



چهاردهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
 دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، ۹ تا ۱۱ بهمن ماه ۱۳۸۶
 14th Conference on Optics and Photonics
 Rafsanjan Vali-e-Asr University, 29-31 January 2008



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 پستی ۵۷۶-۱۴۶۶۵

چکیده - در این مقاله یک مدل ریاضی برای برش ورق فولاد نرم، با استفاده از لیزر CO_2 پیوسته موج به همراه 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 PACS - ۱۴۰/۳۳۹۰

۱. مقدمه

در نخستین گامهای مدل سازی برش لیزری با استفاده از گاز کمکی^۱ این فرآیند توسط ویکانک^۲ و سیمون^۳ 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^۴ برش فلزات را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین شکل گیری ناهمواری^۵ در سطح برش را با مدلی ریاضی پیش بینی نمودند [۱]. ایوارسون^۶ و همکارانش 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

کاپلن^۷ بررسی شده است. در این مدل، پخش گرما در یک استوانه مایل با قطری برابر عرض شیار برش^۸ 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^۹ ناشی از تبخیر صرفنظر شده است. [۳]. ما در این مقاله مدلی پیشنهاد کرده ایم، که بر اساس معادلات پایستگی جرم، اندازه حرکت و انرژی بنا شده است. تفاوت این مدل با 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

¹ Assist gas

² Vicaneck

³ Simon

⁴ Classical Fresnel formula

⁵ striation

⁶ Ivarson

⁷ Kaplan

⁸ kerf

⁹ Recoil



مشترک جامد-مایع و مایع-گاز حرکت نمی کند. برای معادلات حالت پایا، معادله پایستگی جرم به صورت زیر نوشته می شود:

$$N_m + N_v = N_e \quad (1)$$

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 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:

$$v_c dw_k = v_z hw_k \quad (2)$$

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 سطحی⁵ و لزجت⁶ ماده مذاب است.

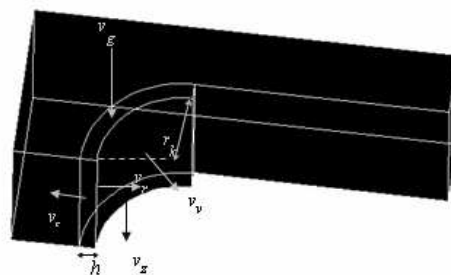
بطور خلاصه می توان این معادله را به شکل زیر نوشت:

$$\sum F_z = \pi r_k h (p_g - p_a) + 2\pi r_k \sqrt{\rho_g \mu_g} dv_g^{3/2} - \pi r_k d (\mu_l \frac{v_z}{h}) - \pi r_k h \rho v_z^2 = 0 \quad (3)$$

در رابطه (3) ρ_g ، μ_g و v_g به ترتیب چگالی و لزجت و سرعت گاز هستند و μ_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.

برای تعیین معادلات حالت پایا ابتدا باید حجمی به عنوان حجم معیار¹ انتخاب شود. در این مقاله حجم معیار، حجمی از لایه مذاب است، که بین دو سطح استوانه ای مایل محدود شده است (شکل 1): سطحی که شعاعی برابر نصف عرض شیار برش دارد و با سرعت ثابت v_c حرکت می کند و سطحی که در واقع سطح خارجی حجم معیار است، هم محور با سطح داخلی است و شعاعی کوچکتر برابر $r_k - h$ 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، با تقریبی 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 بندی² ایجاد شده در سطح برش در واحد طول با افزایش سرعت برش بیشتر می شود [4].



شکل 1- شمایی از هندسه قطعه کار

3. مدل سازی ریاضی

بعد از تشکیل حفره کلیدی³ که با ایجاد حفره اولیه⁴ به وجود می آید، لایه نازکی از ماده مذاب ایجاد می شود که در تماس با بخار بالای سطح است [5]. 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

¹ Control volume

² striation

³ keyhole

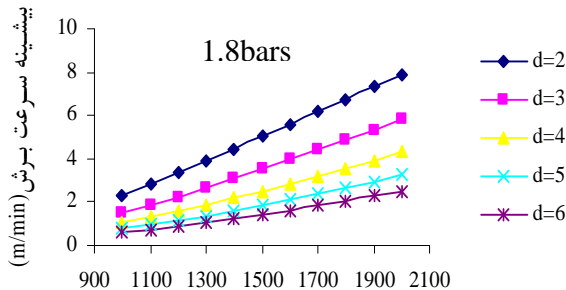
⁴ piercing

⁵ Surface tension

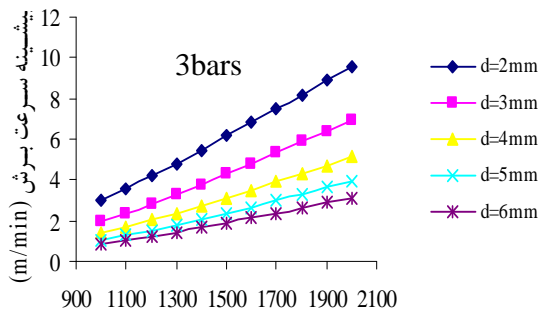
⁶ viscosity



شرایطی که گاز محافظ اکسیژن با فشار ثابت به سیستم وارد شود، بررسی شد.



(الف) توان لیزر (w)



(ب) توان لیزر (W)

شکل ۲- نمودار ماکزیمم سرعت برش برای فشار الف: ۱.۸ bar و ب: ۳ bar 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 در فشار 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].

$$P_{abs} + P_{exo} = P_{loss} + P_l + P_v + P_y \quad (4)$$

در رابطه بالا P_{abs} توان جذب شده توسط قطعه کار است و توان حاصل از اکسیداسیون به صورت زیر به دست می آید:

$$P_{exo} = N_{FeO} \Delta H \quad (5)$$

برای محاسبه مقدار ماده اکسید شده در واحد زمان باید، زمان مؤثر ($t_{eff} = \frac{d}{v_m}$) برهمکنش را محاسبه کرد، ضخامت

لایه اکسید را با رابطه $h_{FeO} = \sqrt{D_{eff} t_{eff}}$ می توان توصیف کرد. D_{eff} ثابت پخش اکسیژن در ماده است که پخش اکسیژن در فولاد نرم برابر $2 \times 10^{-7} m^2 / s$ است. آهنگ برهمکنش ماده با اکسیژن در هر مول ماده با رابطه $N_{FeO} = v_z w_k s_{FeO} \frac{\rho}{A_T}$ به دست می آید، که s_{FeO} ضخامت لایه اکسید و A_T 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 $pe = \frac{h_k v_c}{\alpha_d}$ عدد پکلت^۱ است و α_d ضریب پخش گرمایی ماده است [۶].

$$P_{loss} = 4Kd(T_f - T_a) \left(\frac{pe}{2}\right)^{0.3} \quad (6)$$

دیگر جملات، توان مصرف شده برای ذوب ماده و رسیدن به دمای سطح T_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.

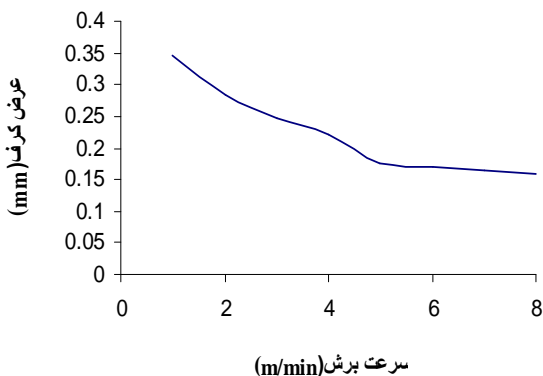
۴. بحث و نتایج

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

¹ Peclet number

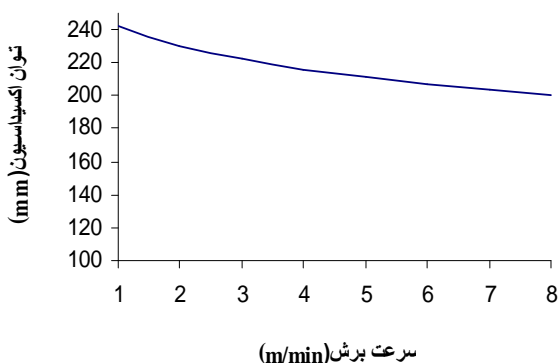


در مد پیوسته موج بریده می شود، در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می شود، که با بالا رفتن ضخامت قطعه کار عرض شیار برش افزایش می یابد.



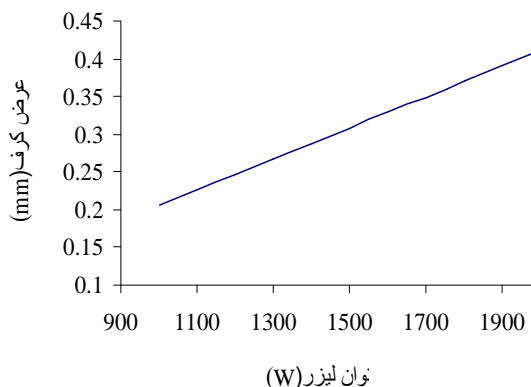
شکل ۵:- نمودار تغییرات عرض کرف با سرعت برش

در شکل ۵ 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 HAZ¹ کوچک شده و عرض شیار برش کاهش می یابد. این نتیجه با نتیجه آزمایشگاهی در مرجع [۳]، مطابقت دارد.



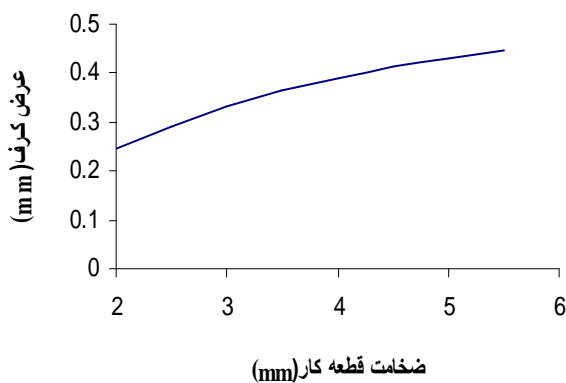
شکل ۶:- نمودار اثر سرعت برش بر روی توان ناشی از اکسیداسیون

¹ heat affected zone



شکل ۳-نمودار تغییرات عرض کرف بر حسب توان

در شکل ۳ 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 تقریباً 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.



شکل ۴-نمودار تغییرات عرض شیار برش با ضخامت قطعه کار

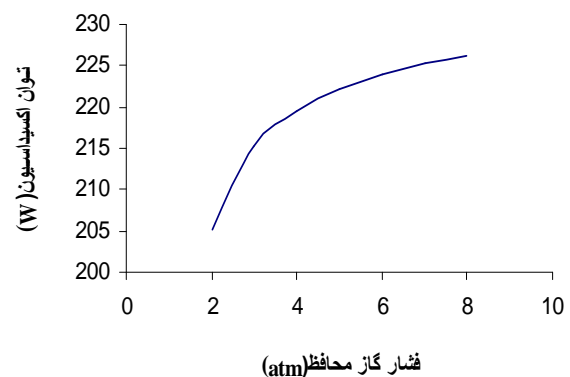
نمودار تغییرات عرض شیار برش بر حسب ضخامت قطعه کار برای قطعه کاری از جنس فولاد نرم با سرعت برش ثابت ۲ متر بر دقیقه توسط لیزر CO₂ با توان ۱۲۰۰ وات



مراجع

- [1] M. Vicanek, 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 beam", **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 Steel", **J. phys. D: Appl. phys.**, Vol. 39, pp. 4236-1196
- [5] M. J. Torkamany, M J Hamed, F Malek and J Sabbaghzadeh, **J. phys. D** 39, 4563-67 (2006)
- [6] W. Schulz and etals, 1993, "Heat Conduction Losses 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 شکل ۶ 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.



شکل ۷- نمودار اثر فشار گاز محافظ بر روی توان اضافی ناشی از واکنش اکسیداسیون

در شکل ۷ 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 کاهش 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.