

پیش بینی زاویه خمش در شکل دهی لیزری فلزات با استفاده از محدوده تغییرات ریز ساختاری ایجاد شده

محمد حسین پور گللو^۱ حسن مسلمی نائینی^۲ و غلامحسین لیاقت^۳ سعید جلوانی^۴
بخش مهندسی مکانیک بخش مهندسی مکانیک پژوهشکده لیزر
دانشگاه محقق اردبیلی دانشگاه تربیت مدرس سازمان انرژی اتمی ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۴/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۹/۱۴)

چکیده

در حال حاضر، شکل دهی ورق‌های فلزی با استفاده از پرتو لیزر برای صنایعی مانند هوا فضا، خودروسازی و کشتی سازی که قبلاً از قالب و پرس‌های بزرگ و پرهزینه برای شکل دهی فلزات استفاده می‌کردند، دارای ارزش زیادی است. در این مقاله، به منظور کاهش زمان طولانی محاسبات خمش خطی ورق‌های فلزی با استفاده از پرتو لیزر که معمولاً با تحلیل سه-بعدی و غیر خطی اجزا محدود همراه است، یک مدل ساده تحلیل مکانیکی برای پیش بینی زاویه خمش ارائه شده و در این مقاله تأثیر پارامترهای مؤثر بر زاویه خم ورق‌های فلزی در فرآیند شکل دهی لیزری به صورت تحلیلی مطالعه شده است. پیش بینی زاویه خم با استفاده از محدوده‌ای است که تغییرات ریز ساختاری در مقطع ورق ایجاد شده و این محدوده از آزمایش‌های تجربی صورت گرفته، محاسبه شده و در پیش‌بینی زاویه خمش استفاده شده است. مقایسه داده‌های مدل تحلیلی مکانیکی و تجربی تطابق نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شکل دهی لیزری، شکل دهی ورق‌های فلزی، خمش خطی ورق‌های فلزی با لیزر

The Bending Angle Prediction, Using the Size of Microstructure Change in the Laser Forming Process

M. Hoseinpour Gollo H. Moslemi Naeini and G.h. Liaghat
Mech. Eng. Group Mech. Eng. Group
Mohaghegh Ardabili Univ. Tarbiat Modares Univ.

S. Jelvani
Laser Research Center
Nuclear Science &
Tech. Research Institute

ABSTRACT

The laser sheet metal forming process has significant importance in industries such as aerospace, automotive, and ship building, which previously relied on using expensive stamping dies and presses. In this paper, a simplified model has been developed to predict the bending angle. The calculation of bending angle by a simplified model takes less time than three-dimensional finite element simulation, which is used to analyze the process. The effect of process parameters on bending angle and predicting of bending angle by calculating plastic zone have been studied. The tests have shown that the bending angle is directly proportional to the laser power and is in inverse proportion to the path feed-rate and the laser spot beam diameter. The comparison between theoretical and experimental results has shown reasonable agreements.

Keywords: Laser Forming, Sheet Metal Forming, Linear Laser Bending

Archive of SID

وارد نموده و توانایی ایجاد دمای بسیار بالا، در سطح فلز دارد بنابراین می توان گرادیان دمایی دلخواه را حتی در ورق های نازک و فلزاتی مانند مس که دارای ضریب رسانش بالایی هستند نیز ایجاد کرد. اما شعله یک دمای ثابتی را به سطح قطعه کار داده و شار حرارتی به دمای سطح ورق بستگی دارد، بنابراین دمای سطح ورق به بیش از دمای شعله افزایش پیدا نمی کند. بنابراین ایجاد گرادیان دمایی دلخواه را در فلزاتی با ضریب رسانش بالا غیر ممکن می سازد.

ثانیاً اختلاف مهم بعدی در قابلیت کنترل این دو فرآیند می باشد. قطر مقطع پرتو لیزر از دهم میلیمتر تا چند سانتی متر و شار انرژی پرتو لیزر نیز می تواند از چند میلی وات تا چند کیلو وات تغییر کند [۱]. اما کنترل شعله نسبت به پرتو لیزر بسیار مشکل می باشد زیرا شار انرژی یا دمای شعله بستگی به ظرفیت اکسیژن و مخلوط گاز دارد که کنترل این دو مشکل است. بعلاوه قطر مقطع شعله بسیار بزرگتر از مقطع پرتو لیزر بوده و کنترل آن نیز بسیار مشکل می باشد. شکل دهی فلزات با لیزر بر خلاف شکل دهی سنتی ورقهای فلزی نیاز به هیچگونه تماس مکانیکی ندارد. به همین دلیل از این روش به عنوان یک ابزار مجازی^۱ شکل دهی فلزات نام برده می شود. از مزایای این روش می توان به انعطاف پذیری سیستم و قابلیت اتوماسیون خوب همراه با سایر کاربردهای لیزر مثل برش و جوشکاری اشاره کرد [۲].

پرتو لیزر به هنگام شکل دهی با القا تنش های حرارتی بدون ذوب در سطح قطعه کار برای ایجاد خمش یا انحناء به صورت کنترل شده بکار می رود. بنابراین تنش های داخلی ایجاد شده باعث القا کرنش پلاستیک و در نهایت باعث خمش، کوتاه شدن و یا باعث کماتش در محل برخورد پرتو بسته به مکانیزم بکار برده، می شود.

۱- علائم اختصاری

ϵ_r	کرنش شعاعی کل دیسک
ϵ_θ	کرنش مماسی کل دیسک
u_D	جابجایی شعاعی دیسک
mm	شعاع دیسک
r	شعاع دیسک
mm	مدول یانگ
E_D	مدول یانگ
N/mm^2	تنش شعاعی دیسک
σ_r	تنش شعاعی دیسک
N/mm^2	ضریب پواسون دیسک
ν_D	ضریب پواسون دیسک
N/mm^2	تنش مماسی دیسک
σ_θ	تنش مماسی دیسک
ϵ_r^*	کرنش پسماند شعاعی
ϵ_θ^*	کرنش پسماند مماسی
N/mm^2	تنش دیسک
σ_D	تنش دیسک
ϵ^*	کرنش پسماند دیسک
mm	جابجایی شعاعی در ورق
u_p	جابجایی شعاعی در ورق
N/mm^2	فشار یکنواخت اعمالی
p	فشار یکنواخت اعمالی
mm	جابجایی شعاعی در ورق
u_p	جابجایی شعاعی در ورق
N/mm^2	فشار یکنواخت اعمالی
p	فشار یکنواخت اعمالی
N/mm^2	مدول یانگ ورق
E_p	مدول یانگ ورق
mm	شعاع سوراخ
a	شعاع سوراخ
ν_p	ضریب پواسون ورق
mm	جابجایی در $r=a$
u_D	جابجایی در $r=a$
N/mm^2	تنش تسلیم دیسک
σ_{yD}	تنش تسلیم دیسک
T_C	دمای تسلیم ماده
cal/s	انرژی منبع
q	انرژی منبع
mm/s	سرعت حرکت پرتو
v	سرعت حرکت پرتو
mm	ضخامت ورق
g	ضخامت ورق
درجه	زاویه خمش
δ	زاویه خمش
$2/4$	C_1
$0/39$	C_2

۲- مقدمه

ریشه شکل دهی فلزات با استفاده از پرتو لیزر به فرآیند خمش ورق های فلزی با استفاده از شعله یا حرارت اکسی استیلن برمی گردد. چند اختلاف مهم و اساسی بین روش سنتی^۲ و روش^۱ فلزات با شعله و پرتو لیزر وجود دارد. اولاً پرتو لیزر یک شار حرارتی ثابت به سطح ورق فلزی

Archive of SID

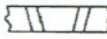










حرارتی-مکانیکی^۸ توسط نویسندگان این مقاله با نرم افزار اباکس^۹ ارائه شده و پارامترهای موثر بر خمش بررسی شده است [۸]. اما بررسی روش مکانیزم گرادیان دمایی به صورت تحلیلی توسط ولرتسن^{۱۰} با ارائه یک مدل تحلیلی بسیار ساده آغاز شد [۹-۱۰]. در ادامه با فرض ورق به صورت یک تیر ساده دو لایه توسعه یافت [۱۱]. سپس مدل ارائه شده در مراجع فوق، توسط یایو^{۱۱} با در نظر گرفتن خمش منفی و خاصیت الاستیک ماده بر روی همان مدل قبلی ارائه شد [۱۲]. که در هیچکدام از مدل‌های تحلیلی ارائه شده فوق از اندازه محدوده تحت گرمایش جهت محاسبه زاویه خمش استفاده نشده بود.

همچنین در کار دیگری از نویسندگان این مقاله مطالعه‌ای برای شناخت فرآیند و بررسی پارامترهای موثر به صورت تجربی انجام گرفته است [۱۳]. اما هدف این مقاله پیش بینی زاویه خم با استفاده از محدوده ای است که در آن تغییرات ریز ساختاری ایجاد شده است و این محدوده تحت تأثیر گرمایش از آزمایشات تجربی انجام شده، محاسبه شده و در تحلیل محاسبه زاویه خم جایگذاری شده و زاویه خمش پیش بینی شده است.

۳- تدوین مدل ساده تحلیلی مکانیکی برای فرآیند شکل دهی فلزات با استفاده از لیزر

برای رسیدن به حدی از سادگی که بتوان فرآیند را به صورت ترموالاستو پلاستیک تحلیل کرد، فرضهای زیر بر تحلیل تدوین شده اعمال شده است.

- ۱) قطر دیسک مفروض در ضخامت ورق تغییر و توزیع همدمایی در ضخامت ورق به صورت نیم بیضی می باشد.
- البته این فرض از چند جهت قابل بررسی است.
- الف- منطقه تحت تأثیر پرتو کاملاً گرد نبوده و بیشتر شبیه به قطره در حال سقوط می باشد که در شکل ۳ نشان داده شده است و هرچقدر انرژی وارده از منبع بیشتر یا اینکه منبع دمای بیشتری داشته باشد دنباله بزرگتر خواهد بود.

روش کوتاه کردن ^۱	روش کماتشی ^۲	روش گرادیان دمایی ^۳	مکانیزم
			توزیع دما همگن
			شکل گیری به هنگام سرد شدن
			جهت گرمایش
			نمونه کار خمش ورق

شکل (۱): مکانیزمهای شکل دهی فلزات با استفاده از لیزر.

در شکل ۱ روشهای مختلف شکل دهی فلزات با پرتو لیزر به لحاظ توزیع دمایی، شکل گیری به هنگام سرد شدن، مسیرهای گرمایش و اشکال ایجاد شده به صورت شماتیک آورده شده است [۴-۳]. همچنین در شکل ۲ فرایند مکانیزم گرادیان دمایی به صورت جداگانه آورده شده است که در این شکل انبساط ایجاد شده در بخش فوقانی ورق و ممان ایجاد شده در بخش الاستیک به هنگام گرمایش و انقباض به وجود آمده به هنگام گرمایش و استحکام پایین ناشی از حرارت در سطح فوقانی ورق را که باعث خمش می باشد نشان داده است.

مدلهای عددی متعددی در سالهای اخیر برای شکل دهی فلزات با استفاده از لیزر ارائه شده است که از جمله آنها می توان به الگوریتم عددی ارائه شده توسط کرسنیدی^۴ که با نرم افزار انسیس^۵ انجام شده اشاره کرد [۵]. در ادامه شی^۶ شبیه سازی ورقهای بزرگ را در ابعاد چند برابر کوچکتر پیشنهاد کرده است [۶]. سپس یاو^۷ تأثیر نیروهای خارجی را بر خمش فلزات با استفاده از لیزر بررسی کرده است [۷]. اخیراً یک تحلیل عددی کوپل

1-Upsetting Mechanism (UM)

2-Buckling Mechanism (BM)

3-Temperature Gradient Mechanism (TGM)

4-Kyrzanidi

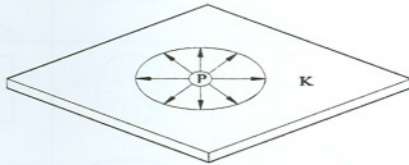
5-ANSYS

6-Shi

7-Yao

Archive of SID

داده و سفتی این ناحیه همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده با مقدار K که از معادل سازی فرآیند با یک فشار یکنواخت اعمالی از داخل حفره موجود در یک ورق نامحدود محاسبه خواهد شد،



شکل (۴): مدل ناحیه الاستیک با سفتی K .

در واقع همان محدودیتی که در فرض اول داشتیم به لحاظ اینکه منطقه پلاستیک متقارن نیست اینجا نیز وجود دارد،

(۲) افزایش دما باعث انبساط حرارتی و بارگذاری پلاستیک همچنین کاهش دما باعث بازگشت از منطقه پلاستیک و پسماند یک مقدار کرنش که این کرنش باعث خمش خواهد شد و

(۳) در نهایت اینکه مقدار خمش نهایی از مجموع خمشهای ناشی از کرنشهای پسماند هر دیسک محاسبه خواهد شد.

۴- تحلیل تئوری

به هنگام بار گذاری دیسک مفروض ارتباط بین تنش و کرنش به شکل زیر خواهد بود [۱۴، ۱۵]:

$$\epsilon_r = \frac{du_D}{dr} = \frac{1}{E_D} (\sigma_r - \nu_D \sigma_\theta) + \epsilon_r^* \quad \text{در جهت شعاعی} \quad (1)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{u_D}{r} = \frac{1}{E_D} (\sigma_\theta - \nu_D \sigma_r) + \epsilon_\theta^* \quad \text{در جهت مماسی} \quad (2)$$

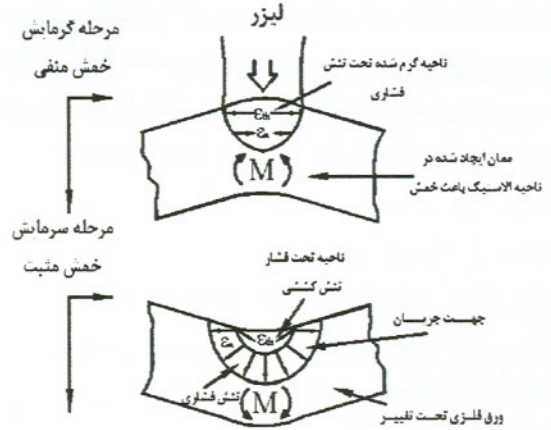
به هنگام اعمال فشار یکنواخت دیسک معادله (۲) به شکل زیر ساده خواهد شد:

$$u_D = \left[\frac{1}{E_D} (1 - \nu_D) \sigma_D + \epsilon^* \right] r \quad (3)$$

جابجایی شعاعی در یک ورق سوراخدار تحت فشار یکنواخت P و شعاع a عبارت است از [۱۶]:

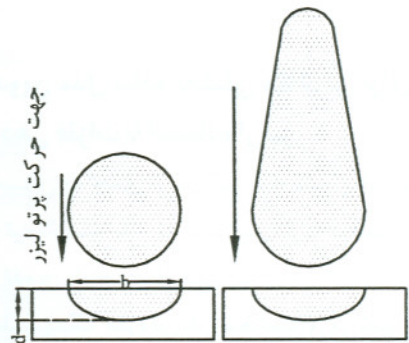
$$u_p = \frac{pa^2}{E_p r} (1 + \nu_p) \quad (4)$$

در فصل مشترک یعنی جایی که $r=a$ هست تأثیر ناحیه الاستیک بر ناحیه پلاستیک با ضریب سفتی K تعریف شده



شکل (۲): فرآیند خمش با گرادیان دمایی .

ب- ورق فلزی نامحدود نبوده و دارای ابعاد مشخصی است و این مسئله زمانی که ابعاد ورق در حال شکل دهی کوچک باشد تأثیر بیشتری بر نتیجه فرآیند خواهد داشت بنابراین جوابها از مقدار واقعی قدری انحراف خواهند داشت.



شکل (۳): چگونگی تغییر منطقه تحت کرنش پلاستیک در ضخامت ورق.

ج- تأثیر لبه های ورق بر اندازه خمش در نظر گرفته نشده است لازم به ذکر است که سفتی ورق به هنگام رسیدن پرتو به لبه کاهش یافته و این موضوع تأثیرش به هنگام خمشهای کوچک محسوس خواهد بو.

فرضیه دوم اینکه فرایند ترموالاستو پلاستیک در یک منطقه کوچک و گرد به صورت متقارن اتفاق می افتد. ناحیه ای که به صورت الاستیک باقیمانده به هنگام انقباض و انقباض ناحیه پلاستیک از خود مقاومت نشان

Archive of SID

در بیان فیزیکی معادله (۱۳) می توان گفت که ماکزیمم کرنش پلاستیک برابر است با کرنشی که از بار گذاری حرارتی ایجاد می شود.

کرنش باقیمانده ε^* بعد از سرمایش از تفاضل ماکزیمم کرنش پلاستیک و الاستیک بصورت زیر حاصل خواهد شد:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_{pm} - \varepsilon_e. \quad (14)$$

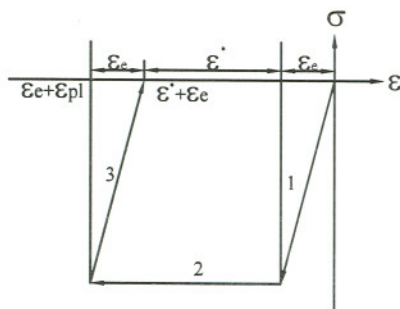
با ملاحظه کرنش الاستیک خواهیم داشت:

$$\varepsilon_e = -\sigma_{yD} \left(\frac{(1-\nu_D)}{E_D} + \frac{1}{Ka} \right), \quad (15)$$

که در آن، جمله اول نشان دهنده تأثیر ورق بر کرنش الاستیک و جمله دوم نشان دهنده تأثیر دیسک خواهد بود. که با جایگذاری معادلات (۱۳) و (۱۵) در معادله (۱۴) خواهیم داشت:

$$\varepsilon^* = -\alpha T_C + \sigma_{yD} \left(\frac{(1-\nu_D)}{E_D} + \frac{1}{Ka} \right). \quad (16)$$

به صورت فیزیکی می توان گرمایش به توسط لیزر را با استفاده از منحنیهای ایده ال تنش کرنش همانند شکل ۵ نشان داد.



شکل (۵): دیاگرام تنش و کرنش ایده ال گرمایش و سرمایش دیسک.

(۱) با افزایش دما در ورق یک تغییر شکل الاستیک مشاهده می شود که با خط ۱ نشان داده شده است و

(۲) با ادامه گرمایش حالت ماده در مرکز پرتو تغییر کرده و وارد ناحیه پلاستیک خواهد شد. در این بخش، فشار وارده بر منطقه پلاستیک از ناحیه الاستیک با گسترش بخش پلاستیک بیشتر خواهد شد. تغییر شکل پلاستیک در فرآیند با خط ۲ نشان داده شده است و

است که معادله (۴) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$K = \frac{P}{u_p} = \frac{Ep}{a(1+\nu_p)}. \quad (5)$$

برای محاسبه تنش روی دیسک می توان نوشت:

$$\sigma_D = -Ku_D. \quad (6)$$

تنش در فصل مشترک دیسک و ورق یعنی جایی که $r=a$ برابر است با:

$$\sigma = \frac{-\varepsilon^* aK}{1 + \frac{(1-\nu_D)}{E_D} Ka}. \quad (7)$$

همچنین، در $r=a$ که $\sigma = \sigma_D = \sigma_p$ تنش ماکزیمم زمانی خواهد بود که دما در دیسک به بیشترین مقدار خود برسد و در این موقعیت جابجایی دیسک را می توان به وسیله مجموع کرنش الاستیک و پلاستیک حرارتی ضربدر شعاع دیسک بصورت زیر محاسبه کرد:

$$(\varepsilon_{eD} + \varepsilon_{pm} + \alpha T_C) a = -\frac{\sigma_{yD}}{K}. \quad (8)$$

کرنش الاستیک دیسک را می توان در جایی که دیسک به تسلیم رسیده است با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد:

$$\varepsilon_{eD} = \frac{\sigma_{yD}}{E_D} (1-\nu_D). \quad (9)$$

با جایگذاری معادله (۹) در معادله (۸) داریم:

$$\left(\frac{\sigma_{yD}}{E_D} (1-\nu_D) + \varepsilon_{pm} + \alpha T_C \right) a = -\frac{\sigma_{yD}}{K}. \quad (10)$$

همچنین با استفاده از معادله (۱۰) و حل این معادله نسبت به σ_{yD} نتیجه به شکل زیر خواهد بود:

$$\sigma_{yD} = -\frac{(\varepsilon_{pm} + \alpha T_C)}{\frac{(1-\nu_D)}{E_D} + \frac{1}{Ka}} = -\frac{(\varepsilon_{pm} + \alpha T_C) aK}{\frac{(1-\nu_D)}{E_D} aK + 1}. \quad (11)$$

با فرض اینکه در دماهای بالا مقدار تنش تسلیم و مدول الاستیسیته بسیار ناچیز می باشد و در نتیجه با این فرض کرنش پلاستیک بزرگ فرض شده است، پس:

$$-\frac{(\varepsilon_{pm} + \alpha T_C) aK}{\left(\frac{(1-\nu_D)}{E_D} \right) aK + 1} = 0, \quad (12)$$

همچنین

$$\varepsilon_{pm} = -\alpha T_C. \quad (13)$$

Archive of SID

معادله بین کرنش پلاستیک باقیمانده و پارامترهای گرمایش به صورت تجربی برای شکل دهی با لیزر چنین در نظر گرفته شده است:

$$\frac{b}{g} = C_1 \sqrt{\frac{q}{vg^2}}, \quad (19)$$

$$\frac{d}{g} = C_2 \frac{q}{vg^2}. \quad (20)$$

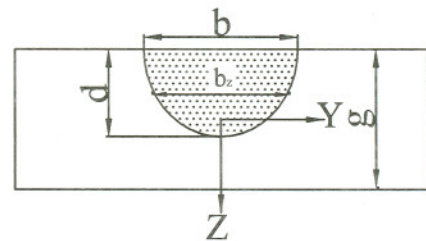
جدول (۱): مشخصه های حرارتی و مکانیکی AISI1010 [18, 17].

T °C	k Wm ⁻² K ⁻¹	C _p JKg ⁻¹ K ⁻¹	Wm ⁻² K ⁻¹	
			h _u	h _{down}
۰	۵۱/۹	۴۵۰		
۱۰۰	۵۱/۱		۷/۶۴۵۷۷	۳/۸۲۲۴۲
۲۰۰	۴۹	۵۱۹	۹/۰۴۴۹۵	۴/۵۲۲۴۸
۳۰۰	۴۶/۱	۵۵۷	۱۰/۰۸۶۳	۵/۰۴۳۱۵
۴۰۰	۴۲/۷	۵۹۹	۱۰/۳۳۵۶۴	۵/۱۶۷۸۲
۵۰۰	۳۹/۴	۶۶۲	۱۰/۵۲۵۶۳	۵/۲۶۲۸۲
۶۰۰	۳۵/۶	۷۴۹	۱۰/۷۳۶۹۱	۵/۳۶۸۴۵
۷۰۰	۳۱/۸	۸۴۶	۱۰/۸۹۴۷۰	۵/۴۶۷۳۵
۸۰۰	۲۶	۹۵۰	۱۱/۰۰۰۲	۵/۵۰۰۱۰
۱۰۰۰	۲۷/۲		۱۱/۱۷۴۴	۵/۵۸۷۲۲
۱۵۰۰	۲۹/۷	۴۰۰		

(۳) در مرحله بعد پس از برداشتن پرتو، کرنش الاستیک فرآیند برگشته و کرنش پلاستیک باقی خواهد ماند. این مرحله با خط ۳ نشان داده شده است.

۵- ناحیه متأثر از کرنش پلاستیک

می توان فرض کرد که ناحیه متأثر از کرنش پلاستیک در صفحه عمود بر جهت حرکت پرتو لیزر به صورت یک نیم بیضی می باشد و این فرض در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل (۶): ناحیه متأثر از کرنش پلاستیک.

ناحیه تحت تأثیر کرنش پلاستیک بر مقدار خمش تأثیر خواهد داشت بنابراین باید دنبال این مسئله بود که منطقه تحت تأثیر کرنش پلاستیک را به صورت یک معادله ریاضی تعریف کرد با فرضی که در شروع تحلیل شد می توان ناحیه تحت تأثیر کرنش پلاستیک را به صورت یک نیم بیضی تعریف کرد، یعنی:

$$\frac{y^2}{\left(\frac{b}{2}\right)^2} + \frac{\left(z + \frac{g}{2}\right)^2}{d^2} = 1. \quad (17)$$

البته، محور مختصات در وسط مقطع ورق، با جهت عکس محور Z تعریف شده است. همچنین عرض منطقه تحت تأثیر کرنش را می توان با پارامتر b_z در هر ضخامت دلخواهی از ورق با استفاده از معادله زیر بدست آورد:

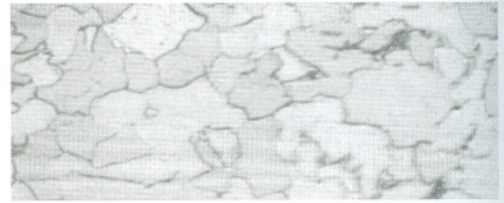
$$b_z = b \sqrt{1 - \frac{1}{d^2} \left(z + \frac{g}{2}\right)^2}. \quad (18)$$

باید توجه داشت که در این تحلیل منطقه تحت تأثیر کرنش پلاستیک تابعی است از انرژی وارده، سرعت حرکت پرتو، ضخامت ورق می باشد.

T °C	σ _y (MPa)	E (GPa)	α (10 ⁻⁶ /°C)
۱۰	۲۹۰	۲۰۰	۱۰
۱۰۰	۲۶۰	۲۰۰	۱۱
۳۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۲
۴۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۳
۵۵۰	۱۲۰	۱۱۰	۱۴
۶۰۰	۱۱۰	۸۸	۱۴
۷۲۰	۹/۸	۲۰	۱۴
۸۰۰	۹/۸	۲۰	۱۴
۱۲۰۰	-	۲	۱۵

Archive of SID

با بزرگنمایی ۶۰۰، قبل و بعد از برخورد پرتو لیزر آورده شده و اندازه گیری این محدوده با میکروسکوپ نوری انجام شده است.



جدول (۲): نتایج به دست آمده از آزمایشات تجربی برای C_1 و C_2

	q	v	g	q/vg ²	b	d	C1	C2
	cal/s	mm/s	mm	cal/mm ³	mm	mm		
1	451.5	2	10	2.25	35.31	7.66	2.35	0.33
2	500.65	2.5	10	1.97	35.61	8.22	2.53	0.41
3	486	2	10	2.43	35.74	8.83	2.29	0.36

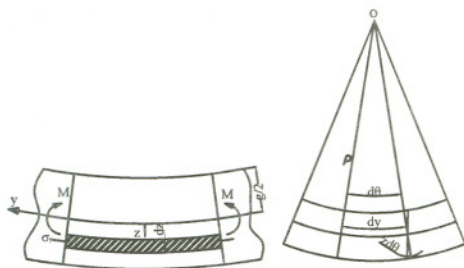
در ادامه مقادیر ثابت C_1 ، C_2 به ترتیب ۲/۴ و ۰/۳۹ محاسبه شده است.

۷- محاسبه زاویه خمش

با داشتن کرنش پسماند و شرایط گرمایش مشخص می توان زاویه خمش حاصل از حرکت پرتو لیزر را محاسبه کرد. با فرضهای در نظر گرفته شده یعنی با عمود بودن پرتو به یک ورق فلزی چهار گوش می توان ممانهای خمشی را به این صورت محاسبه نمود [۳]. مطابق با قانون هوک می توان نوشت:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) = 0, \quad (21)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x). \quad (22)$$



شکل (۹): دیاگرام آزاد و انحنای ورق.

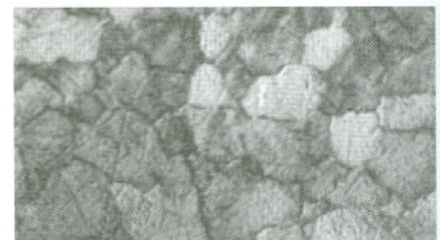
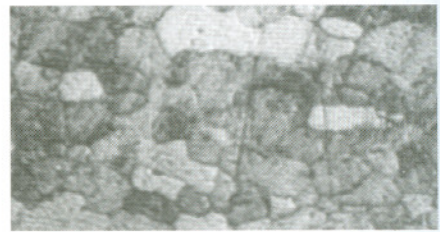
از معادله (۲۱) نتیجه می شود که $\sigma_x = \nu\sigma_y$. بنابراین، معادله (۲۲) به معادله (۲۳) تبدیل خواهد شد.

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}(1 - \nu^2) \quad (23)$$

در ادامه، برای ورق تحت بار می توان نوشت:

$$dy = \rho d\theta, \quad (24)$$

شکل (۷): ریز ساختار ورق با ضخامت ۱۰ mm قبل از برخورد پرتو لیزر با بزرگنمایی ۶۰۰ X



شکل (۸): ریز ساختار بخش فوقانی ورق با ضخامت ۱۰ mm بعد از برخورد پرتو لیزر با بزرگنمایی ۶۰۰ X.

۶- آزمایشات تجربی برای تعیین ناحیه متأثر از کرنش پلاستیک

در انجام آزمایشها از ورق فولاد کم کربن (ST-12) استفاده شده است که مشخصه های حرارتی و مکانیکی آن در جدول ۱ نشان داده شده است. برای انجام آزمایشهای شکل دهی فلزات با استفاده از لیزر از یک لیزر پیوسته Nd:YAG استفاده شده است. گازهای محافظ استفاده شده در آزمایشها نیز شامل آرگون و نیتروژن بوده است. همچنین به منظور حرکت نمونه ها از یک میز XYZ قابل کنترل به وسیله کامپیوتر استفاده شد. لازم به ذکر است که آزمایشات انجام شده بر پایه طراحی آزمایش بوده که در ادامه چند مرحله از آزمایشات تجربی آورده شده است. در ضمن www.SID.ir علود استفاده در جدول ۱ آورده شده است. همچنین در شکلهای ۷-۸ ریزساختارهای مواد

Archive of SID

$$M = E\varepsilon^* \int_{-\frac{g}{2}}^{\frac{d-g}{2}} \frac{b_z}{b} z dz, \quad (32)$$

که در آن، مقدار b_z از معادله (۱۸) و مقدار ε^* از معادله (۱۶) محاسبه شده و با جایگذاری در معادله (۳۲) خواهیم داشت:

$$\delta = -\frac{12(1-\nu^2)}{g^3} \varepsilon^* \int_{-\frac{g}{2}}^{\frac{d-g}{2}} b_z z dz. \quad (33)$$

در ادامه، با توجه به اینکه مقدار خمش ورق به پارامترهای مختلفی بستگی خواهد داشت از جمله این پارامترها می توان به انرژی وارد به ورق و سرعت حرکت منبع لیزر اشاره کرد. از این به بعد دو حالت ممکن است برای فرآیند پیش آید.

حالت اول اینکه انرژی وارد به ورق کم یا سرعت حرکت بالا باشد. که در این صورت بخشی از ضخامت ورق تحت تأثیر کرنش پلاستیک قرار خواهد گرفت.

حالت دوم اینکه انرژی وارد به ورق زیاد یا سرعت حرکت پائین باشد در این حالت کل ضخامت ورق تحت تأثیر کرنش پلاستیک قرار خواهد گرفت. که هر دو این حالات تأثیر خود را محدوده انتگرال گیری معادله (۳۳) اعمال خواهند داشت.

در حالت اول محدوده انتگرال گیری از $-\frac{g}{2}$ تا $d - \frac{g}{2}$ و در حالت دوم از $-\frac{g}{2}$ تا $\frac{g}{2}$ خواهد بود در حالت اول پس از انتگرال گیری از معادله (۳۳)، معادله (۳۴) حاصل خواهد شد.

$$\delta = -\frac{2(1-\nu^2)}{g^3} \varepsilon^* bd \left[2d - \frac{3\pi}{4} g \right] \quad (34)$$

حالت دوم پس از انتگرال گیری از معادله (۳۳) با این تفاوت که محدوده انتگرال گیری از $-\frac{g}{2}$ تا $\frac{g}{2}$ خواهد بود، معادله (۳۵) حاصل خواهد شد.

$$\delta = -\frac{2(1-\nu^2)}{g^3} \varepsilon^* bd \left[-2d \left(\left(1 - \left(\frac{g}{d} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}} - 1 \right) - \frac{3g}{4} \left(\frac{g}{d} \sqrt{1 - \left(\frac{g}{d} \right)^2} + \sin^{-1} \left(\frac{g}{d} \right) \right) \right] \quad (35)$$

از معادلات (۱۹-۲۰) در معادلات (۳۴-۳۵) استفاده کرده و سعی بر مستقل کردن این معادلات از پارامترهای

که در آن، ρ شعاع انحنا ورق نسبت به لایه میانی ورق تحت بار می باشد. نسبت به هندسه ورق خواهیم داشت:

$$\varepsilon_y = -\frac{z d \theta}{dy}. \quad (25)$$

با جایگذاری معادله (۲۴) در معادله (۲۵) خواهیم داشت:

$$\varepsilon_y = -\frac{z}{\rho}. \quad (26)$$

معادله (۲۳) نسبت به σ_y حل شده و ε_y از معادله (۲۵) جایگذاری شود در آن صورت خواهیم داشت:

$$\sigma_y = \frac{-Ez}{1-\nu^2} \cdot \frac{1}{\rho}. \quad (27)$$

اندازه ممان خمشی اعمال شده به ورق ناشی از هر تنش اعمالی در ضخامت ورق حول محور خنثی بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$M = \int_{-\frac{g}{2}}^{\frac{d-g}{2}} \sigma_y z dz. \quad (28)$$

با جایگذاری معادله (۲۷) در معادله (۲۸) خواهیم داشت:

$$M = \int_{-\frac{g}{2}}^{\frac{d-g}{2}} \frac{-Ez^2}{1-\nu^2} \cdot \frac{1}{\rho} dz = \frac{-Eg^3}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{\rho}. \quad (29)$$

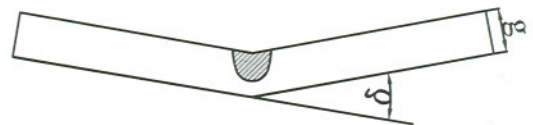
اگر b ماکزیمم عرضی از ورق باشد که تحت تأثیر کرنش پلاستیک قرار دارد و δ اندازه خمش ورق به رادیان باشد می توان معادله زیر را بین این دو نوشت:

$$b = \rho \delta. \quad (30)$$

در ادامه، با حل معادله (۲۹) نسبت به ρ و با جایگذاری در معادله (۳۰) خواهیم داشت:

$$\delta = -b \frac{12(1-\nu^2)}{g^3} \cdot \frac{M}{E}. \quad (31)$$

مقدار δ در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل (۱۰): خمش زاویه ای δ در صفحه Y-Z.

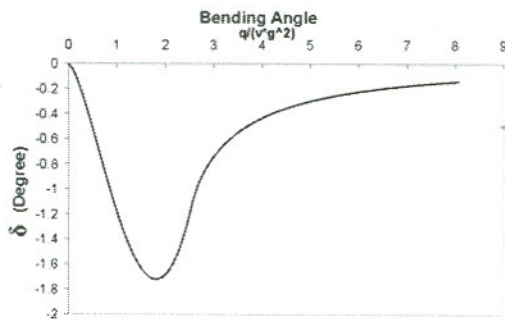
با توجه به اینکه عرض منطقه تحت تأثیر کرنش در ضخامت ورق متغیر است بنابراین ممان اعمالی بر ورق به

شکل زیر محاسبه خواهد شد:
www.SID.ir

Archive of SID

زمانیکه هنوز ناحیه کرنش پلاستیک کوچکتر از ضخامت ورق میباشد ترسیم خواهد شد (شکل ۱۱).

نمودار شکل ۱۲ برای حالتی که ناحیه کرنش پلاستیک با ضخامت ورق برابر است ترسیم شده است. زمانی که کرنش پلاستیک برابر با ضخامت ورق می شود از معادله (۲۰) خواهیم داشت $1 = \frac{d}{g} = C_2 \frac{q}{vg^2}$ آنگاه می توان نوشت: $\frac{q}{vg^2} = \frac{1}{C_2} = 2.564$. یعنی، تا زمانیکه نسبت $\frac{q}{vg^2}$ از عدد ۲/۵۶۴ کمتر باشد از منحنی معادله (۳۶) و اگر بزرگتر از آن باشد از معادله (۳۷) استفاده خواهد شد که هر دو نمودار به صورت همزمان در شکل ۱۳ نشان داده شده است مواردی که می توان بر روی شکل ۱۳ بحث کرد این است که ماکزیمم زاویه خمش زمانی اتفاق می افتد که هنوز کرنش پلاستیک برابر با ضخامت ورق نشده است و این خمش در $\frac{q}{vg^2} = \frac{9\pi}{40C_2}$ خواهد بود.



شکل (۱۳): شکل های ۱۱ و ۱۲ در یک دیاگرام برای مشخص کردن خمش زاویه ای با هر تنش پس ماند.

۸- آزمایشات تجربی جهت تایید مدل مکانیکی ارائه شده

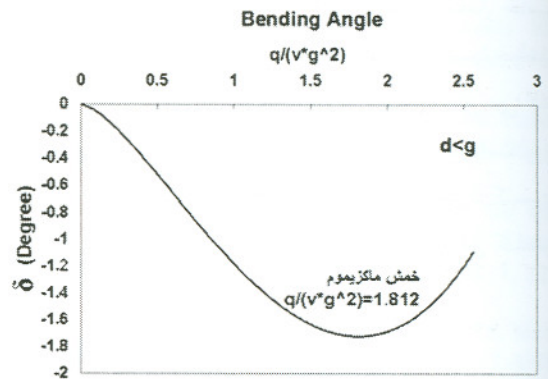
برای انجام آزمایش ها از لیزر پیوسته Nd:YAG با توان ۲ کیلووات، بیشینه ولتاژ خروجی ۱۲۰ ولت و جریان ۲۲ آمپر مدل U.S.LASER Corporation استفاده شد. به منظور ایجاد حرکت نسبی پرتو لیزر و قطعه کار نسبت به هم از یک میز سه محور XYZ قابل کنترل به وسیله رایانه مدل Hercus V300 CNC Mill استفاده شده است. همانطور

هندسی هستیم با که با جایگذاری معادلات فوق به ترتیب به معادلات (۳۶-۳۷) تبدیل خواهد شد.

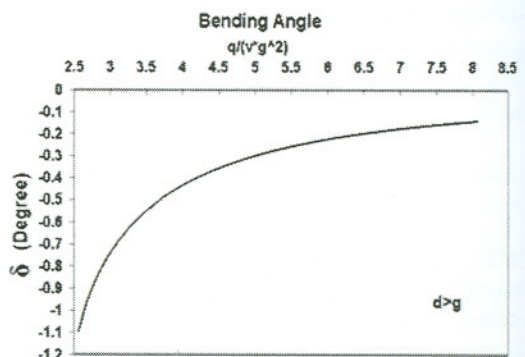
$$\delta = -2(1-v^2)C_1 \sqrt{\frac{q}{vg^2}} \varepsilon^* \left[2 \left(\frac{C_2 q}{vg^2} \right)^2 - \frac{3\pi C_2 q}{4 vg^2} \right] \quad (36)$$

$$\delta = -2(1-v^2) \varepsilon^* C_1 \sqrt{\frac{q}{vg^2}} \left[-2 \left(\frac{C_2 q}{vg^2} \right)^2 \left(\left(1 - \left(\frac{vg^2}{C_2 q} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}} - 1 \right) - \frac{3C_2 q}{2 vg^2} \left(\frac{vg^2}{C_2 q} \sqrt{1 - \left(\frac{vg^2}{C_2 q} \right)^2} + \sin^{-1} \left(\frac{vg^2}{C_2 q} \right) \right) \right] \quad (37)$$

با حل هر دو معادله می توان نشان داد زمانیکه درست کل ضخامت ورق به کرنش پلاستیک می رسد هر دو معادله یک مقدار برای خمش زاویه ای نشان می دهند. در ادامه برای نشان دادن این موضوع یک نمودار برای مقدار خمش

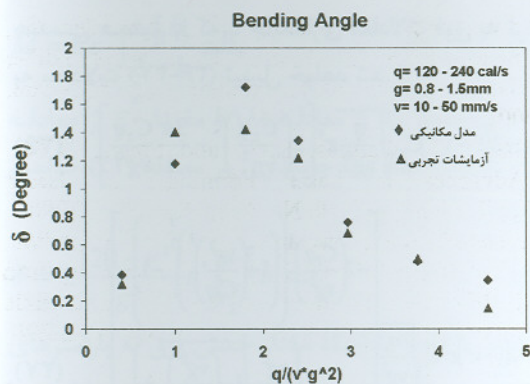


شکل (۱۱): خمش زاویه ای برای کرنش پلاستیک پس ماند با ضخامت کمتر از ضخامت ورق.



شکل (۱۲): خمش زاویه ای برای کرنش پلاستیک پسماند برابر با ضخامت ورق.

Archive of SID



شکل (۱۵): مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی.

۹- نتیجه گیری

در این مقاله، پیش بینی زاویه خم با استفاده از محدوده ای که تغییرات ریز ساختاری در ورق بر اثر حرکت پرتو لیزر ایجاد شده، مورد مطالعه قرار گرفته و یک مدل تحلیلی تدوین شده است. با افزایش پارامتر گرمایش، زاویه خم تا زمانیکه مقدار پارامتر فوق به مقدار خاصی که بهینه فرایند است نرسیده باشد، افزایش پیدا خواهد کرد. به عبارت دیگر، ماکزیمم خمش زمانی اتفاق می افتد که هنوز عمق کرنش پلاستیک به کل ضخامت ورق نرسیده است. یعنی، با افزایش کرنش پلاستیک تا کسری از ضخامت ورق زاویه خمش افزایش و پس از آن کاهش پیدا خواهد کرد.

۱۰- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می دانند از آقای دکتر سید مهدی مهدویان که امکان استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی نیاز این پژوهش (که مربوط به دانشگاه RMIT استرالیا بوده است) را فراهم کردند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

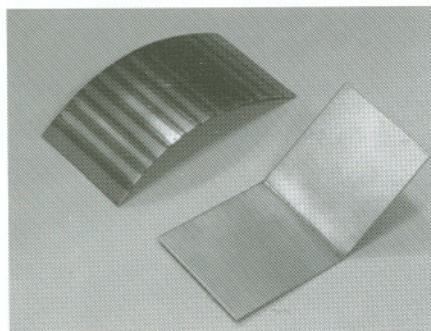
مراجع

1. Vollertsen, F., "Forming, Sintering and Rapid Prototyping" Handbook of the Eurolaser Academy, Vol. 2. Schuöcker, D (Editor), Chapman & Hall, London, pp. 357-453, 1998.
2. Watkins, K.G., Edwardson, S.P., Magee, J., Dearden, G., and French, P., "Laser Forming of Aerospace Alloys" AMTC, Seattle, Society of Automotive Eng., pp. 2001-2610, 2001.

که در شکل ۱۴-الف دیده می شود لیزر با استفاده از فیبر نوری^۱ به کله گی ماشین کنترل رایانه ای نصب شده است. در ادامه مقایسه ای بین نتایج بدست آمده از مدل تحلیلی تدوین شده و آزمایشات تجربی انجام شده است. شکل ۱۴-الف و ب دستگاه لیزر و نمونه ای از قطعات آزمایش شده را نشان داده است.



(الف)



(ب)

شکل (۱۴): (الف) دستگاه لیزر مورد استفاده در آزمایشات (ب) نمونه ای از قطعات آزمایش شده.

که نتایج بدست آمده از تجربه در نمودار شکل ۱۵ آورده شده و با نتایج تحلیل تدوین شده مقایسه شده است. مقایسه داده های مدل تحلیلی مکانیکی و تجربی تطابق نسبتاً خوبی را نشان داده است.

Archive of SID

18. ASM Metals Handbook, ASM Int., 10th Ed., Ohio, 1990.
3. Edwardson, S.P., Watkins, K.G., Dearden, G., and Magee, J., "3D LASER Forming of Saddle Shapes" LANE 2001, Erlangen, pp 559-568, 2001.
4. Magee, J., Watkins, K.G., and Steen, W.M., "Advances in Laser Forming", J. Laser Applications, Vol. 10, No. 6, pp. 235-246, 1998.
5. Kyrnanidi, A.K., Kermanidis, T.B., and Pantelkis, S.G., "Numerical and Experimental Investigation of the Laser Forming Process", J. Materials Processing Tech., Vol. 87, No. 1, pp. 281-290, 1999.
6. Shi, Y., Shen, H., and Yao, Z., "Application of Similarity Theory in the Laser Forming Process", Comput. Materials Science, Vol. 37, No. 2, pp. 323-327, 2006.
7. Yao, Z. and Shen, H., "Numerical Study on Laser Forming of Metal Plates with Pre-loads", Comput. Materials Science, Vol. 40, No. 1, pp. 27-32, 2007.
8. Hoseinpour Gollo, M., Moslemi Naeini, H., and Liaghat, G.H., "A Numerical and Experimental Study of Sheet Metal Bending by Pulsed ND: YAG Laser with Doe Method" MPT Conf., p. 150, 2008.
9. Vollertson, F., "Mechanisms and Models for Laser Forming", LANE Conf., Erlangen, pp. 345-359, 1994.
10. Vollertson, F., "An Analytical Model for Laser Bending", Lasers Eng., Vol. 2, No. 1, pp. 261-276, 1994.
11. Vollertson, F. and Rodle, M., "Model for the Temperature Gradient Mechanism of Laser Bending", LANE Conf., Erlangen, Vol. 1, pp. 371 - 378, 1994.
12. Yau, C.L., Chan, K.C., and Lee, W.B., "A New Analytical Model for Laser Bending", LANE Conf., Vol. 2, pp. 357-366, Erlangen, 1997.
13. Hoseinpour Gollo, M., Moslemi Naeini, and H., Liaghat, G.H., "An Experimental Study of Sheet Metal Bending by Pulsed Nd:YAG Laser with DOE Method", Int. J. Material Forming, Vol. 1, No. 3, pp.137-140, 2008.
14. Satoh, K. and Terasaki, T., "Effect of Welding Conditions on Welding Deformations in Welded Structural Materials", J. Japanese Welding Society, Vol. 45, No. 4, pp.302-308, 1976.
15. Jang, C.D., Seo, S.I., and Ko, D.E., "A study on Prediction of Deformation of Plate due to Line Heating", J. Ship Production, Vol. 13, No. 1, pp. 22-27, 1997.
16. Timoshinko, S.P. and Goodier, J.N., "Theory of Elasticity", Third Ed., McGraw-Hill, New York, 1970.
17. Brown, S. and Song, H., "Finite Element Simulation of Welding of Large Structures" J. Eng. for Industry, Vol. 114 No. 4, pp. 441-451, 1992.