

بهینه‌سازی فرایند پوشش دهی با استفاده از کوبش لیزری، بر اساس الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه

مهرداد بابائیان (کارشناس ارشد)

سعید گلایی* (دانشیار)

گروه جادفات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

مهندسی مکانیک شریف، (بهار ۱۳۹۸)
دوری ۳-۳۵، شماره ۱، ص. ۵۳-۵۹

پوشش دهی با استفاده از کوبش لیزری، از جمله روش‌های جوشکاری ضربه‌یی است که از اصول حاکم بر جوشکاری حالت جامد تبعیت می‌کند و متکی بر تأثیر سرعت بسیار بالای برخورد ورق‌ها و تشکیل جت حاصل از سیلان هیدرودینامیکی سطوح در نقطه‌ی برخورد است. در این روش انرژی لازم برای حرکت ورق پرنده، توسط فشار پلاسمای ایجاد شده به واسطه‌ی تابش لیزر بر سطح آن، تولید می‌شود. در این مقاله سعی شده ابتدا به مدل‌سازی این فرایند و صحت‌یابی آن بر مبنای نتایج حاصل از آزمایش تجربی پرداخته شود و سپس در ضخامت مشخصی از ورق پرنده، با استفاده از الگوریتم چندمنظوره‌ی بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه، وضعیت جوش حاصله از طریق این فرایند با تغییر در فشار حاصل از تابش لیزر، ارتفاع و پهنای شیار و بر مبنای محاسبه‌ی سرعت و زاویه‌ی برخورد ورق‌ها و نحوه‌ی قرارگیری آن در پنجره، جوش‌پذیری و بیشینه‌سازی پهنای شیار بهینه شود. انجام این پژوهش، علاوه بر ارائه‌ی روشی نوین و کاربردی در فرایند پوشش دهی با استفاده از کوبش لیزری، سبب ارائه‌ی راهکاری به‌منظور کاهش هزینه و زمان لازم برای انتخاب مشخصات شیار مورد نیاز در راستای انجام پوشش دهی در شرایط بهینه می‌شود.

واژگان کلیدی: جوشکاری با استفاده از کوبش لیزری، پوشش دهی، پنجره جوش‌پذیری، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه.

۱. مقدمه

یکی از روش‌های جوشکاری فلزات همجنس و غیرهمجنس، جوشکاری ضربه‌یی^۱ است. جوشکاری انفجاری^۲، مغناطیسی^۳ و کوبش لیزری^۴ از دیگر روش‌های جوشکاری ضربه‌یی هستند. اساس این روش‌ها مبتنی بر جوشکاری حالت جامد است که در آن فلزات با سرعت‌های بسیار بالا با یکدیگر برخورد می‌کنند و انرژی حاصل از آن صرف سیلان هیدرودینامیکی سطوح در نقطه‌ی برخورد می‌شود؛ به طوری که جت به وجود آمده در اثر این سیلان، در هنگام دورشدن از نقطه‌ی برخورد دو فلز، باعث جدا شدن لایه‌های سطحی مانند اکسیدهای فلزی شده و اتصال متالورژیکی در اثر تشکیل پیوند اتمی^۵ در فاز جامد در فصل مشترک تماس، حاصل می‌شود.^[۱] جوشکاری با استفاده از کوبش لیزری همچون سایر روش‌های جوشکاری ضربه‌یی، در دمای محیط و با تمرکز بر تأثیر سرعت بسیار بالای برخورد، انجام می‌شود و انرژی لازم برای حرکت ورق پرنده^۶ توسط فشار پلاسمای ایجاد شده به واسطه‌ی تابش لیزر بر آن، تولید می‌شود.

* نویسنده مسئول

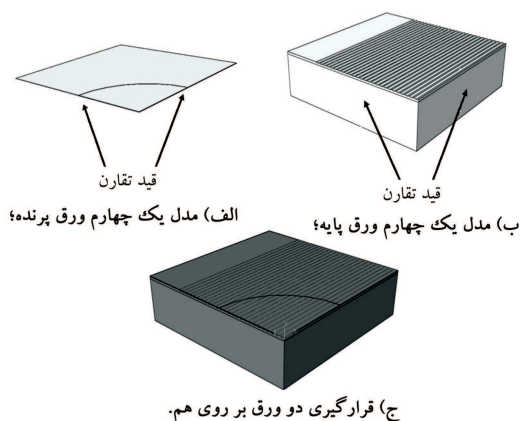
تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۴/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۶/۸/۱۳، پذیرش ۱۳۹۶/۸/۳۰.

DOI: 10.24200/J40.2019.20841

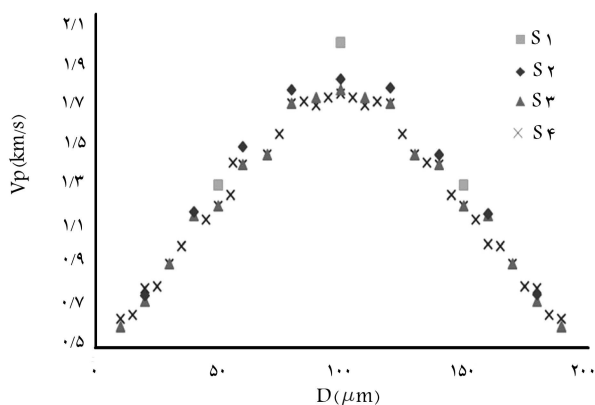
mehردادbabaeeian@gmail.com
golabi-s@kashanu.ac.ir

اولین بار در سال ۱۹۹۴ با استفاده از کوبش لیزری و بر اساس اصول جوشکاری انفجاری، آلومینیوم خالص به آلومینیوم ۲۰۲۴ متصل شد.^[۲] در سال ۲۰۱۱ نیز فرایند جوش با استفاده از کوبش لیزری، بر مبنای برخورد مایل دو ورق، در قالب اختراعی به ثبت رسید.^[۳] در سال ۲۰۱۱ دو ورق همجنس آلومینیومی (AA ۱۱۰۰) و دو ورق از جنس‌های آلومینیوم (AA ۱۱۰۰) و فولاد کم‌کربن (۱۰۱۰) که تحت زاویه‌ی ۱۵ درجه نسبت به هم قرار گرفته بودند، جوش داده شد.^[۴] در سال ۲۰۱۲ تغییرات هندسی مختلف و اثرات ناشی از آن بر «فرایند جوشکاری با استفاده از کوبش لیزری» مورد بررسی قرار گرفت.^[۵] در سال ۲۰۱۳ دو ورق غیرهمجنس آلومینیومی و مسی که با زاویه‌ی ۲۰ درجه نسبت به هم قرار گرفته بودند، با استفاده از کوبش لیزری به یکدیگر متصل شدند.^[۶] در سال ۲۰۱۴ تأثیر تغییر قطر پرتو لیزر، فاصله‌ی دو ورق و انرژی لیزر به صورت تجربی و تحلیلی در هنگام جوشکاری توسط فرایند کوبش لیزری دو ورق موازی مورد بررسی قرار گرفت.^[۷]

با توجه به اهمیت محاسبه و بررسی خصوصیات هم‌چون سرعت و زاویه‌ی برخورد در جوشکاری‌هایی از نوع ضربه‌یی برای تشخیص نوع کیفیت اتصال در محل برخورد دو ورق، در این مقاله سعی شده روشی متفاوت از پژوهش‌های انجام شده



شکل ۲. مدل‌سازی هندسی ورق پرنده و پایه.

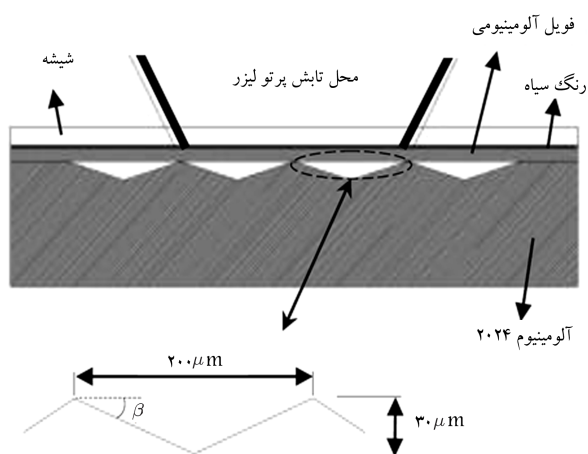


شکل ۳. نتایج حاصل از بررسی استقلال شبکه.

ورق پایه با ابعاد $7 \times 7 \times 2$ میلی‌متر و شعاع محل اثر لیزر نیز برابر با ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل و هندسه اجزاء و خواص حاکم بر مسئله و به منظور کاهش زمان اجرای نرم‌افزار با المان‌هایی با نقاط انتگرال‌گیری کاهش یافته نسبت به المان‌هایی از نوع انتگرال کامل، به خصوص در حالت سه‌بعدی، در کنار توجه به چگالی شبکه به منظور کنترل دقت جواب‌های مسئله و همچنین با توجه به وجود تغییر شکل زیاد در شبکه، المان‌ها در هر دو ورق پایه و پرنده از نوع C3DAR انتخاب شده است.

به دلیل تأثیر بهتر فشار ناشی از پرتو لیزر، در محدوده تابش بر ورق پرنده، در راستای استخراج سرعت برخورد آن با ورق پایه و همچنین در محدوده نزدیک به شیارها در ورق پایه، مش‌بندی المان‌ها در این نواحی دارای اهمیت بیشتری است. بر این اساس و به دلیل بررسی استقلال شبکه در این نواحی، با در نظر گرفتن چهار اندازه 0.7×0.5 ، 0.7×0.2 ، 0.7×0.1 و 0.7×0.05 میلی‌متر برای ناحیه تابش لیزر بر ورق پرنده و همچنین در محدوده شیاردار در ورق پایه، نمودار سرعت برخورد دو ورق که در شکل ۳ به ترتیب با نمادهای S1، S2، S3 و S4 نمایش داده شده، رسم شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، در هر چهار حالت، نمودارها روندی شبیه به هم دارند اما دو حالت S3 و S4 تقریباً همگرا شده‌اند و اختلاف حالت S2 با آنها کمتر از ۱۰ درصد است. بنابراین و به دلیل افزایش سرعت تحلیل، از حالت S2 برای مش‌بندی مدل استفاده شده است.

بر این اساس، ورق پرنده شامل ۶۱۸۳۴ المان شده که تعداد ۴۲۹۵۲ المان از آنها در محدوده تابش لیزر قرار می‌گیرد و تعداد المان‌های ورق پایه ۱۲۱۰۶۶۸



شکل ۱. هندسه و نحوه‌ی قرارگیری ورق‌ها. [۲]

در این زمینه گزیده شود. بر همین اساس ابتدا بر مبنای آزمایش تجربی انجام شده توسط دوبروجیارد و جیان‌دین [۲] تحلیل و استخراج نتایج لازم برای بررسی کیفیت جوش بر مبنای پنجره جوش‌پذیری و صحت‌یابی این نتایج مدل‌سازی شده است. سپس در ضخامت مشخصی از ورق پرنده، و با استفاده از الگوریتم چندهدفه‌ی بهینه‌سازی ازدحام ذرات، وضعیت جوش حاصل از این فرایند با تغییر در فشار حاصل از تابش لیزر، ارتفاع و پهنای شیار و بر مبنای محاسبه‌ی سرعت و زاویه‌ی برخورد ورق‌ها و نحوه‌ی قرارگیری آن در پنجره، جوش‌پذیری و بیشینه شدن پهنای شیار، بهینه شده است.

۲. شرح مسئله

دوبروجیارد و جیان‌دین [۲] با استفاده از لیزر پالسی نئودیمیم - شیشه^۷ با طول موج 1.06 میکرون و مدت تابش پالس 30 نانوثانیه، پرتویی به قطر 6 میلی‌متر و چگالی انرژی 350 ژول بر سانتی‌متر مربع، بر فویل آلومینیومی با خلوص 99.99 درصد - که از آن به عنوان ورق پرنده استفاده می‌شود - و با ضخامت 20 میکرون تابیدند. بر فویل آلومینیومی و در محل تابش، رنگ سیاهی برای جذب انرژی لیزر مالیده شده و روی آن برای افزایش فشار پلاسمای ایجاد شده، یک لایه‌ی شیشه‌ی مطابق شکل ۱، قرار داده شده است. ورق پایه^۸ از جنس آلومینیوم ۲۰۲۴ است و روی سطح تماس آن با ورق پرنده، شیارهایی مثلثی و یکسان برای ایجاد برخورد مایل بین آنها تعبیه شده است. عمق این شیارهای متساوی‌الساقین، 30 میکرون و قاعده‌ی آنها 200 میکرون هستند. بنابراین زاویه‌ی برخورد دو ورق پرنده و پایه، 16.7 درجه است.

۳. مدل‌سازی و تحلیل

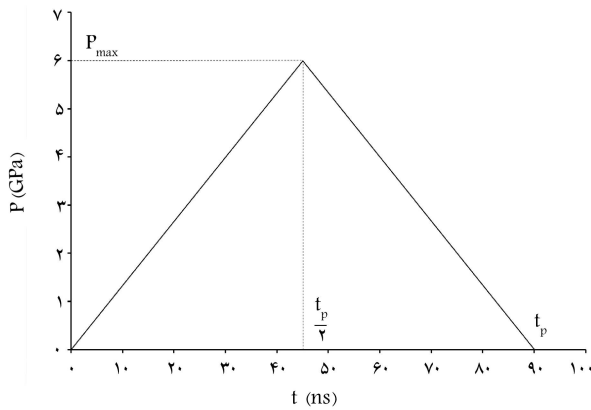
شبیه‌سازی این فرایند در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. با توجه به ماهیت کاملاً دینامیکی و ایجاد کرنش‌هایی با نرخ بالا در آن، از حلال ضمنی^۹ برای تحلیل استفاده شده است. مدل‌سازی هندسی ورق پرنده و پایه به صورت سه‌بعدی و برای افزایش سرعت تحلیل و با توجه به تقارن حاکم بر مسئله، تنها یک‌چهارم آن و با در نظر گرفتن قید تقارن^{۱۰} در دو سطح جانبی آنها (شکل ۲) صورت پذیرفته است. مدل یک‌چهارم ورق پرنده با ابعاد $7 \times 7 \times 0.2$ میلی‌متر و مدل یک‌چهارم

جدول ۱. خواص جنس ورق‌ها. [۲]

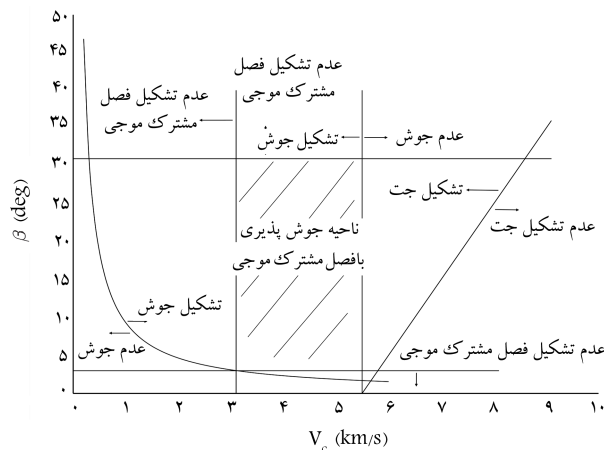
عنوان	جنس	چگالی kg/m ^۳	سرعت صوت (km/s)	سختی (HV)	مدول الاستیسیته (GPa)
ورق پایه	آلومینیوم ۲۰۲۴	۲۷۰۰	۵٫۵	۲۰۰	۷۳
ورق پرنده	آلومینیوم خالص (۹۹٫۹ درصد)	۲۷۰۰	۵٫۵	۵۰	۷۰

جدول ۲. ضرایب معادله‌ی جانسون - کوک برای آلومینیوم ۲۰۲۴ [۸] و آلومینیوم خالص (۹۹٫۹ درصد). [۹]

ضرایب	آلومینیوم ۲۰۲۴	آلومینیوم خالص (۹۹٫۹٪)
A(MPa)	۲۶۵	۲۵۶
B(MPa)	۴۲۶	۴۲۶
C	۰٫۱۵	۰٫۱۵
n	۰٫۳۴	۰٫۳۴
m	۱	۱
T _{melt} (°k)	۷۷۵	۹۳۳٫۱۵
T _{room} (°k)	۳۰۰٫۱۵	۳۰۰٫۱۵
ε̇ _۰ (s ^{-۱})	۱	۱



شکل ۴. توزیع مثالی فشار. [۱۲]



شکل ۵. پنجره‌ی جوش‌پذیری ورق پرنده و پایه.

۴. رسم پنجره‌ی جوش‌پذیری

هدف از رسم پنجره‌ی جوش‌پذیری، پیش‌بینی وضعیت جوش بر اساس دو عامل اصلی سرعت جوشکاری دو ورق و زاویه‌ی دینامیکی برخورد آنهاست. پنجره‌ی جوش‌پذیری ورق پایه و پرنده در این مقاله، با استفاده از جدول ۱ و روابط ارائه شده در مورد حد زاویه‌ی بحرانی برخورد برای تشکیل جت، [۱۴] حد بالا و پایین زاویه‌ی دینامیکی برخورد [۱۵] و سرعت جوشکاری، [۱۷، ۱۶] فشار بحرانی که فراتر از آن می‌توان رفتار فلز را سیال فرض کرد [۱۸] و بیشینه سرعت ورق پرنده برای جلوگیری از ایجاد عیوبی نظیر پوسته پوسته شدن در فصل مشترک، [۲۰، ۱۹] در شکل ۵ رسم شده است.

سرعت جوشکاری دو ورق (V_c) با توجه به سرعت عمودی ورق پرنده در

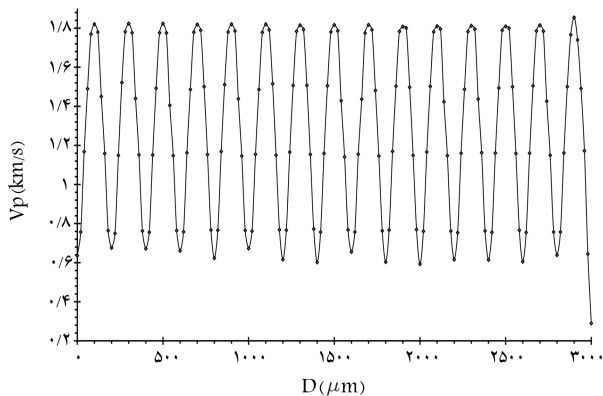
است که تعداد ۱۷۹۱۷۷ المان از آن سهم محدودی نزدیک به شیارها می‌شود. جنس ورق پایه آلومینیوم ۲۰۲۴ و ورق پرنده آلومینیوم با خلوص ۹۹٫۹ درصد بر اساس خواص نشان داده شده در جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

در این شبیه‌سازی از مدل پلاستیسیته‌ی جانسون - کوک [۸] که نوع ویژه‌ی از پلاستیسیته فن میسر [۲] و حالت خاصی از سخت شدن ایزوتروپیک است و در روابط ۱ و ۲ ارائه شده است، [۸] به دلیل سرعت بالای فرایند و فشار بالای وارد شده که سبب نرخ کرنش بسیار بالایی می‌شود، با بکارگیری از ضرایب موجود در جدول ۲، استفاده شده است. [۹، ۸]

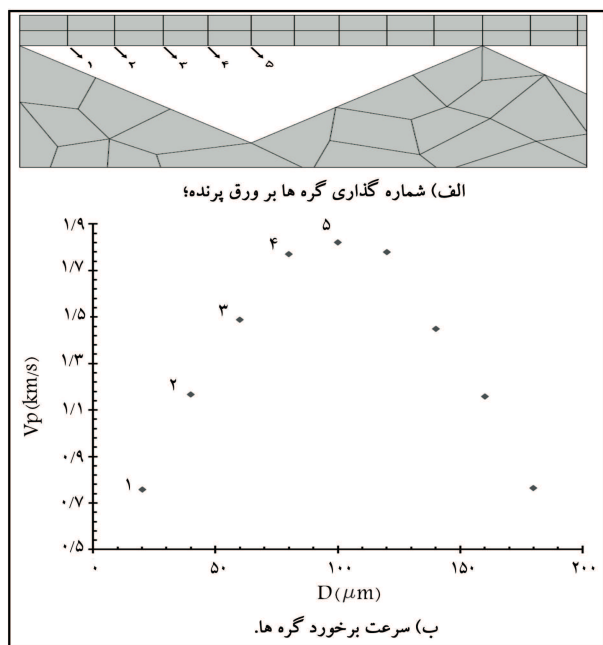
$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)[1 + C \ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)][1 - (T^*)^m] \quad (۱)$$

$$T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room}) \quad (۲)$$

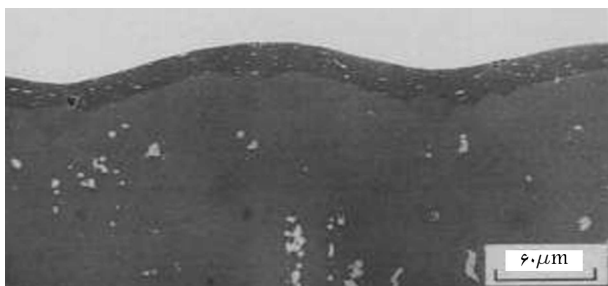
برای اعمال اثر پرتو لیزر بر ورق پرنده در این شبیه‌سازی از فشار معادل حاصل از پلاسمای ایجاد شده، استفاده می‌شود. بر اساس انرژی پالس لیزر تابیده شده، بیشینه فشار وارده، ۶ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است [۲] و بر اساس نتایج حاصل از تحقیقات پیر و همکارانش [۱۰] نحوه‌ی اثر فشار را می‌توان به صورت گوسی در نظر گرفت. باریستد و بروکمن [۱۱] بیان کردند که به دلیل شیب زیاد، این تابع به شکل مثالی بسیار شبیه است و می‌توان از تابع مثالی همانند شکل ۴، استفاده کرد. [۱۲] بر این اساس، فشار در نصف زمان اعمال، به بیشترین مقدار خود می‌رسد. هنگامی که از لایه‌ی شیشه‌ی برای افزایش فشار پلاسمای ایجاد شده بر ورق پرنده استفاده شود، زمان اعمال فشار t_p ، ۲ تا ۳ برابر زمان تابش لیزر در نظر گرفته می‌شود. [۱۳، ۹] در مطالعه‌ی حاضر، زمان اعمال فشار ۹۰ نانوثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل ۷. سرعت برخورد گره‌های ورق پرنده برحسب فاصله از مرکز تابش.

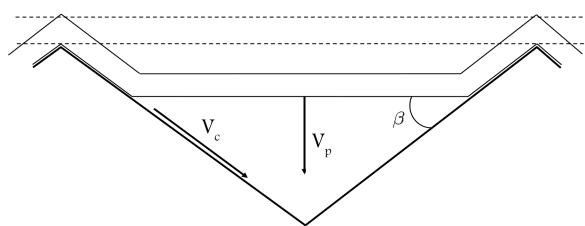


شکل ۸. شماره‌گذاری و مقادیر سرعت برخورد گره‌ها بر روی ورق پرنده.



شکل ۹. تصویر میکرونی حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی دو ورق اتصال یافته با استفاده از کوبش لیزری [۲].

ناحیه‌ی سوم در قسمت بالایی شیار است. در این ناحیه طبق شکل ۱۱ ج، جوش‌خوردگی به صورت صاف قابل مشاهده است. گره معادل این ناحیه گره شماره ۱ است که مطابق شکل ۱۰، در قسمتی قرار گرفته که بیانگر جوش‌خوردگی صاف و بدون موج است. بنابر مقایسه‌ی انجام شده، تطابق مطلوبی بین نتایج تجربی و عددی برقرار است.



شکل ۶. زاویه‌ی برخورد و بردارهای سرعت عمودی و جوشکاری.

لحظه‌ی برخورد آن با ورق پایه (V_p) و بر اساس شکل ۶ و رابطه‌ی ۳ محاسبه شده است. [۲۱]

$$V_p = V_c \sin \beta \quad (3)$$

۵. بررسی نتایج حاصل از آنالیز اجزاء محدود

برای محاسبه‌ی سرعت ورق پرنده در لحظه‌ی برخورد با ورق پایه، هر قسمت از ورق پرنده که روی یک شیار قرار دارد به 10° قسمت با فواصل 20° میکرون تقسیم شده است. نمودار مربوط به سرعت برخورد ورق پرنده با ورق پایه در هر گره 13° به جز گره‌هایی که با رأس هر شیار تماس اولیه دارند، برحسب فاصله‌ی هر گره از مرکز تابش در راستای عمود بر شیارها و بر اساس نتیجه‌ی حاصل از تحلیل نرم‌افزاری، در شکل ۷ قابل ملاحظه است. برای محاسبه‌ی سرعت برخورد عمودی در هر گره، اولین بیشینه سرعت هر گره در نمودار سرعت - زمان، به آن دست می‌یابد، به عنوان سرعت برخورد آن گره با ورق پایه در نظر گرفته شده است.

با توجه به این نمودار، سرعت ورق پرنده در تمامی شیارها تقریباً مشابه است؛ همچنین پروفیل سرعت در هر شیار نسبت به نیمه‌ی آن متقارن است. بنابراین برای محاسبه‌ی سرعت جوشکاری و به‌کارگیری آن در پنجره‌ی جوشکاری، سرعت گره‌های شماره‌گذاری شده بر ورق پرنده در نیمه‌ی یکی از شیارها طبق شکل ۸ در نظر گرفته شده است. سرعت گره‌ی از ورق پرنده که قبل از تابش لیزر نیز با ورق پایه در تماس بوده در نظر گرفته نشده است. نتایج حاصل از آزمایش تجربی انجام شده [۲۱] که توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده است، در شکل ۹ قابل مشاهده است. بر اساس سرعت گره‌های نمایش داده شده در شکل ۸ و با استفاده از رابطه‌ی ۳ و نیز در نظر گرفتن زاویه‌ی 16.7° درجه به عنوان زاویه‌ی دینامیکی برخورد، سرعت جوشکاری گره‌های مورد نظر محاسبه شده و در پنجره‌ی جوش‌پذیری مطابق شکل ۱۰ قرار داده شده است. با دقت در شکل‌های ۹ و ۱۰، سه ناحیه قابل مشاهده است که در شکل ۱۱ بزرگ‌نمایی شده‌اند.

ناحیه‌ی اول در قسمت تحتانی شیار است (شکل ۱۱ الف). در این ناحیه شاهد «ذوب شدگی» هستیم که همچون میله‌ی در سرتاسر شیار ادامه پیدا کرده است. [۲] گره‌های معادل این ناحیه گره‌های ۴ و ۵ هستند که مطابق شکل ۱۰، در قسمتی قرار می‌گیرند که در لحظه‌ی برخورد جت سیال ایجاد می‌شود ولی در محدوده‌ی جوش‌پذیری قرار نمی‌گیرد. بنابراین وجود این ناحیه‌ی ذوب شده را می‌توان عدم امکان خروج جت سیال ایجادشده از محدوده‌ی برخورد و تجمع آن در انتهای شیار تحلیل کرد.

ناحیه‌ی دوم مطابق شکل ۱۱ ب در قسمت میانی شیار است. گره‌های معادل این ناحیه گره‌های ۲ و ۳ هستند که مطابق شکل ۱۰ در قسمت جوش‌خوردگی قابل قبول و به صورت موجی قرار گرفته‌اند.

جوشکاری گره‌های ۱ و ۵ در شکل ۸، با سرعت مربوط به نقطه‌ی مرکز سطح پنجره‌ی جوش‌پذیری آنها و کاهش اختلاف بین زاویه‌ی جوشکاری دو ورق با زاویه‌ی مربوط به نقطه‌ی مرکز سطح پنجره‌ی جوش‌پذیری آنها و همچنین افزایش پهنای شیارها، در ضخامت مشخصی از ورق پرنده و با تغییر در فشار حاصل از تابش لیزر، ارتفاع و پهنای شیار، مورد استفاده قرار گرفته شده است. یادآور می‌شود به دلیل سرعت گره‌های ۲، ۳ و ۴ در محدوده‌ی بین سرعت گره‌های ۱ و ۵، از وارد کردن آنها در محاسبات مربوط به بهینه‌سازی به منظور کاهش زمان تحلیل صرف نظر شده است. سرعت و زاویه‌ی مربوط به مرکز سطح ناحیه‌ی هاشورخورده در شکل ۵ و بر اساس شکل ۱۰، به ترتیب برابر با $4/3 \times 10^7$ کیلومتر بر ثانیه و ۱۷ درجه هستند. الگوریتم کاربردی در این مقاله بر مبنای اصول بیان شده در مطالعات کوتلو کولو^[۲۲] ارائه شده است و با در نظر گرفتن تعداد ۱۵ ذره 10^4 و 10^5 عمل تکرار ۱۵ انجام شده است.

در الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه، نتیجه یک جواب بهینه نیست بلکه مجموعه‌ی از جواب‌های بهینه بر اساس اهداف مسئله است که یکدیگر را مغلوب نمی‌کنند. به منظور ذخیره‌سازی این مجموعه جواب‌های بهینه از یک آرشیو خارجی اصطلاحاً موسوم به «ریازیتوری^{۱۶}»، که ظرفیت آن در این مطالعه تعداد ۵۰ جواب نامغلوب در نظر گرفته شده، استفاده می‌شود. در این مسئله اهدافی که در پی کمینه‌سازی آنها هستیم، همچون روابط ۳-۶ به صورت بی‌بعد در نظر گرفته شده است.

$$D_1 = \frac{|V_{c1} - \bar{V}_c|}{\bar{V}_c} \quad (4)$$

$$D_2 = \frac{|V_{c5} - \bar{V}_c|}{\bar{V}_c} \quad (5)$$

$$D_3 = \frac{|\beta - \bar{\beta}|}{\bar{\beta}} \quad (6)$$

$$D_4 = \frac{t}{a} \quad (7)$$

در این روابط \bar{V}_c ، $\bar{\beta}$ به ترتیب سرعت و زاویه‌ی مربوط به مرکز سطح ناحیه هاشور خورده در شکل ۵ و ۱، t ، β ، V_{c5} ، V_{c1} و a به ترتیب سرعت‌های جوشکاری گره‌های ۱ و ۵ در شکل ۸، زاویه‌ی جوشکاری دو ورق، ضخامت ورق پرنده و پهنای شیار هستند و ضخامت ورق پرنده، مقدار ثابت 20° میکرون در نظر گرفته شده است. روند الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مورد استفاده در این مسئله به صورت ذیل است:^[۲۲]

۱. ایجاد جمعیت اولیه (در این مسئله ۱۵ ذره با مقادیر متفاوتی از فشار حاصل از تابش لیزر، ارتفاع و پهنای شیار، به عنوان متغیرهای مسئله، در نظر گرفته شده است)؛

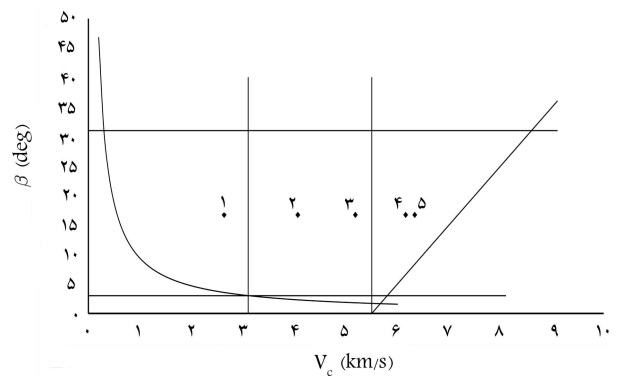
۲. مقداردهی اولیه به سرعت تغییرات متغیرها در هر ذره؛

۳. ارزیابی هر ذره از جمعیت (بر اساس کمینه‌سازی اهداف بیان شده در روابط ۳-۶)؛

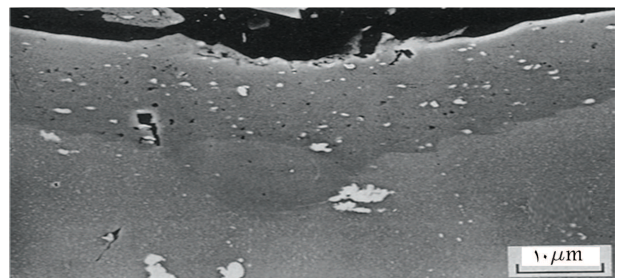
۴. جدا کردن اعضای نامغلوب جمعیت و ذخیره‌سازی آنها در آرشیو خارجی (ظرفیت آرشیو در این مسئله، ۵۰ ذره در نظر گرفته شده است)؛

۵. جدول‌بندی فضای هدف کشف شده در آرشیو خارجی؛

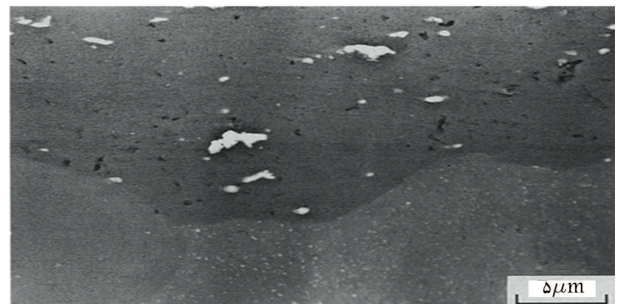
۶. هر ذره از میان اعضای آرشیو رهبری انتخاب کرده و حرکت خود را انجام می‌دهد (بر اساس بهترین خاطره‌ی شخصی)؛



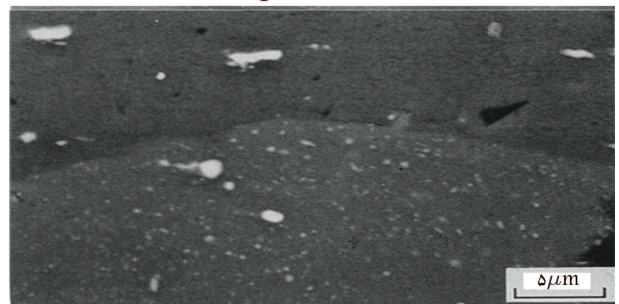
شکل ۱۰. نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزاری در پنجره‌ی جوش‌پذیری بر اساس شماره گره‌ها.



الف) ناحیه ۱، اثرات ذوب شدگی در انتهای شیار؛



ب) ناحیه ۲، جوش خوردگی با سطح مشترک موجی؛

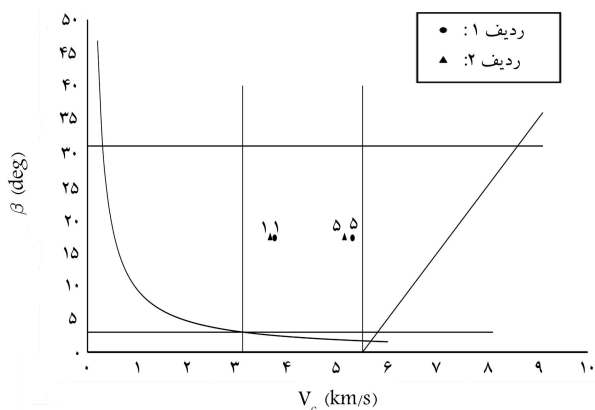


ج) ناحیه ۳، جوش خوردگی با سطح مشترک نسبتاً صاف.^[۲۱]

شکل ۱۱. نواحی تشکیل شده در شیار در اثر جوش خوردگی ورق پرنده با پایه.

۶. بهینه‌سازی فرایند

بهینه‌سازی با هدف افزایش سطح اتصال مطلوب و مورد قبول در محدوده اتصال هر شیار به همراه بیشینه‌سازی پهنای شیارها به منظور کاهش هزینه‌ی ساخت صورت پذیرفته است. بدین منظور با استفاده از ایجاد ارتباط دو نرم‌افزار متاب و آباکوس، از الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه با اهداف کاهش اختلاف بین سرعت‌های



شکل ۱۲. نحوه‌ی قرارگیری نتایج حاصل از بهینه‌سازی در پنجره‌ی جوش‌پذیری.

جوش خورده درون پنجره‌ی جوش‌پذیری و در نتیجه بهبود کیفیت جوش، مقدار پهنای شیارها نیز در حدود ۳۷ درصد افزایش یافته است که این امر سبب کاهش هزینه ساخت می‌شود.

۷. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به مقایسه‌ی تصاویر حاصل از آزمایش تجربی با نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزاری که بر مبنای پنجره‌ی جوش‌پذیری انجام شده است، تطابق مقبولی بین آنها قابل مشاهده است که این امر سبب می‌شود تا بتوان از این روش برای پیش‌بینی وضعیت جوش حاصله در این فرایند کمک گرفت. همچنین بررسی نتایج حاصل از بهینه‌سازی این فرایند که در پنجره‌ی جوش‌پذیری صورت پذیرفته نشان‌دهنده‌ی بهبود وضعیت جوش در محل اتصال دو ورق به همراه افزایش پهنای شیارهاست. بنابراین می‌توان از روش انجام شده در این مقاله، برای حذف یا کاهش آزمون‌های تجربی و عملیات سعی و خطا به منظور بهینه‌سازی فرایند استفاده کرد؛ این امر باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت در رسیدن به پارامترهای بهینه برای حصول اطمینان از اتصال مورد قبول در این فرایند می‌شود. البته قضاوت صحیح‌تر مستلزم پژوهش‌های بیشتر در آینده است.

جدول ۳. نتایج حاصل از بهینه‌سازی.

ردیف	فشار پرتو پالس لیزر (GPa)	ارتفاع شیار (μm)	پهنای شیار (μm)	زاویه‌ی برخورد (degree)
۱	۶,۳۹۱	۴۲,۷	۲۷۳,۲	۱۷,۳۷
۲	۶,۴۵۶	۴۱,۱	۲۶۵,۹	۱۷,۱۷

۷. بهترین خاطره‌ی شخصی هر یک از ذرات به روز می‌شود؛

۸. اعضای نامغلوب جمعیت فعلی به آرشیو خارجی اضافه می‌شود؛

۹. اعضای مغلوب آرشیو خارجی حذف می‌شود؛

۱۰. اگر تعداد اعضای آرشیو خارجی بیش از ظرفیت تعریف شده باشد (در این مسئله ظرفیت، ۵۰ ذره است)، اعضای اضافی نیز حذف می‌شود؛

۱۱. اگر شرایط خاتمه محقق نشده باشد (در این مسئله، شرط خاتمه، ۱۰۰ مرتبه تکرار مراحل ۱ تا ۱۰ است)، به مرحله ۵ باز می‌شود، در غیر این صورت برنامه خاتمه می‌یابد.

پس از انجام فرایند بهینه‌سازی تعداد ۵۰ عدد جواب بهینه، که بر اساس چهار هدف تعریف شده یکدیگر را مغلوب نمی‌کنند، حاصل شد. بر اساس قید مسئله، که مطلوب بودن تمام سطح جوش خورده و به دنبال آن قرارگیری مقادیر مربوط به سرعت و زاویه‌ی جوشکاری تمامی سطح جوش خورده درون پنجره‌ی جوش‌پذیری است، از بین جواب‌های بهینه حاصل شده، جواب‌هایی انتخاب شد که مقادیر سرعت و زاویه‌ی جوشکاری مربوط به گره‌های ۱ و ۵ در آنها به‌طور همزمان درون پنجره‌ی جوش‌پذیری قرارگیرد. بر این اساس در بین آرشیو جواب‌های حاصل شده، جواب‌هایی که دارای این خصوصیات هستند، انتخاب شد. مقادیر مربوط به جواب‌های انتخاب شده و نحوه‌ی قرارگیری آنها درون پنجره‌ی جوش‌پذیری در جدول ۳ و شکل ۱۲ قابل ملاحظه است.

مقایسه‌ی شکل‌های ۱۰ و ۱۲ و همچنین مشاهده‌ی جدول ۳ نشان می‌دهد که علاوه بر قرارگیری مقادیر مربوط به سرعت و زاویه‌ی جوش‌کاری تمامی سطح

پانوشتها

1. impact welding
2. explosive welding
3. magnetic pulse welding
4. laser shock welding
5. atomic bond
6. flyer plate
7. nd:glass
8. base plate
9. explicit
10. symmetry
11. johnson-cook
12. von-mises

13. node
14. particle
15. iteration
16. repository

منابع (References)

1. Akbari-Mosavi, A. A. and Al-Hassani, S. T. S. "Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding", *Mechanics and Physics of Solids*, **53**(11), pp. 2501-2528 (2005).

2. Dubrujeaud, B. and Jeandin, M. "Cladding by laser shock processing", *Materials Science Letters*, **13**(11), pp. 773-775 (1994).
3. Daehn, G. S. and Lippold, J. C., *Low temperature spot impact welding driven without contact*, US Patent, PCT/US09/36499 (2009).
4. Zhang, Y., Babu, S. S., Prothe, C. and et al. "Application of high velocity impact welding at varied different length scales", *Materials Processing Technology*, **211**(5), pp. 994-995 (2011).
5. Wang, H., Liu, D., Taber, G. and et al. "Laser welding-process introduction and key variables", *5th Conference on High Speed Forming*, Columbus Ohio, USA (2012).
6. Wang, X., Gu, C., Zheng, Y. and et al. "Laser shock welding of aluminum/aluminum and aluminum/Copper plates", *Material and Design*, **56**, pp. 26-30 (2013).
7. Wang, X., Gu, Y., Qiu, T. and et al. "An experimental and numerical study of laser impact spot welding", *Materials and Design*, **65**, pp. 1143-1152 (2014).
8. Johnson, G. R. and Cook, W. H. "A constitutive model and data for metals subjected to large strains-high strain rates and high temperatures", *7th international Symposium on ballistics*, **21**, pp. 541-547 (1983).
9. Liu, H., Wang, H., Shen, Z. and et al. "The research on micro-punching by laser-driven flyer", *Machine Tools and Manufacture*, **54-55**, pp. 18-24 (2012).
10. Peyre, P., Fabbro, R., Merrien, P. and et al. "Laser shock processing of aluminum alloys-Application on high cycle fatigue behavior", *Materials Science and Engineering*, A210, pp. 102-113 (2005).
11. Braisted, W. and Brockman, R. "Finite element simulation for laser shock peening", *Fatigue*, **70**(21), pp. 719-724 (1999).
12. Ding, K. and Ye, L., *Laser shock peening performance and process simulation*, Chapter 4, CRC Press, Boca Raton, pp. 76-77 (2006).
13. Peyre, P. and Fabbro, R. "Laser shock processing: a review of physics and applications", *Optical and Quantum Electronics*, **27**(12), pp. 1213-1229 (1995).
14. Abrahamson, G. R. "Permanent periodic surface deformations due to a traveling jet", *Applied Mechanics*, **28**(4), pp. 519-528 (1961).
15. Wylie, H. K., Williams, P. E. G. and Crossland, B. "Further experimental investigation of explosive welding parameters", *3th international Conference high energy fabrication*, **1**(3), University of Denver, Denver, Colorado, pp. 1-43 (1971).
16. Bahrani, A. and Crossland, B. "Some observations on explosive cladding welding", *Annual Conference AD, ASTM E*, pp. 66-112 (1966).
17. Cowan, G. R., Bergman, O. R. and Holtzman, A. H. "Mechanics of bond wave formation in explosive cladding of metals", *Metallurgical Transactions*, **2**, pp. 3145-3155 (1971).
18. Deribas, A. A., Simonov, V. A. and Zakcharenko, I. D. "Investigation on explosive loading and welding geometry", *5th international Conference high energy rate fabrication*, **4**(2), pp. 1-16 (1975).
19. Wittman, R. H. "Use of explosive energy in manufacturing metallic material of new properties", *Czechoslovak Scientific and Technical Society*, Prague, pp. 153 (1973).
20. Wittman, R. H. "Computer selection of the optimum explosive loading and welding geometry", *5th international Conference high energy rate fabrication*, **4**(2), Denver, Colorado, pp. 1-16 (1975).
21. Meyers, M. A., *Dynamic behavior of materials*, Chapter 17, Wiley, New York City (1994).
22. Coello Coello, C. A. "Handling Multiple Objectives With Particle Swarm Optimization", *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, **8**(3), pp. 256-279 (2004).