورج است؛ بنابراین می‌توان از این روش برای تولید ورق‌های چند لایه در صنایع مختلف استفاده کرد.

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

Ali Parvizi<sup>\*1</sup>, Omid Rezapour<sup>2</sup>, Mohammad Ali Safari<sup>2</sup>

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

Original Research Paper  
Received 19 April 2016  
Accepted 15 May 2016  
Available Online 13 July 2016

Keywords:  
Open die forging  
Clad sheet  
Slab method  
FEM Simulation  
Work hardening

### ABSTRACT

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 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 of two layer Al/Cu clad sheet to evaluate the bonding quality of sheets. Therefore, forging process can be used for producing multi-layer clad sheets in various industries.

### 1- مقدمه

اجزای محدود<sup>3</sup> از جمله روش‌هایی است که برای تحلیل فرآیند فورج و نورد ورق‌های چند لایه استفاده می‌شوند.

با فرض مدل اصطکاک برشی ثابت<sup>4</sup>، هوسو و تیزو [1] فرآیند فورج قالب باز ورق دو لایه را در حالت کرنش صفحه‌ای با به‌کارگیری دو روش تحلیلی کران بالا و قاجی مورد بررسی قرار دادند. با در نظر 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 قاجی 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، فورج، 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 قاجی<sup>1</sup>، روش کران بالا<sup>2</sup> و روش

<sup>2</sup> Upper bound method

<sup>3</sup> Finite element method (FEM)

<sup>4</sup> Constant shear friction

<sup>1</sup> Slab method

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

**1-2- حالت 1: معیار تسلیم بدون در نظر گرفتن اثر کرنش سختی**

نمای کلی فرآیند فورج قالب باز ورق سه لایه در شکل 1 نمایش داده شده است. انجام فرآیند در حالت سرد (دمای اتاق) فرض شده و از تغییرات دما در حین فرآیند صرف نظر می گردد. همچنین فرض کرنش صفحه ای در این تحلیل برقرار است. جنس لایه های 1 و 3 یکسان و مبدأ مختصات در وسط سطح زیرین لایه ی سوم قرار گرفته است.

قالب ها صلب فرض شده اند و قالب بالا با سرعت ثابت به طرف پایین حرکت می کند. از معیار تسلیم فون مایز<sup>2</sup> و مدل اصطکاک کولمب در این تحلیل استفاده می شود و جنس ورق ها در حالت الاستیک - پلاستیک ایده آل<sup>3</sup> 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  $dx$  در نظر گرفته شده و معادله تعادل افقی برای هر کدام نوشته می شود. معادلات تعادل افقی برای لایه های 1، 2، و 3 به ترتیب به صورت روابط (3-1) است.

$$h_1 \frac{dq_1}{dx} - \tau_1 + \tau_{21} = 0 \quad (1)$$

$$h_2 \frac{dq_2}{dx} - \tau_{21} - \tau_{23} = 0 \quad (2)$$

$$h_3 \frac{dq_3}{dx} + \tau_{23} - \tau_3 = 0 \quad (3)$$

که در روابط (5,4) به شرح زیر است.

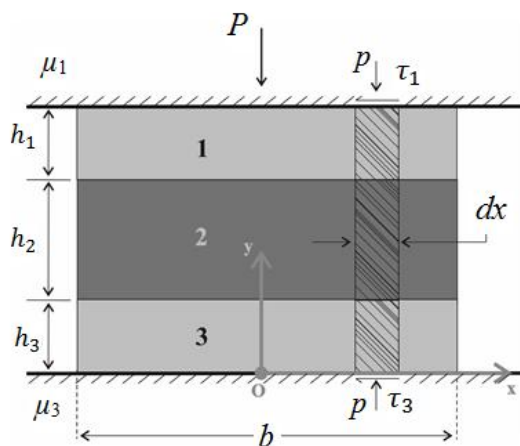
$$h = h_1 + h_2 + h_3 \quad (4)$$

$$hdq = h_1 dq_1 + h_2 dq_2 + h_3 dq_3 \quad (5)$$

با توجه به روابط (5,4)، سه معادله تعادل افقی با هم جمع می شوند تا یک معادله برای کل ورق سه لایه به صورت رابطه (6) به دست آید.

$$h \frac{dq}{dx} - (\tau_1 + \tau_3) = 0 \quad (6)$$

با استفاده از معیار تسلیم فون مایز در حالت کرنش صفحه ای، معیار تسلیم هر لایه با صرف نظر از تنش های برشی به صورت روابط (7-9) است.



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

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

مطالعه ای را با استفاده از روش قاچی انجام دادند. فرهادنیا و سلیمی [4] با در نظر گرفتن یک ماده الاستوپلاستیک با خاصیت کرنش صفحه ای، اقدام به تحلیل و اصلاح فرآیند نورد نامتقارن با روش قاچی کردند. سلیمی و ساسانی [5] با در نظر گرفتن شرایط کلی نورد نامتقارن یعنی قطر، سرعت و شرایط اصطکاک متفاوت غلتک ها، مدل تحلیلی اصلاح شده ای بر پایه روش قاچی و کرنش صفحه ای برای تحلیل خصوصیات فرآیند و پیش بینی انحنای ورق ارائه کردند. سلیمی و کدخدایی [6] با در نظر گرفتن تنش برشی و عمودی غیریکنواخت در تحلیل قاچی، مدلی تئوری برای تحلیل کرنش صفحه ای نورد نامتقارن ورق ارائه کردند. هوانگ و تیزو [7] فرآیند نورد نامتقارن را از طریق آزمایش تجربی و در نظر گرفتن تنش های برشی و نرمال یکنواخت در تحلیل قاچی مورد بررسی قرار دادند. هانگ و همکاران [8] فرآیند نورد متقارن ورق چند لایه را با در نظر گرفتن دو مدل اصطکاک 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 شده ای برای تحلیل تنش در طول فاصله نوردکاری برای نورد نامتقارن استفاده کردند. فرآیند نورد نامتقارن جهت اتصال ورق دو لایه از طریق 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 در نظر 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 نرم افزار آباکوس، ساختار لایه های کامپوزیتی تغییر فرم یافته را به صورت فرآیند نورد متقارن سه لایه شبیه سازی و تحلیل کردند. با در نظر گرفتن تاثیرات بارگذاری در ابتدا و انتهای فرآیند، داوسون و تامسون [15] اقدام به شبیه سازی فرآیند نورد سرد کردند. نوویک و همکاران [16] توسط نرم افزار آباکوس<sup>1</sup>، فرآیند نورد ورق سه لایه را شبیه سازی کردند تا تأثیر هندسه ورق و غلتک را روی تمرکز کرنش در ورق بررسی کنند.

پیشینه پژوهش در زمینه ساخت ورق های چند لایه بسیار محدود است. هوانگ و همکاران [17] ورق دولایه از جنس های آلومینیوم، مس و فولاد نرم را توسط نورد نامتقارن تولید کردند. ممالیس و همکاران [18] ورق های دولایه و سه لایه از جنس های نقره، مس و روی را توسط روش انفجاری و نورد ساختند. دانش منش و کریمی [19] ورق سه لایه از جنس های 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 سه لایه با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن اثرات کرنش سختی در رفتار مواد از طریق تحلیل قاچی مورد مطالعه قرار می گیرد. سپس فرآیند فورج ورق سه لایه در نرم افزار المان محدود آباکوس شبیه سازی و نتایج آن برای صحت 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 آلومینیوم و مس به یکدیگر از طریق عملیات فورج است.

**2- حل تحلیلی با روش قاچی**

<sup>2</sup> Von Mises

<sup>3</sup> Elastic-perfect plastic

<sup>1</sup> ABAQUS

$$\tau_1 = \mu_1 p, \tau_3 = \mu_3 p \quad (13)$$

با جای گذاری روابط (12) و (13) در رابطه (6) به صورت رابطه (14) است.

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

رابطه (14) یک معادله دیفرانسیل خطی مرتبه اول است که با حل آن، رابطه توزیع فشار در طول ناحیه تماس سنبه با ورق به صورت رابطه (15) به دست می آید.

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

مقدار ثابت  $c$  با استفاده از شرایط مرزی ورق در لبه ها به صورت روابط (16,17) به دست می آید.

$$x = \frac{b}{2} \rightarrow q = 0 \rightarrow p = 2ak_1 \quad (16)$$

$$c = 2ak_1 \exp\left[\frac{\mu_1 + \mu_3}{h} \frac{b}{2}\right] \quad (17)$$

با جای گذاری مقدار ثابت  $c$  در رابطه (15)، رابطه کامل توزیع فشار برای ورق سه لایه به صورت رابطه (18) به دست می آید.

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

روابط مربوط به توزیع تنش های افقی نیز با استفاده از معیار تسلیم (روابط (10-7)) و رابطه توزیع فشار، به صورت روابط (19-21) به دست می آید.

$$\frac{q}{2k_1} = \alpha - \frac{p}{2k_1} = \alpha \left(1 - \exp\left[\frac{\mu_1 + \mu_3}{h}\left(-x + \frac{b}{2}\right)\right]\right) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{q_1}{2k_1} &= 1 - \frac{p}{2k_1} \\ &= 1 - \alpha \exp\left[\frac{\mu_1 + \mu_3}{h}\left(-x + \frac{b}{2}\right)\right] = \frac{q_3}{2k_3} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{q_2}{2k_2} &= 1 - \frac{p}{2k_2} = 1 - \left(\frac{k_1}{k_2}\right) \frac{p}{2k_1} \\ &= 1 - \frac{k_1}{k_2} \left(\alpha \exp\left[\frac{\mu_1 + \mu_3}{h}\left(-x + \frac{b}{2}\right)\right]\right) \end{aligned} \quad (21)$$

به دلیل یکسان بودن جنس لایه های 1 و 3 ( $k_1 = k_3$ )، روابط توزیع تنش افقی این دو لایه با هم برابر می شوند (رابطه (20)). مقدار نیروی مورد نیاز برای عملیات فورج ورق سه لایه، با انتگرال گیری از رابطه توزیع فشار به صورت رابطه (22) به دست می آید.

$$P = 2 \int_0^{\frac{b}{2}} p dx = -\frac{4k_1 ah}{\mu_1 + \mu_3} \left(1 - \exp\left[\frac{(\mu_1 + \mu_3)b}{2h}\right]\right) \quad (22)$$

همان طور که ملاحظه می شود فرمول نیرو و روابط توزیع تنش در مدل اصطکاکی کولمب (معیار تسلیم بدون تنش برشی)، فقط وابسته به ضرایب اصطکاک ورق با قالب های بالا و پایین ( $\mu_3$  و  $\mu_1$ ) است؛ بنابراین در این مدل اگر تعداد لایه ها بیشتر شود فقط ضرایب اصطکاک لایه اول و آخر با قالب های 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: معیار تسلیم با در نظر گرفتن اثر کرنش سختی

یکی از فرضیات یاد شده این بود که ماده در حالت الاستیک- پلاستیک ایده آل قرار دارد، به عبارت دیگر نمودار تنش- کرنش آن پس از تسلیم، به صورت 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

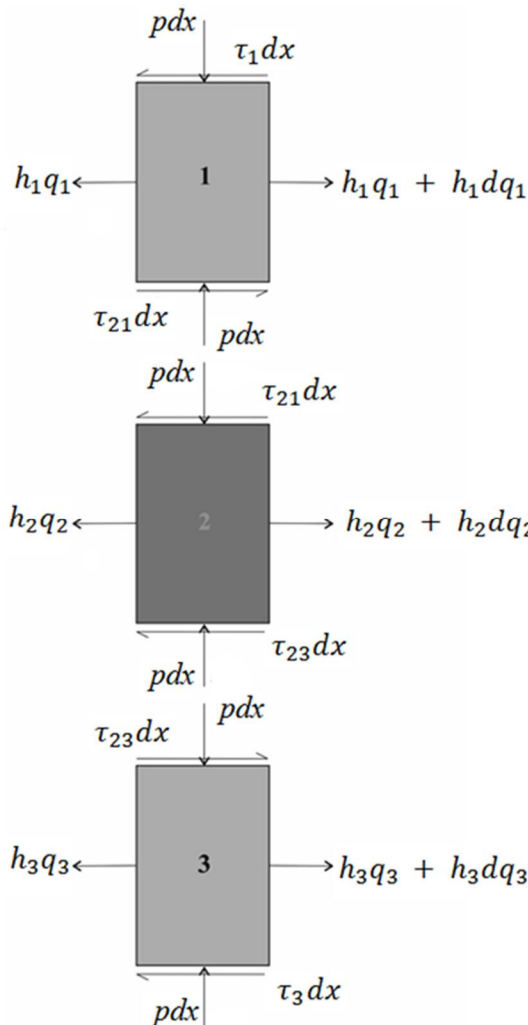


Fig. 2 Stress states of elements for three layer

شکل 2 حالت تنش در المان های هر سه لایه

$$p + q_1 = 2k_1 \quad \text{لایه 1} \quad (7)$$

$$p + q_2 = 2k_2 \quad \text{لایه 2} \quad (8)$$

$$p + q_3 = 2k_3 \quad \text{لایه 3} \quad (9)$$

معیار تسلیم هر لایه را در ضخامت لایه ضرب نموده و سه معیار تسلیم با هم جمع می شوند. سپس حاصل بر ضخامت کل ورق ( $h$ ) تقسیم می شود تا یک معیار تسلیم کلی برای ورق سه لایه به صورت روابط (10,11) به دست آید.

$$p + q = 2ak_1 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \beta + \gamma \frac{k_2}{k_1} + (1 - \beta - \gamma) \frac{k_3}{k_1}, \\ \beta &= \frac{h_1}{h}, \gamma = \frac{h_2}{h} \end{aligned} \quad (11)$$

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.

$$dq = -dp \quad (12)$$

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

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

$$\lambda_3 = \frac{h_3 C_3}{h} \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n_3+1} \left(\ln\left(\frac{h_{03}}{h_3}\right)\right)^{n_3} \quad (37)$$

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

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

باید توجه شود که در رابطه بالا، پارامتر  $\alpha$  از رابطه (34) به دست می‌آید. روابط مربوط به توزیع تنش‌های افقی نیز با استفاده از معیار تسلیم (روابط 30-33) و رابطه توزیع فشار، به صورت روابط (39-41) به دست می‌آیند.

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

$$\frac{q_1}{2k_1} = \frac{q_3}{2k_3} = \frac{C_1}{2k_1} \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n_1+1} \left(\ln\left(\frac{h_{01}}{h_1}\right)\right)^{n_1} - \frac{\alpha}{2k_1} \exp\left[\frac{\mu_1 + \mu_3}{h} \left(-x + \frac{b}{2}\right)\right] \quad (40)$$

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

مقدار نیروی مورد نیاز برای عملیات فورج ورق سه لایه، با انتگرال گیری از رابطه توزیع فشار (42) به دست می‌آید.

$$P = 2 \int_0^{\frac{b}{2}} p dx = -\frac{2ah}{\mu_1 + \mu_3} \left(1 - \exp\left[\frac{(\mu_1 + \mu_3)b}{2h}\right]\right) \quad (42)$$

### 3- شبیه سازی فرآیند با روش المان محدود

جهت صحت سنجی نتایج حاصل از روش تحلیلی قاچی، شبیه سازی فرآیند فورج ورق سه لایه به صورت سه بعدی در نرم افزار المان محدود آباکوس انجام شده است (شکل 3). به دلیل این که تحلیل در حالت کرنش صفحه ای انجام شده، در شبیه سازی سطوح عقب و جلوی ورق‌ها در جهت Z محدود شده اند تا در این جهت افزایش طول ندهند.

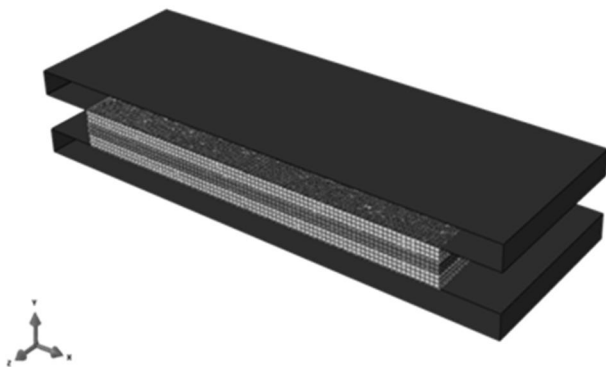


Fig. 3 Simulation of three layer clad sheet forging by finite element method in ABAQUS/CAE

شکل 3 شبیه سازی فرآیند فورج ورق سه لایه به روش المان محدود در نرم افزار آباکوس

تسلیم آن (برای ادامه تغییر شکل یا مراحل بعدی تغییر شکل) افزایش یافته و رفتار ماده سخت تر می‌شود. به عبارت دیگر، هرچه تغییر شکل بیشتری روی قطعه اعمال شود، رفتار قطعه سخت تر شده و تغییر شکل آن مشکل تر می‌گردد. در این بخش، با استفاده از رابطه بین تنش و کرنش در ناحیه پلاستیک، کرنش سختی در معیار تسلیم اعمال می‌شود. تئوری‌های مختلفی برای تعیین رابطه بین تنش و کرنش در ناحیه پلاستیک ارائه شده اند که در این تحقیق از رابطه هولومون<sup>1</sup> برای این منظور به صورت (23) استفاده می‌گردد.

$$\sigma = C \varepsilon^n \quad (23)$$

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 ( $\tilde{\varepsilon}$ ) قرار می‌گیرد که عبارتست از روابط (24, 25).

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

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

در روابط بالا،  $h_0$  ضخامت اولیه ورق و  $h$  ضخامت نهایی آن است. با جای گذاری رابطه (25) در رابطه (23)، رابطه (26) به دست می‌آید.

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

با استفاده از معیار تسلیم فون مایز در حالت کرنش صفحه ای، معیار تسلیم هر لایه با صرف نظر از تنش برشی به صورت روابط (27-29) است.

$$p + q_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{01} \quad (27)$$

$$p + q_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{02} \quad (28)$$

$$p + q_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{03} \quad (29)$$

اگر رابطه (26) به جای تنش تسلیم ( $\sigma_0$ ) در معیار تسلیم هر لایه جای گذاری شود، روابط (30-32) به دست می‌آید.

$$p + q_1 = C_1 \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n_1+1} \left(\ln\left(\frac{h_{01}}{h_1}\right)\right)^{n_1} \quad (30)$$

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

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

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

$$p + q = \alpha \quad (33)$$

$$\alpha = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \quad (34)$$

$$\lambda_1 = \frac{h_1 C_1}{h} \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n_1+1} \left(\ln\left(\frac{h_{01}}{h_1}\right)\right)^{n_1} \quad (35)$$

<sup>1</sup> Hollomon

شده تا ورق‌ها به یکدیگر بچسبند. پس از فرآیند فورج کیفیت چسبندگی بین دو لایه در ورق دولایه ساخته شده، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>2</sup> (شکل 4) مورد ارزیابی و بررسی دقیق قرار گرفت.

## 5- بحث و بررسی نتایج

### 5-1- نتایج تحلیل و شبیه‌سازی

نمودار توزیع فشار به دست آمده از شبیه‌سازی همراه با حالت‌های 1 و 2 که از روش تحلیلی قاجی به دست آمده، در شکل 5 نشان داده شده است.

همان‌طور 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 در نظر می‌گیرد؛ بنابراین پاسخ دقیق‌تری ارائه می‌دهد، اما حالت 1 ماده را الاستیک-پلاستیک ایده‌آل فرض می‌کند که در نتیجه ماده نرم‌تر شده و فشار بسیار کمتری، تقریباً نصف مقدار شبیه‌سازی را برای فورج نیازمند است.

شکل‌های 6-الف، ب، ج نمودار توزیع تنش افقی به دست آمده از شبیه‌سازی را همراه با حالت‌های 1 و 2 تحلیل قاجی، به ترتیب برای ورق سه‌لایه، لایه‌های 1 و 3 و لایه 2 نمایش می‌دهند. نمودار توزیع تنش افقی لایه‌های 1 و 3 یکسان است، زیرا هر دو از یک جنس است. همان‌طور که در شکل 6-الف) مشخص است، تنش افقی در لایه‌های ورق برابر صفر است، زیرا در لایه‌ها هیچ مانعی در برابر حرکت ورق وجود ندارد.

مانند نمودار توزیع فشار، در نمودارهای توزیع تنش افقی نیز نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی به نتایج حالت 2 تحلیل نزدیک است. لایه‌های 1 و 3 (از جنس آلومینیوم) نسبت به لایه 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 لایه‌ها 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 می‌کشند؛ بنابراین تنش افقی لایه 2 در نزدیکی لایه‌ها مثبت و تحت کشش است (شکل 6-ج).

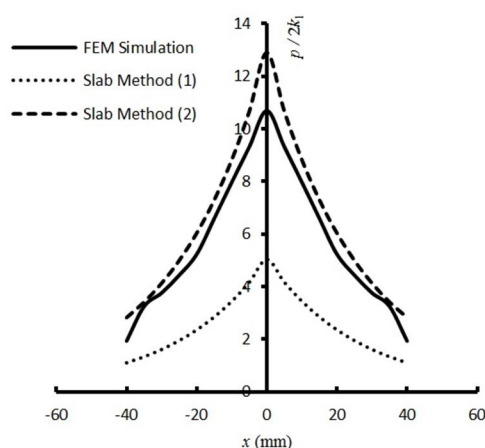


Fig. 5 Pressure distribution in three layer clad sheet

شکل 5 نمودار توزیع فشار برای فورج ورق سه لایه

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

$$\beta = 0.34, \gamma = 0.3, k_1 = k_3 = 44.4 \text{ MPa}, k_2 = 59.4 \text{ MPa}$$

$$C_1 = C_3 = 185 \text{ MPa}, C_2 = 588 \text{ MPa}, n_1 = n_3 = 0.14, n_2 = 0.28$$

در این شبیه‌سازی به دلیل ساده بودن شکل ورق‌ها، از روش مش‌بندی منظم<sup>1</sup> و المان‌های مکعبی (C3D8R) استفاده شده است. هر لایه به 6600 المان تقسیم‌بندی شده؛ بنابراین تعداد کل المان‌ها برابر 19800 (و تعداد گره‌ها برابر 27770) است. قالب‌ها صلب هستند و تغییر شکل نمی‌دهند؛ بنابراین مش‌بندی برای آن‌ها تعریف نمی‌شود. قالب پایین ثابت در نظر گرفته شده و قالب بالا با سرعت ثابت 25 میلی‌متر بر ثانیه به سمت پایین حرکت می‌کند. مقدار جابه‌جایی قالب بالا برابر 0.8 میلی‌متر است. از تئوری هولومون برای تعریف رابطه تنش و کرنش در ناحیه پلاستیک استفاده شده تا کرنش سختی در شبیه‌سازی اعمال شود. مطابق جدول‌های 1 و 2 جنس لایه‌های 1 و 3 آلومینیوم و جنس لایه 2 مس تعریف شده که از مرجع [11] استخراج شده است.

### 4- آزمایش فورج ورق دولایه

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. کاملاً 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 سانتی‌گراد 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 تسلیم لایه‌ها

Table 1 Material and yield stress of the layers

لایه‌ها	جنس	تنش تسلیم (MPa)
لایه‌های 1 و 3	آلومینیوم	77
لایه‌ی 2	مس	103

جدول 2 مقادیر عددی پارامترهای کرنش سختی

Table 2 Numerical quantities of strain hardening parameters

جنس	C (MPa)	n
آلومینیوم	185	0.14
مس	588	0.28



Fig. 4 Scanning electron microscope

شکل 4 میکروسکوپ الکترونی روبشی

<sup>2</sup> Scanning electron microscope (SEM)

<sup>1</sup> Structured

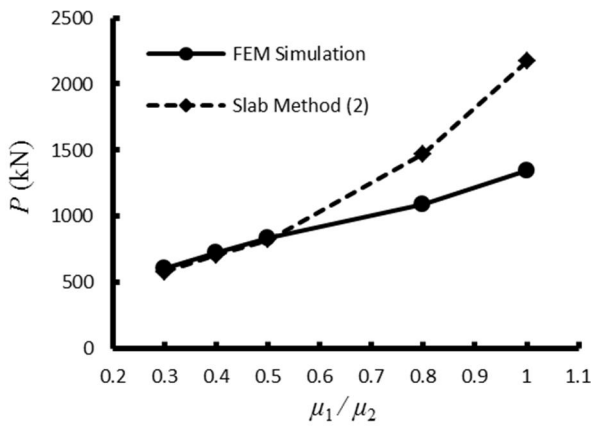


Fig. 7 Compression force with respect to frictional coefficient ratio

شکل 7 تغییرات نیروی فورج برحسب نسبت ضریب اصطکاک

$h = 5.3 \text{ mm}$  ,  $\mu_2 = 0.2$

$k_1 = k_3 = 44.4 \text{ MPa}$  ,  $k_2 = 59.4 \text{ MPa}$

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 می‌شود، یعنی ورق عریض‌تر و نازک‌تر می‌شود، نیروی مورد نیاز برای فورج افزایش پیدا می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود دو نمودار تطابق مناسبی دارند که این صحت روش قاچی ارائه‌شده را اثبات می‌کند.

### 5-2- نتایج آزمایش

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

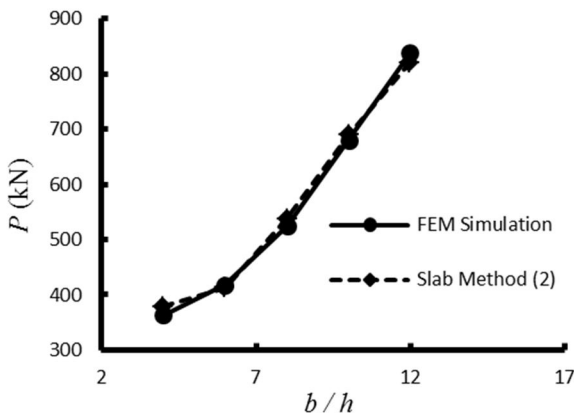
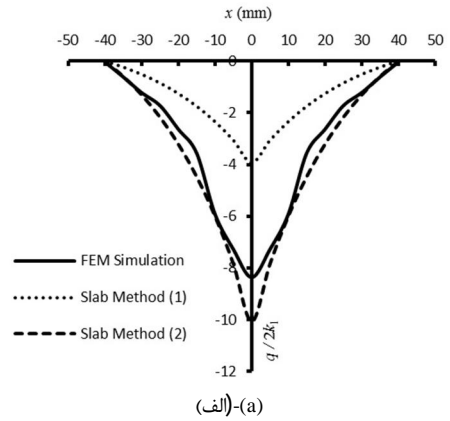


Fig. 8 Compression force with respect to width to thickness ratio

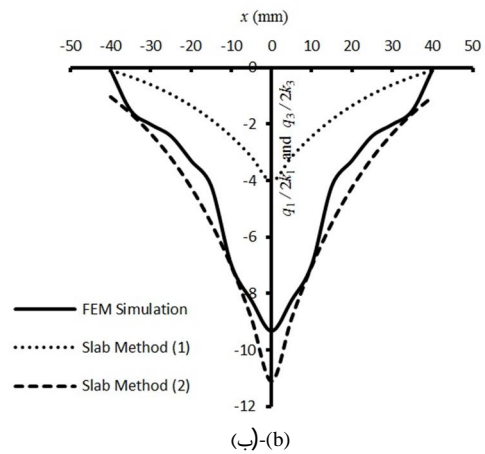
شکل 8 تغییرات نیروی فورج بر حسب نسبت عرض به ضخامت ورق

$h = 5.3 \text{ mm}$  ,  $\mu_1 = \mu_3 = 0.1$  ,  $\mu_2 = 0.2$

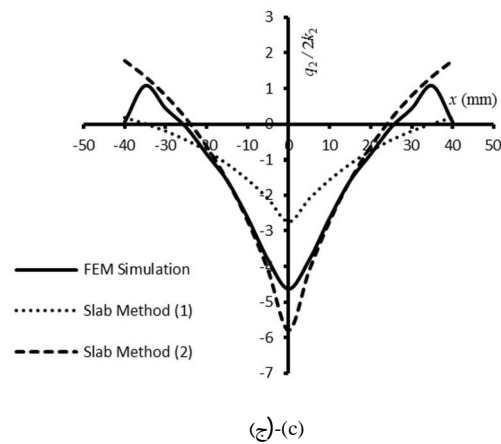
$k_1 = k_3 = 44.4 \text{ MPa}$  ,  $k_2 = 59.4 \text{ MPa}$



(الف)-(a)



(ب)-(b)



(ج)-(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 و ج) لایه 2

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

$\beta = 0.34$  ,  $\gamma = 0.3$  ,  $k_1 = k_3 = 44.4 \text{ MPa}$  ,  $k_2 = 59.4 \text{ MPa}$

$C_1 = C_3 = 185 \text{ MPa}$  ,  $C_2 = 588 \text{ MPa}$  ,  $n_1 = n_3 = 0.14$  ,  $n_2 = 0.28$

نمودار تغییرات نیروی فورج برحسب نسبت ضریب اصطکاک که از شبیه‌سازی به‌دست‌آمده، 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 تقریباً 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.



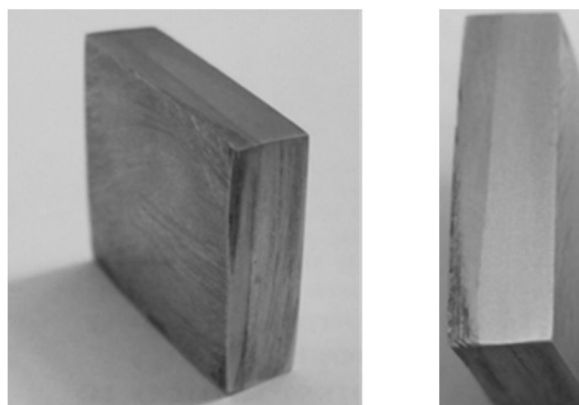
## 8- نتیجه گیری

نتایج اصلی به دست آمده از مطالعه تأثیر رفتار کارسختی فلز در تحلیل تئوری و تجربی فرآیند فورج قالب باز ورق چند لایه به شرح زیر است.

- مقدار فشار و تنش های افقی در مرکز ورق، بیشترین مقدار و در لبه های ورق، کمترین مقدار را داراست.
- لایه وسط به دلیل سخت تر 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 می دهد، زیرا کرنش سختی ورق را در نظر می گیرد که سبب سخت تر شدن ورق می شود.
- با افزایش نسبت ضریب اصطکاک میان لایه های نخست و سوم و قالب ها، نیروی لازم برای فورج ورق افزایش می یابد.
- با افزایش نسبت عرض به ضخامت ورق، نیروی لازم برای فورج ورق افزایش می یابد؛ به عبارت دیگر هرچه ورق عریض تر و نازک تر شود، نیروی بیشتری برای فورج آن مورد نیاز است.

## 7- مراجع

- [1] 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 rigid-plastic FEM, *Materials Processing Technology*, Vol. 53, No. 7, pp. 544-551, 1995.

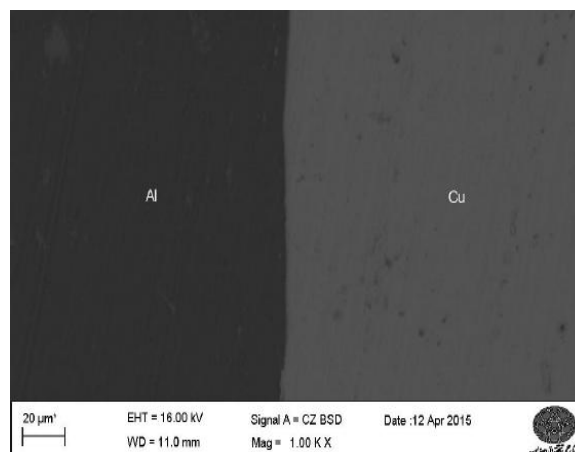


(الف)-(a)

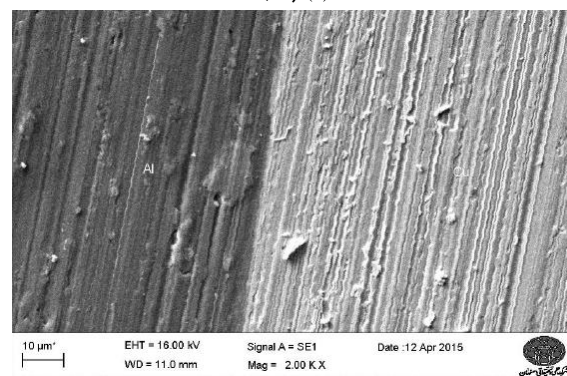
(ب)-(b)

Fig. 9 (a) front (b) side view of two layer clad sheet

شکل 9 ورق دو لایه ساخته شده توسط فرآیند فورج قالب باز (الف) نما از جلو (ب) نما از کنار



(الف)-(a)



(ب)-(b)

Fig. 10 SEM photo of Al-Cu layers in (a) 20 (b) 10 micrometer scale

شکل 10 عکس های به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روشی (الف) مقیاس 20 میکرومتر، (ب) مقیاس 10 میکرومتر

خطوط و ناهمواری های ایجاد شده در شکل 10-b به دلیل عملیات برش ورق است که توسط سمباده زنی برطرف می شوند. همان طور که از شکل ها مشخص است، هیچ فضای خالی بین دو لایه وجود ندارد و آلومینیوم و مس کاملاً به یکدیگر چسبیده اند.

- 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-