



## تحلیل عددی بهینه سازی برش لیزری فولاد نرم با گاز کمکی اکسیژن

بنفشه احمدی، محمد جواد ترکمنی، جمشید صباغ زاده آزمایشگاه فرآوری مواد با لیزر، مرکز تحقیقات لیزر پایا پرتو، تهران، ایران، صندوق پستی۵۷۶–۵۴۶۶۵

چکیده – در این مقاله یک مدل ریاضی برای برش ورق فولاد نرم، با استفاده از لیزر CO2 پیوسته موج بهمراه گاز کمکی اکسیژن پیشنهاد شده است. این مدل بر اساس حل همزمان معادلات پایستگی جرم، اندازه حرکت و انرژی در حالت ایستا گسترش یافته است. شیوه جدیدی برای تخمین سرعت بیشینه برش در این مقاله معرفی شده و این پارامتر برای ضخامت های متفاوت در دو فشار مختلف گاز اکسیژن به دست آمده است. همچنین عرض شیار برش و سهم توان اکسیداسیون در برش لیزری فولاد نرم با پارامترهای مختلف مؤثر بر برش لیزری پیش بینی شده است.

> کلید واژه- اکسیداسیون، برش لیزری، عرض شیار برش، سرعت بیشینه، فولاد نرم کد ۱۴۰/۳۳۹۰ – ۹ACS

#### ۱. مقدمه

در نخستین گامهای مدل سازی برش لیزری با استفاده از گاز کمکی<sup>۱</sup> این فرآیند توسط ویکانک<sup>۲</sup> و سیمون<sup>۳</sup> به صورت تحلیلی و عددی بررسی شد. آنها به صورت تئوری، با فرض جذب پرتو لیزری که در راستای برش قطبیده شده است، با استفاده از رابطه کلاسیکی فرنل<sup>†</sup> برش فلزات را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین شکل گیری ناهمواری<sup>۵</sup> در سطح برش قرار دادند. همچنین شکل گیری ناهمواری<sup>۵</sup> در سطح برش را با مدلی ریاضی پیش بینی نمودند[۱]. ایوارسون<sup>۶</sup> و ممکارانش هم در مطالعه تحلیلی برش لیزری فولاد با گاز کمکی اکسیژن به بررسی نقش واکنش اکسیداسیون و پس زنی ماده مذاب به خارج شیار برش توسط گاز کمکی پرداختند [۲]. مدلی تحلیلی از برش لیزری فلزات و بویژه فلزی چون فولاد نرم که با گاز محافظ اکسیژن در اثر واکنش توان اضافی به سیستم وارد می کند، در مقاله ای از

- <sup>1</sup> Assist gas
- <sup>2</sup>Vicanek
- <sup>3</sup>Simon

<sup>4</sup>Classical Fresnel formula

کاپلن<sup>۷</sup> بررسی شده است. در این مدل، پخش گرما در یک استوانه مایل با قطری برابر عرض شیار برش<sup>۸</sup> و ارتفاع ضخامت قطعه کار مطالعه شده است و باریکه لیزر به عنوان چشمه مولد گرما در مرز این استوانه در نظر گرفته شده است. در این مدل از جمله مربوط به تبخیر و پس زنی<sup>۹</sup> ناشی از تبخیر صرفنظر شده است.[۳]. ما در این مقاله مدلی پیشنهادکرده ایم، که بر اساس معادلات پایستگی مدل هایی که در بالا ذکر شد، در نظر گرفتن جمله ناشی از تبخیر در محاسبه عرض شیار برش و توان اضافی ناشی از اکسیداسیون همچنین بررسی اغلب پارامترهای مؤثر بر سرعت بیشینه برش، عرض کرف و توان ناشی از اکسیداسیون است.

۲. هندسه مساله

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> striation

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Ivarson

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Kaplan

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> kerf

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Recoil

مشترک جامد-مایع و مایع-گاز حرکت نمی کند. برای معادلات حالت پایا، معادله پایستگی جرم به صورت زیر نوشته می شود: (۱)  $N_m + N_v = N_e$ (۱) که در این معادله  $N_m$  آهنگ ذوب ماده و  $N_v$  آهنگ تبخیر ماده است که با فرض صرفنظر کردن از تبخیر و باز تبخیر ماده است که با فرض صرفنظر کردن از تبخیر و باز جامد شدن به علت سرعت بالا و عدم تشکیل پسماند،  $N_m$ برابر  $N_e$  آهنگ پس زنی ماده است. معادله بالا به صورت زیر می تواند بازنویسی شود:

$$v_{\rm c} dw_{\rm k} = v_{\rm z} h w_{\rm k} \tag{(1)}$$

که در این رابطه  $v_z$  سرعت ماده مذاب است و d ضخامت قطعه کار است.

معادله پایستگی اندازه حرکت، حاصل از نیروهایی است، که بر روی شار ماده مذاب اعمال می شود، این نیروها شامل نیروی خارجی توسط گاز محافظ، نیروهای داخلی ناشی از فشار پس زنی بخار ماده و همچنین حاصل از نیروهای کشش سطحی<sup>6</sup> و لزجت<sup>2</sup> ماده مذاب است. بطور خلاصه می توان این معادله را به شکل زیر نوشت:

$$\sum F_{z} = \pi r_{k} h(p_{g} - p_{a}) + 2\pi r_{k} \sqrt{\rho_{g} \mu_{g} d} v_{g}^{3/2}$$

$$-\pi r_{k} d(\mu_{l} \frac{v_{z}}{h}) - \pi r_{k} h \rho v_{z}^{2} = 0$$
(7)

در رابطه (۳)  $\mu_{\rm g}$ ,  $\mu_{\rm g}$  و  $v_{\rm g}$  به ترتیب چگالی و لزجت و سرعت گاز هستند و  $\mu_{\rm l}$ ، لزجت ماده مذاب است، که برای محاسبه سرعت بیشینه برش در دمایی نزدیک دمای ذوب محاسبه شده است.

معادله پایستگی انرژی، یا در واقع همان معادله پایستگی توان، شامل دو جمله توان ورودی، ناشی از جذب پرتو لیزر توسط ماده و گرمای آزاد شده به واسطه واکنش اکسیداسیون فولاد نرم است. ليزر و اپتيك ليزري

برای تعیین معادلات حالت پایا ابتدا باید حجمی به عنوان حجم معيار ' انتخاب شود. در اين مقاله حجم معيار، حجمي از لایه مذاب است، که بین دو سطح استوانه ای مایل محدود شده است ( شکل۱): سطحی که شعاعی برابر نصف عرض شيار برش دارد و با سرعت ثابت  $v_c$  حركت مى كند و سطحی که در واقع سطح خارجی حجم معیار است، هم  $r_k - h$  محور با سطح داخلی است و شعاعی کوچکتر برابر دارد، که در اینجا  $r_k$  نصف عرض شیار برش و h ضخامت لایه مذاب است. در مواردی که با سرعت های بیشینه برش سر و کار داریم می توان، باتقریبی مناسب، عرض شیار را برابر قطر لکه باریکه لیزری در نظر گرفت، زیرا عرض شیار با سرعت برش نسبت عکس دارد و هر چه سرعت برش بالاتر رود، عرض شیار کوچکتر می شود، که در حد به قطر لکه باریکه لیزر نزدیک می شود. بنابر این داشتن سرعت بیشینه، از این جهت که تعداد خط بندی ٔ ایجاد شده در سطح برش در واحد طول با افزایش سرعت برش بیشتر می شود [۴].



# ۳. مدل سازی ریاضی

بعد از تشکیل حفره کلیدی<sup>۳</sup> که با ایجاد حفره اولیه<sup>†</sup> به وجود می آید، لایه نازکی از ماده مذاب ایجاد می شود که در تماس با بخار بالای سطح است [۵]. مدل ریاضی مربوط به فرآیند، پس از ایجاد حفره اولیه، شامل معادلات پایستگی جرم، انرژی و اندازه حرکت، در حالت پایاست. در این مدل فرض بر این است که در مختصات باریکه لیزری فصل

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Surface tension

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> viscosity

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Control volume

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> striation

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> keyhole

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> piercing



شکل ۲- نمودار ماکزیمم سرعت برش برای فشار الف: ۱٫۸ bar و ب: ۳ برای ضخامتهای ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ میلیمتر

از آنجایی که در فشارهای بالا سوختن کنترل نشده رخ می دهد[۷]، تمامی پارامترها را درفشار زیر ۳bar بررسی کردیم. همانگونه که در شکل دیده می شود، برای یک ضخامت خاص با افزایش توان، سرعت بیشینه برش افزایش می یابد. با مقایسه نمودار الف و ب مشاهده می شود که با افزایش فشار گاز اکسیژن (به عنوان گاز کمکی خنک کننده و عامل واکنش شیمیایی)، سرعت بیشینه برش افزایش می یابد. این نتایج با نتایج آزمایشگاهی که در اشتین در کتاب خود بیان کرده، مطابقت دارد [۸].

چهاردهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، ۹ تا ۱۱ بهمن ماه ۱۳۸۶

$$P_{\rm abs} + P_{\rm exo} = P_{\rm loss} + P_{\rm l} + P_{\rm v} + P_{\rm y} \tag{(f)}$$

در رابطه بالا 
$$P_{
m abs}$$
 توان جذب شده توسط قطعه کار است و  
توان حاصل از اکسیداسیون به صورت زیر به دست می آید:  
 $P_{
m exo}=N_{
m FeO}\Delta H$  (۵)

برای محاسبه مقدار ماده اکسید شده در واحد زمان باید، زمان مؤثر( $\frac{d}{v_{\rm m}}$ ) برهمکنش را محاسبه کرد، ضخامت لایه اکسید را با رابطه  $h_{\rm FeO} = \sqrt{D_{\rm eff} t_{eff}}$  می توان توصیف کرد.  $D_{\rm eff}$  ثابت پخش اکسیژن در ماده است که پخش اکسیژن در فولاد نرم برابر  $S / s^m^2 / S$  است. آهنگ برهمکنش ماده با اکسیژن در هر مول ماده با رابطه برهمکنش ماده با اکسیژن در هر مول ماده با رابطه  $N_{\rm FeO} = v_z w_k s_{\rm FeO} \frac{\rho}{A_{\rm r}}$ لایه اکسید و  $A_{\rm r}$  جرم اتمی نسبی آهن است.

گرمای تلف شده ناشی از رسانش به اطراف شیار را میتوان با تقریبی خوب می توان با این رابطه معادل کرد، که در آن  $pe = \frac{r_k v_c}{\alpha_d}$  عدد پکلت<sup>(</sup> است و  $\alpha_d$  ضریب پخش گرمایی ماده است[۶].

$$P_{\rm loss} = 4Kd(T_{\rm f} - T_{\rm a})(\frac{pe}{2})^{0.3} \tag{9}$$

دیگر جملات، توان مصرف شده برای ذوب ماده و رسیدن به دمای سطح  $T_{\rm s}$  و توان مورد نیاز برای تبخیر و توان پس زنی ناشی از شار بخار هستند. با استفاده از معادلات بالا همچنین فرضیات ذکر شده سرعت بیشینه برش و عرض شیار برش و سهم واکنش اکسیداسیون به ترتیب بررسی شد.

### ۴. بحث و نتایج

پس از حل معادلات با در نظر گرفتن فرضیات و ساده سازی های ذکر شده، تغییرات سرعت بیشینه با تغییرات توان در

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Peclet number

ليزر و اپتيك ليزري





شکل۵:- نمودار تغییرات عرض کرف با سرعت برش در شکل۵ نمودار تغییرات عرض شیار با سرعت برش برای قطعه کاری به ضخامت ۲ میلیمتر از جنس فولاد نرم که با لیزری با توان ۱۲۰۰ وات بریده می شود، نشان داده شده است. در این شکل دیده می شود که هر چه سرعت برش افزایش یابد، (این سرعت تا سرعت بیشینه می تواند افزایش یابد.) عرض شیار برش کوچکتر می شود. با بالا رفتن سرعت شدت فرودی لیزر در هر زمان بر روی قطعه کار کاهش می یابد. بنابراین <sup>۱</sup> HAZ کوچک شده و عرض شیار برش کاهش می یابد. این نتیجه با نتیجه آزمایشگاهی در مرجع [۳]،مطابقت دارد.



شکل۶-: نمودار اثر سرعت برش بر روی توان ناشی از اکسیداسیون



شکل۳-نمودار تغییرات عرض کرف بر حسب توان

در شکل۳ نمودار تغییرات عرض شیار برش بر حسب توان لیزر رسم شده است. چنانچه در شکل مشاهده می شود، در سرعت برش ثابت معادل ۲ متر بر دقیقه و برای قطعه کار از جنس فولاد نرم به ضخامت ۲ میلیمتر نتایج نشان می دهد، که با افزایش توان عرض شیار برش تقریبا به شکل خطی بالا می رود. با بالا رفتن توان دما افزایش می یابد، بنابراین تمام پارامترهای وابسته دما نظیر ضخامت لایه مذاب، توان اکسیداسیون، فشار پس زنی بخار و سرعت بخار تحت تاثیر قرار می گیرد.



شکل۴-نمودار تغییرات عرض شیار برش با ضخامت قطعه کار

نمودار تغییرات عرض شیار برش بر حسب ضخامت قطعه کار برای قطعه کاری از جنس فولاد نرم با سرعت برش ثابت ۲ متر بر دقيقه توسط ليزر CO2 با توان ۱۲۰۰ وات

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> heat affected zone

## Archive of SID



مراجع

[1]M.Vicaneck, G.Simon, H.M.Urbassek,

I.Decker,1987,"*Hydrodynamical Instability of Melt Flow in Laser Cutting*", **J.phys.D:Appl.phys**,Vol.20, ,pp.140-145

[2]A.Ivarson and etals,1992,"The Role of Oxidation in Laser Cutting Stainless Steel and Mild Steel",

J.Laser. Appl., Vol.3, ,pp.41-45

[3].A..F.H.Kaplan,**1996**,"An Analytical Model of Metal Cutting with a Laser

*beem*",J.appl.phys,Vol.79,N.5,pp.2198-2208 [4]G.V.Ermolaev and etals,2006, "*Mathematical Modelling of Striation Formation in Oxygen Laser Cutting of Mild Stee*", J.phys.D:Appl.phys,Vol.39,

,pp.4236-1196

[5] M. J. Torkamany, M J Hamedi, F Malek and J Sabbaghzadeh, J. phys.D 39, 4563-67 (2006)
[6]W.Schulz and etals, 1993, "*Heat Conduction Losse s in Laser Cutting of Metals*",

J.phys.D:Appl.phys,Vol.26, ,pp.1357-1363

[7]. S.L. Chen, J. Mat. Proc.88, 57-66 (1999)

[8]. Steen.W.M, 1998, "Laser material processing", Springer. در شکل۶ نتایج حاصل از تغییرات توان اکسیداسیون با سرعت برش با نموداری نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می شود که برای قطعه کاری به ضخامت ۲ میلیمتر از جنس فولاد نرم که با لیزری با توان ۱۲۰۰ وات در فشار گاز محافظ ۳ اتمسفر بریده می شود، توان اکسیداسیون با افزایش سرعت برش کاهش می یابد. وقتی سرعت افزایش می یابد، زمان مؤثر کاهش می یابد بنابراین آهنگ اکسیداسیون جرم و در نتیجه توان اکسیداسیون کاهش می یابد.



شکل۷- نموداراثر فشار گاز محافظ بر روی توان اضافی ناشی از واکنش اکسیداسیون در شکل۷ نیز اثر پارامتر فشار گاز کمکی بر روی توان ناشی از واکنش اکسیداسیون برای همین قطعه کار نشان داده شده است. در این نمودار دیده می شود که توان ناشی از واکنش اکسیداسیون با بالا رفتن فشار، افزایش می یابد. به نظر می رسد با بالا رفتن فشار اثر کاهشی توان ناشی از خنک سازی توسط گاز محافظ و اثر افزایشی توان ورودی ناشی از واکنش اکسیداسیون با هم خنثی می شوند و بنابراین تغییرات قابل توجهی در عرض شیار برش مشاهده نمی شود.