

بررسی عددی فرایند برش دقیق ورق‌های چند لایه

رقیه طیبی^۱ و محمد صدیقی^{۲*}

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۲/۰۳/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۲/۱)

چکیده

با توجه به گسترش روزافزون استفاده از ورق‌های چند لایه در صنایع مختلف بررسی عملیات پرکاربرد برش روی این ورق‌ها، ضروری می‌باشد. در این مقاله مطالعه‌ای روی فرایند برش دقیق یک ورق چندلایه Al/Cu/Al انجام شده است. جهت به‌دست آوردن نتایج دقیق عددی، شبیه‌سازی المان محدود ورق‌های چندلایه در روشی جدید با استفاده از مدل جانسون-کوک و فرمول‌بندی ALE در نرم‌افزار ABAQUS/Explicit صورت گرفته است. نتایج به‌دست آمده تطابق خوبی با مطالعه تجربی روی فرایند برش دقیق نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش نیروی سنبه مخالف کیفیت سطح بهبود و نیروی سنبه افزایش می‌یابد. بررسی لبه عرضی نمونه نشان می‌دهد که در زیر لایه آلومینیوم، لایه‌ها به میزان نسبتاً زیادی دچار تغییر شکل می‌گردند.

واژه‌های کلیدی: ورق چندلایه، برش دقیق، شبیه‌سازی المان محدود، مدل جانسون-کوک، نیروی سنبه مخالف

Numerical Investigation of Fine Blanking Process of Multilayer Sheets

R. Tayebi and M. Sedighi

School of Mechanical Engineering

Iran University of Science and Technology

(Received: 19/September/2013; Accepted: 21/April/2014)

ABSTRACT

Due to the increasing use of multilayer sheets in various industries, the study of widely used blanking operation on these sheets is necessary. In this paper a study on the process of fine blanking of a multilayer sheet of Al / Cu / Al is done. In order to get accurate numerical results, finite element simulations of multilayer plate are conducted by using Johnson-Cook model and ALE formulation in ABAQUS/Explicit commercial finite element code. The results are in good agreement with experimental results. The results show that with increasing counter punch force the surface quality is improved and the shear force is increased. Microscopic examination of the lateral edges show that below the aluminum layer edge, relatively large amount of plastic deformation is observed.

Keywords: Multilayer Sheet, Fine Blanking, Finite Element Simulation, Johnson – Cook Model, Counter Punch Force

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد: r_tayebi@ymail.com

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): sedighi@iust.ac.ir

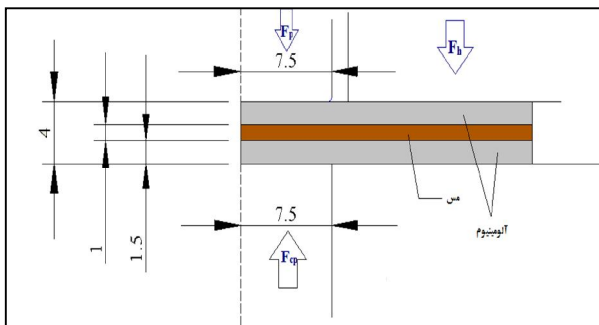
۱- مقدمه

صدیقی و هنرپیشه، تنش پسماند را در کل ضخامت ورق چند لایه Al-Cu-Al جوش انفجاری شده مورد بحث قرار دادند [۹]. گالینگ^۷ خواص بین لایه‌های و قابلیت جوشکاری ورق‌های آلومینیوم و مس ساخته شده توسط روش جوشکاری انفجاری را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۰].

با توجه به اهمیت و نیاز روزافزون شبیه‌سازی‌های صحیح در دنیای رقابتی علم و صنعت امروزه، این مطالعه به تحلیل و بررسی فرایند برش دقیق یک ورق سه‌لایه شامل مس (C-۱۰۱۰۰) در وسط و آلومینیوم (Al100) در دو طرف می‌پردازد. شبیه‌سازی المان محدود با استفاده از مدل جانسون- کوک و فرمول‌بندی ALE در نرم‌افزار ABAQUS/Explicit انجام شده است. نتایج با آزمون‌های تجربی اعتبارسنجی شده است.

۲- شبیه‌سازی المان محدود

فضای مدل‌سازی به دلیل وجود تقارن در مسئله به صورت متقارن محوری^۸ انتخاب می‌شود (شکل ۱). ورق به صورت شکل‌پذیر^۹، ابزارها و قالب به صورت صلب تحلیلی^{۱۰} که نیازمند شبکه‌بندی نیستند، مدل می‌شوند.



شکل (۱): مدل شبیه‌سازی اجزای محدود (ابعاد به mm).

۳- مدل پلاستیسیته جانسون- کوک

رفتار ماده بر اساس مدل جانسون- کوک^{۱۱} مدل‌سازی شده است. مدل JC یک مدل کاملاً ترکیبی پدیداری برای فلزاتی است که در معرض کرنش‌ها، نرخ کرنش‌ها و اثرات حرارتی قرار می‌گیرند. این مدل به خوبی در مطالعات مدل‌سازی و شبیه‌سازی استفاده می‌شود.

امروزه در بسیاری از صنایع از جمله صنایع خودرو سعی بر کاهش وزن قطعات و بدنه خودرو بدون کاهش استحکام قطعات شده است. در این راستا کاهش ضخامت ورق و افزایش استحکام آن مد نظر بوده است. هدف نهایی تولیدکنندگان، تولید قطعات با کیفیت بالا با صرف هزینه کمتر و نرخ تولید بالاست. ورق‌های مرسوم در مهندسی همیشه دارای ترکیب ایده‌آلی از خواص مکانیکی، فیزیکی و مقاومت به خوردگی نمی‌باشند. از این رو در بخش‌های مختلف صنعت همچون صنایع الکتریکی و فضایی برای ساخت اجزای گوناگون، از ورق‌های چندلایه استفاده شده و کاربرد آنها رو به گسترش می‌باشد. از طرفی امروزه بسیاری از قطعات مورد استفاده در صنعت با استفاده از فرایند برش تولید می‌شوند و یا حداقل یکی از مراحل تولید آنها برش است. برش دقیق، فرایندی است که در یک مرحله، قطعاتی با لبه‌های صاف و دقت بالا تولید می‌کند که به عملیات ثانویه نیاز ندارند و بنابراین در یک مرحله می‌توان به قطعاتی با دقت و کیفیت بالا دست یافت. از تفاوت‌های عمده برش دقیق با برش معمولی می‌توان به وجود یک نیروی مخالف حرکت سنبه بر ورق اشاره کرد که از پدیده بشقابی شدن جلوگیری می‌کند. یک حلقه^{۱۷} شکل هم در نزدیکی لبه برش ورق را مهار می‌کند و باعث کنترل جریان پلاستیک مواد در ناحیه برش و در نتیجه افزایش ارتفاع منطقه برش و کاهش یا حذف منطقه شکست می‌شود [۱]. لقی سنبه و ماتریس ۱-۰/۵٪ ضخامت ورق است که این مقدار در برش معمولی حدود ۱۰ برابر می‌باشد.

در سال ۲۰۰۱ کلوکه^۲ و همکاران مروری بر امکانات پیشنهادی روش اجزای محدود برای کاربردهای برش دقیق ارائه کردند [۱]. کوک^۳ و همکارانش در سال ۲۰۰۲ با استفاده از نرم افزار DEFORM-2D و کد اجزای محدود صلب- پلاستیک به بررسی اثر لقی در مناطق شکست، برش و شعاعی پرداختند [۲]. چن^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۳ تشکیل و انتشار باند برش در فرایند برش دقیق را مورد مطالعه قرار دادند [۳]. تیپراکماس^۵ در سال‌های ۲۰۰۶-۲۰۰۸ مطالعاتی بر روی برش دقیق انجام داد [۴-۷]. حبیبی‌پارسا و همکاران رفتار ورق‌های مرکب دو لایه را در کشش عمیق به روش المان محدود صلب^۶ مورد بررسی قرار داده‌اند [۸].

- 1- V-Ring
- 2- Klocke
- 3- Kwak
- 4- Chen
- 5- Thipprakmas
- 6- Rigid Plastic FEM

- 7- Gulenc
- 8- Axisymmetric
- 9- Deformable
- 10- Analytical Rigid
- 11- Johnson - Cook (JC)

جدول (۲): مشخصات مواد در مدل جانسون-کوک.

ثابت‌ها	Cu [۱۱]	Al [۱۲]
A[MPa]	۴۴۰	۱۴۰
B[MPa]	۱۵۰	۷۵/۲
C	۰/۰۲۵	۰/۰۱۲۵
n	۰/۳۱	۰/۶۴۷۴
m	۰	۰
T _m [K]	۱۳۵۶	۹۲۳
T _r [K]	۳۰۰	۵۰۰
[S ^{-۱}] $\dot{\epsilon}_0$	۱	۱/۰۴
d ₁	۰/۳	۰/۱۴
d ₂	۰/۲۸	۰/۱۴
d ₃	-۳/۰۳	۱/۵
d ₄	۰/۰۱۴	-۱
d ₅	۰	۰

به دلیل اینکه برش دقیق یک فرایند شکل‌دهی سرد است اثر حرارت در این مطالعه در نظر گرفته نشده و مقادیر d_5 ، m و d_4 در این مطالعه وارد نشده است.

برای تعریف شرایط تماسی سطح اول که می‌بایست سطح مقاوم‌تر باشد سطوح ابزارها و کل ورق را به عنوان سطح دوم و از نوع ناحیه گره^۲ انتخاب می‌گردد. یک مدل ساده کولمب^۳ با یک ضریب اصطکاک ثابت ۰/۱ استفاده شده است. برای تعریف شرایط مرزی:

- در جهت حرکت سنبه به آن سرعت داده و حرکتش در جهت‌های دیگر محدود می‌شود.

- قالب را کاملاً مقید کرده به طوری که در جایش ثابت بماند.

- سنبه مخالف هم در جهت حرکت سنبه و خط برش آزاد و در جهت‌های دیگر محدود می‌شود.

مطابق شکل ۲ در مناطقی که تغییر شکل و دقت زیاد لازم است از شبکه‌های ریز استفاده می‌شود و در سایر نواحی که در فرایند برش نقش چندانی ندارد، از شبکه‌های بزرگ‌تر استفاده می‌شود. در مدل‌سازی از المان CAX4R و المان CAX3 استفاده شده است. المان CAX4R عبارت است از المان چهار گره‌ای پیوسته متقارن، این المان‌ها به دلیل توانایی غیر قابل تراکم بودن، دچار قفل‌شدگی نخواهد شد و در زمان نسبتاً کوتاهی می‌توان به جواب رسید.

در این مدل تنش جریان با معادله (۱) بیان می‌گردد:

$$\sigma_y = (A + B \epsilon^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0}) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) \quad (1)$$

که در آن، عبارت پیرانتز اول اثر کرنش، پیرانتز دوم حساسیت نرخ کرنش لحظه‌ای و عبارت سوم اثر حرارت را بر روی تنش تسلیم نشان می‌دهد. همچنین ثابت A استحکام تسلیم آغازی ماده در دمای اتاق، نرخ کرنش پلاستیک معادل با نرخ کرنش پلاستیک مرجع، $\dot{\epsilon}_0$ ، نرمالیزه شده است. T_r دمای مرجع و T_m دمای ذوب ماده می‌باشند. ثابت n اثر کرنش سختی، m اثر گرما نرمی و C حساسیت نرخ کرنش را بیان می‌کنند [۱۱]. جانسون و کوک یک معیار پارگی براساس کرنش پلاستیک متراکم با معادلات (۲) ارائه نموده‌اند:

$$\epsilon_r = \left(d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}) \right) \left(1 + d_4 \ln \frac{\dot{\epsilon}_{eq}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left(1 + d_5 \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \quad (2)$$

$$W = \sum \frac{\Delta \epsilon_{eq}^p}{\epsilon_r}$$

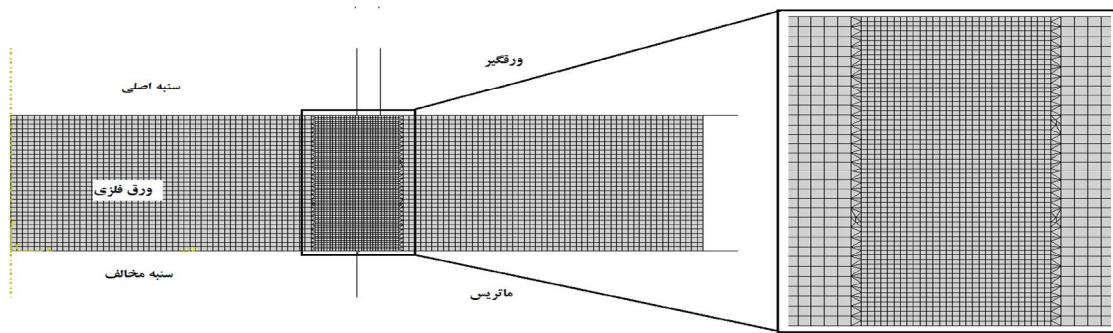
در این معادله، σ_H تنش هیدرواستاتیک، σ_{eq} تنش معادله فون میسز و نرخ کرنش مرجع $\dot{\epsilon}_0 = 1$ می‌باشد. d_5 ، d_4 ، d_3 ، d_2 ، d_1 در این معادله پارگی ماده هستند که جانسون و کوک (۱۹۸۵) برای مس OFHC^۱ ارائه داده‌اند و در این شبیه‌سازی مطابق جدول‌های ۱ و ۲ از این مقادیر و مشخصات مواد استفاده شده است [۱۱]. $\Delta \epsilon_{eq}^p$ اختلاف کرنش پلاستیک معادل است. وقتی $W=1$ می‌شود، تنش‌ها به صفر رسیده و پارگی شبیه‌سازی می‌گردد [۱۱]. وقتی که معیار تخریب در هر المان به حدش می‌رسد، تنش انحرافی در المان تخریب شده به صفر می‌رسد و با الگوریتم حذف المان موجود در ۶/۱۰ ABAQUS از محاسبات بعدی حذف می‌شوند. معیار تخریب J-C که در ABAQUS به صورت نماد JCCRT نمایش داده می‌شود، همان W در معادله (۲) است. المان‌هایی که به حد معیار تخریب می‌رسند، یعنی $W=1$ ، از محاسبه حذف شده و بنابراین در شکل نیامده‌اند، یک شکافی در ورق شکل گرفته به جا می‌گذارند.

جدول (۱): مشخصات فیزیکی مواد.

خواص	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)	چگالی (gr/cm ³)
فلز اولیه	۰/۳۳	۷۲	۲/۷۱
آلومینیوم	۰/۳۴	۱۲۴	۸/۹۶

2- Node Region
3- Coulomb

1- Oxygen Free High Conductivity



شکل (۲): شبکه‌بندی ورق و چگالی مش در ناحیه لقی.

این روش تکراری، الگوریتم «کیکوشی»^۳ نامیده می‌شود. مکان گره n در تکرار $(i + 1)$ ام طبق معادلات زیر تعیین می‌شود:

$$x_e^i = \frac{1}{nne} \sum_{k=1}^{nne} x_k^i, \quad (3)$$

$$x_n^{i+1} = \frac{\sum_{e=1}^{nse} V_e^i x_e^i}{\sum_{e=1}^{nse} V_e^i}, \quad (4)$$

که در آن، x_k^i بردار مکان مرکز المان e ام، x_k^i بردار مکان گره k ام المان e ام و nne تعداد گره‌های المان e ام است. x_n^{i+1} نیز بردار مکان گره، n حجم المان e ام اطراف و nse تعداد المان‌های اطراف است [۱۳].

۴- آزمون تجربی

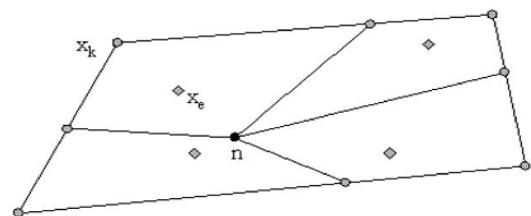
برای انجام آزمون‌های تجربی از قالبی استفاده شده است که با قرار گرفتن بر روی یک پرس معمولی هیدرولیکی، عملکرد پرس‌های برش دقیق را می‌دهد. در این قالب، نیروی سنبه مخالف توسط یک فنر که به وسیله یک پیچ فشرده می‌شود تأمین می‌گردد، بنابراین با تغییر اندازه سفت شدن پیچ که باعث تغییر نیروی سنبه مخالف می‌شود، می‌توان اثر نیروی سنبه مخالف را بر کیفیت محصول برش بررسی کرد [۱۴]. پرس مورد نظر تناژ ۴۰۰ تن دارد. شکل ۴ پرس و قالب استفاده شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

در تحقیق حاضر از ورق‌های آلومینیوم و مس با ابعاد به ترتیب $۳۰ \times ۳۰ \times ۱/۵$ میلی‌متر و $۳۰ \times ۳۰ \times ۱$ میلی‌متر استفاده شده است. آلومینیوم استفاده شده آلومینیوم خالص تجاری است که تحت عنوان A1۱۱۰۰ شناخته می‌شود که حداقل ۹۹/۰٪ آلومینیوم دارد و مس C-۱۰۱۰۰ که یکی از انواع مس بدون اکسیژن با رسانایی بالاست (OFHC)^۴ استفاده شده است.

هدف از کاربرد المان‌های مثلثی، تبدیل المان‌های درشت مربعی به المان‌های ریزتر در نزدیکی لبه برش بوده است. تطبیق شبکه براساس فرمول‌بندی ALE برای انجام مش‌زنی مجدد فعال شده است. فرمول‌بندی ALE^۱ که موقعیت المان حفظ می‌شود، تحولات مش و ذرات ماده همراه^۲ بوده، مش در حین فرایند نموی حرکت می‌کند به نحوی که از اعوجاج شدید المان‌ها جلوگیری شود. روش ALE در شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی با موفقیت استفاده شده و برای فرایند پولک‌زنی به خوبی به کار گرفته می‌شود. با توجه به فرمول‌بندی مسئله و الگوریتم بار مرحله‌ای حالت‌های مختلفی از فرمول‌بندی ALE می‌تواند استفاده شود با توجه به این که شرایط دینامیک صریح، پایدار است، مقدار حرکت ماده با یک افزایش زمان محدود می‌شود. به همین دلیل روش Uncouple ALE استفاده شده که حرکت ماده و حرکت مش کاملاً مجزا هستند [۱۳].

هموارسازی مش

بعد از مرحله لاگرانژ، گره‌ها حرکت می‌کنند تا جلوی اعوجاج المان گرفته شود. موقعیت‌های گره با استفاده از یک الگوریتم هموارسازی حجمی تعیین می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده هر گره با محاسبه متوسط وزن حجمی المان‌های اطرافش موقعیت‌دهی می‌شود [۱۳].



شکل (۳): جابه‌جایی گره [۱۳].

3- Kikuchi Algorithm

4- Oxygen-Free High Thermal Conductivity

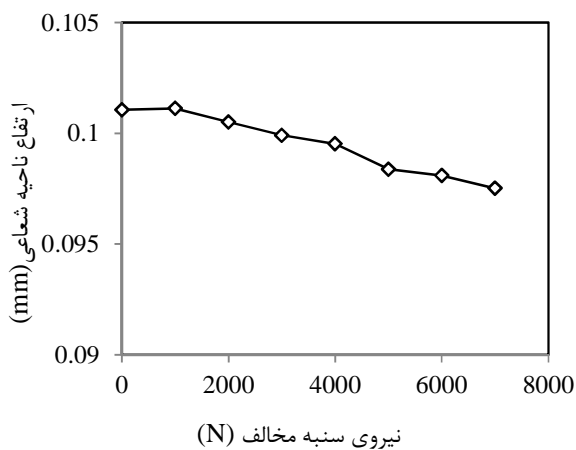
1- Arbitrary Lagrangian-Eulerian

2- Coupled

نیروی سنبه، مقابل ورق را در حین پیشروی سنبه در طول عمل برش مهار می‌کند و از تغییر شکل قطعه در جریان برش جلوگیری می‌کند و باعث می‌شود که ورق بشقابی نشود و قطعه تقریباً تخت باقی بماند [۱۳]. با افزایش نیروی سنبه مخالف، اندازه ناحیه صیقلی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

در حالت بدون نیروی سنبه مخالف، اندازه ناحیه صیقلی مقدار ۰.۰۶۵٪ ضخامت ورق بوده که در نیروی سنبه مخالف برابر با ۷۰۰۰ KN به مقدار ۰.۰۹۴٪ ضخامت ورق رسیده است. این افزایش بسیار مطلوب است و باعث افزایش دقت و کیفیت محصول برش می‌شود.

شکل ۶ اثر نیروی سنبه مخالف را بر ارتفاع ناحیه شعاعی پولک نشان می‌دهند. ارتفاع ناحیه شعاعی در تمامی حالت‌ها مقدار بسیار کمی است، اگرچه با افزایش نیروی سنبه مخالف، کاهش می‌یابد، اما این تغییر چندان زیاد نیست به طوری که از مقدار ۰.۰۲۵۳٪ ضخامت ورق در حالت بدون نیروی سنبه مخالف، به مقدار ۰.۰۲۴۳٪ ضخامت در نیروی ۷۰۰۰ N می‌رسد. روند نزولی نمودار با وجود تغییر بسیار کم قابل مشاهده است.



شکل (۶): مطالعه اثر نیروی سنبه مخالف بر ارتفاع ناحیه شعاعی پولک در شبیه‌سازی.

شکل ۷ نیز اثر نیروی سنبه مخالف را بر پهنای ناحیه شعاعی نشان می‌دهد. در حالت بدون نیروی سنبه مخالف، عرض ناحیه شعاعی ۰.۰۳۷٪ ضخامت ورق بوده که به مقدار ۰.۰۳۰٪ ضخامت ورق در نیروی سنبه مخالف ۷۰۰۰ N می‌رسد. البته همان‌طور که در شکل مشخص است، این روند کاهشی تا اندازه‌ای ادامه دارد و پس از آن ثابت می‌ماند.

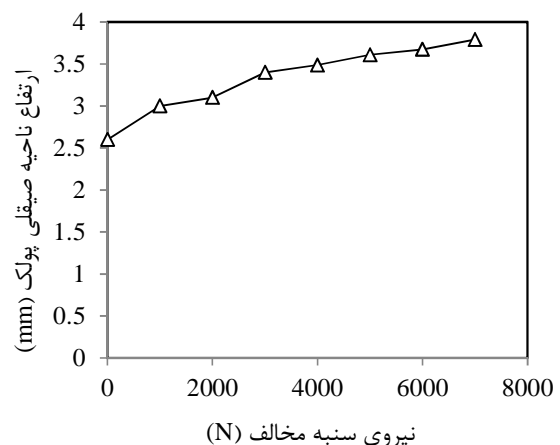
از آنجا که نیروی سنبه مخالف یکی از پارامترهای مهم در فرایند برش دقیق است، مطالعه اثر این پارامتر بر کیفیت و دقت محصولات برش و نیروی سنبه لازم و جالب به نظر می‌رسد. شبیه‌سازی و آزمایش برای ۷ مقدار مختلف نیروی سنبه مخالف انجام شده است.



شکل (۴): پرس و قالب مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها.

۵- نتایج عددی

در شکل ۵ تغییرات اندازه ناحیه صیقلی با تغییر نیروی سنبه مخالف نشان داده شده است.



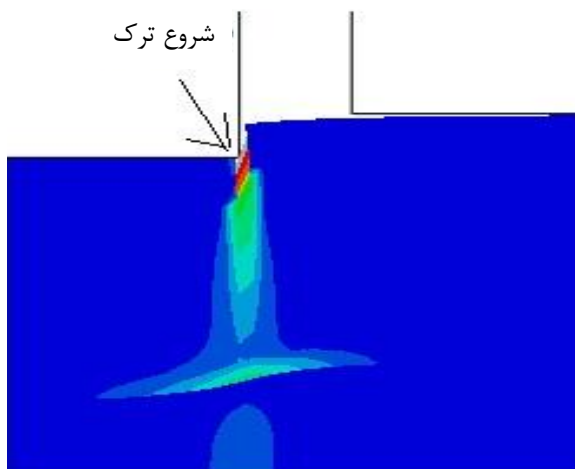
شکل (۵): اثر نیروی سنبه مخالف بر ارتفاع ناحیه صیقلی.

جدول (۳): اثر نیروی سنبه مخالف بر مقدار

نیروی برش و مکان شروع ترک‌ها.

نیروی سنبه مخالف (N)	۲۰۰۰	۷۰۰۰
شرایط شروع ترک‌ها		
حداکثر نیرو (N)	۳۰۱۸۰	۴۳۵۵۰
عمق نفوذ (mm)	۰/۲۴۷	۰/۲۳۷

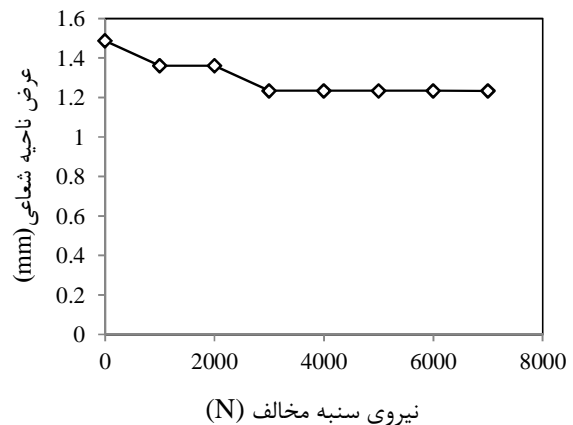
بر این اساس، در حالت نیروی سنبه مخالف برابر با ۷۰۰۰N، نسبت به حالت نیروی سنبه مخالف ۲۰۰۰N به اندازه ۱/۵ برابر، افزایش نیروی برش حاصل می‌شود. عمق نفوذ سنبه، هنگامی که نیروی آن به حداکثر می‌رسد تنها حدود ۶٪ است که با تغییر نیروی سنبه مخالف هم تغییر چندانی نمی‌کند (شکل ۹).



شکل (۹): کانتور PEEQ در لحظه شروع اولین ترک.

۶- اعتبار سنجی نتایج

شکل ۱۰ مقایسه‌ای از لبه‌های برش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود، لایه مس در لبه برش به میزان نسبتاً زیادی کشیده شده است و می‌بایست این مسئله در محل کاربرد این نمونه مورد توجه قرار گیرد. اگرچه از بیرون و روی محیط نمونه لایه آلومینیوم کاملاً مس را پوشانده اما در زیر این لایه روی لبه‌ها مس دچار این کشیدگی شده است. این نتیجه که در آزمایشات به دست آمده در شبیه‌سازی نیز قابل مشاهده است. می‌توان گفت شبیه‌سازی به‌نحو درستی انجام گرفته و نتایجش به خوبی قابل استناد است.

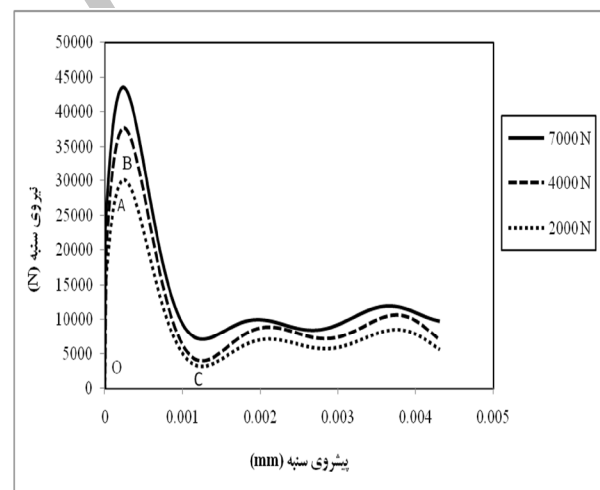


شکل (۷): مطالعه اثر نیروی سنبه مخالف

بر عرض ناحیه شعاعی پولک.

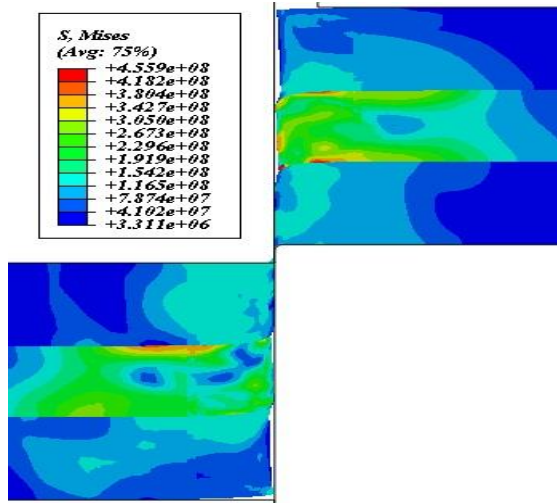
با افزایش نیروی سنبه مخالف همان‌طور که در شکل ۸

مشاهده می‌شود، نیروی وارد بر سنبه برش افزایش می‌یابد.



شکل (۸): بررسی اثر نیروی سنبه مخالف بر نیروی برش.

از آنجا که ماده الاستیک-پلاستیک فرض شده، نمودار شامل هر دو فاز الاستیک و پلاستیک می‌باشد. افزایش نیروی سنبه از نقطه O تا نقطه A بیانگر فاز الاستیک است. از A تا B تغییر شکل پلاستیک برشی رخ خواهد داد. از نقطه B تا C بعد از شروع اولین ترک‌ها نیرو به‌طور ناگهانی کاهش می‌یابد و از نقطه C به بعد، متناسب با گسترش ترک‌ها و کاهش سطح برشی نیروی کاهش یافته، ثابت می‌ماند. جدول ۳ نشان می‌دهد که با آغاز اولین ترک‌ها، نیروی برش چه مقداری داشته و در چه مکانی از پیشروی سنبه این مهم حاصل می‌شود.



شکل (۱۲): تنش در پایان برش، نیروی سنبه مخالف ۷۰۰۰ N.

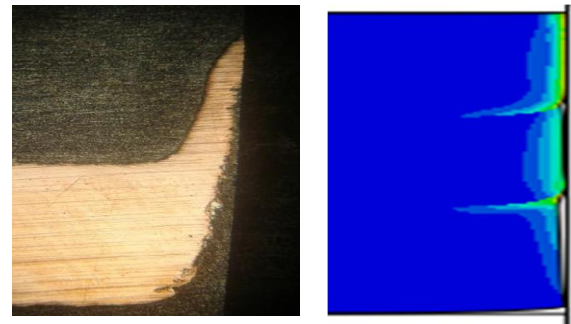
۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه روشی جدید بر اساس مدل ماده و پارگی جانسون-کوک برای شبیه‌سازی رشد و انتشار ترک در فرایند برش به‌وسیله نرم‌افزار ABAQUS/Explicit ارائه شده و نتایج حاصل با نتایج تجربی اعتبارسنجی شده که نتایج مطابقت خوبی را نشان می‌دهند. از این بررسی نتایج زیر حاصل شد:

- با افزایش نیروی سنبه مخالف، ارتفاع ناحیه صیقلی بیشتر می‌شود. حدود ۱۰ درصد خطا مشاهده شده است.
- با افزایش نیروی سنبه، عرض و ارتفاع ناحیه شعاعی کمتر می‌شود.
- با افزایش نیروی سنبه، نیروی لازم برای برش بیشتر می‌شود.
- لایه‌ها در لبه برش به میزان نسبتاً زیادی دچار تغییر شکل شده‌اند.
- بیشترین تنش‌ها در محل اتصال لایه‌ها دیده می‌شود و لایه مسی تحت تنش‌های بیشتری قرار می‌گیرد. پس از اولین ترک‌ها با ادامه حرکت میزان تنش‌ها و نیز میزان حداکثر تنش‌ها کمتر می‌شود.

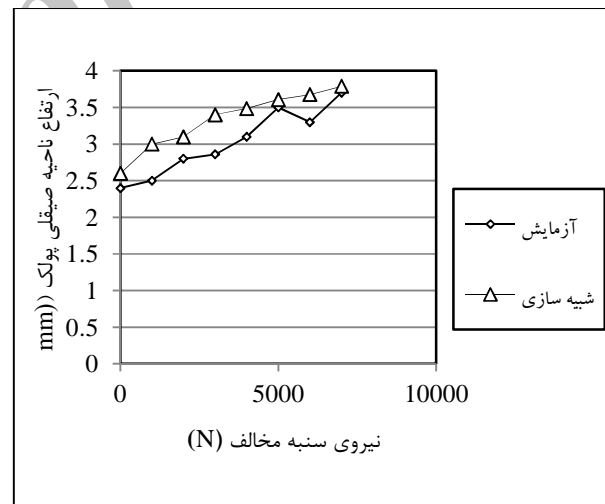
۸- مراجع

1. Klocke, F., Sweeney, K., and Raedt, H.W. "Improved Tool Design For Fine Blanking Through the Application of Numerical Modeling Techniques", J. Materials Proc. Tech, Vol. 115, No. 1, pp. 70-75, 2001.
2. Kwak, T.S., Kim, Y.J., and Bae, W.B. "Finite element Analysis on the Effect of Die Clearance on Shear Planes in Fine Blanking", J. Materials Proc. Tech, Vol's. 130-131, pp. 462-468, 2002.



شکل (۱۰): مقایسه لبه برش حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش.

در شکل ۱۱ مقایسه‌ای از نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش بررسی اثر نیروی سنبه مخالف نشان داده شده است که تطابق خوبی را نشان می‌دهد، به طوری که درصد خطای موجود حدود ۱۰٪ می‌باشد. بعد از انجام پولیش کاری عرض نمونه، آن را زیر میکروسکوپ نوری برده و با بزرگ‌نمایی ۵۰X از آن تصویر گرفته شد.



شکل (۱۱): مقایسه اثر نیروی سنبه مخالف بر ارتفاع ناحیه صیقلی در آزمایش‌ها و شبیه‌سازی.

شکل ۱۲ تنش پس از پایان برش را نشان می‌دهد. تنش پولاک در فصل مشترک‌ها دارای بیشترین مقدار است. در فصل مشترک بالایی پولاک، نزدیک به ناحیه لقی، بیشترین تنش حدود ۳۵۰ MPa می‌باشد. مقادیر تنش در لایه مسی به دلیل استحکام بیشتر آن، تقریباً دو برابر تنش در آلومینیوم است. در ورق سوراخ‌دار نیز در هر دو فصل مشترک بالا و پایین، نقاط نزدیک به لبه و روی لبه بیشترین مقدار حدود ۳۵۰ MPa را نشان می‌دهند.

9. Sedighi, M. and Honarpisheh, M. "Experimental Study of Through-Depth Residual Stress in Explosive Welded Al/Cu/Al Multilayer", *Materials & Design*, Vol. 37, pp. 577-581, 2012.
10. Gulenc, B. "Investigation of Interface Properties and weldability of Aluminum and Copper Plates by Explosive Welding Method", *Materials & Design*, Vol. 29, No. 1, pp. 275-278, 2008.
11. Poizat, C., Campagne, L., Daridon, L., Ahzi, S., Husson, C., and Merle, L. "Modelling and Simulation of Thin Sheet Blanking Using Damage and Rupture Criteria", *Int. J. Forming Proc.*, Vol. 8, pp. 29-47, 2005.
12. Ji, L., Huang, G., and Gary, J.C. "Forming Limit and Fracture Mode of Microscale Laser Dynamic Forming", *J. Manufacturing Sci. and Eng.*, Vol. 132, No. 6, 2010.
13. Rachik, M., Roelandt, J.M., and Maillard, A. "Some Phenomenological and Computational Aspects of Sheet Metal Blanking Simulation", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 128, No's. 1-3, pp. 256-265, 2002.
14. Shahsavan, M. "Numerical and Experimental Investigation of Effective Parameters in Fine-Blanking Process", Thesis of Master of Sci., Mechanical Eng. Dep't, Iran Univ. of Sci. and Tech., 2011 (In Persian).
3. Chen, Z.H., Chan, L.C., Lee, T.C., and Tang, C.Y. "An Investigation on the Formation and Propagation of Shear Band in Fine-Blanking Process", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 138, No. 1, pp. 610-614, 2003.
4. Thipprakmas, S. "Finite-Element Analysis of V-Ring Indenter Mechanism in Fine-Blanking Process", *Materials & Design*, Vol. 30, No. 3, pp. 526-531, 2009.
5. Thipprakmas, S., Rojananan, S., and Paramaputi, P. "An Investigation of Step Taper-Shaped Punch in Piercing Process Using Finite Element Method", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 197, No. 1, pp. 132-139, 2008.
6. Thipprakmas, S., Jin, M., and Murakawa, M. "Study on Flanged Shapes in Fineblanked-Hole Flanging Process (FB-hole flanging process) Using Finite Element Method (FEM)", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 192-193, pp. 128-133, 2007.
7. Thipprakmas, S., Jin, M., and Murakawa, M. "An Investigation of Material Flow Analysis in Fineblanking Process", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 192-193, pp. 237-242, 2007.
8. Parsa, M.H., Yamaguchi, K., and Takakura, N. "Redrawing Analysis of Aluminum-Stainless Steel Laminated Sheet Using FEM Simulations and Experiments", *Int. J. Mechanical Sci.*, Vol. 43, No. 10, pp. 2331-2347, 2001.

Archive of SID