

بهینه سازی فرآیند پوشش دهی با استفاده از کوبش لیزری براساس الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه

مهرداد بابائیان^۲

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه کاشان

سعید گلابی^۱

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه کاشان

چکیده :

پوشش دهی با استفاده از کوبش لیزری، از جمله روش های جوشکاری ضربه ای می باشد که از اصول حاکم بر جوشکاری حالت جامد تبعیت می کند و متکی بر تأثیر سرعت بسیار بالای برخورد ورق ها و تشکیل جت حاصل از سیلان هیدرودینامیکی سطوح در نقطه برخورد، می باشد. در این روش انرژی لازم جهت حرکت صفحه پرنده، توسط فشار پلاسمای ایجاد شده به واسطه تابش لیزر بر روی سطح آن، تولید می شود. در این مقاله سعی شده است در ابتدا، به مدلسازی این فرآیند و صحت یابی آن بر مبنای نتایج حاصل از آزمایش تجربی پرداخته شود و سپس در ضخامت مشخصی از ورق پرنده با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات چندهدفه، وضعیت جوش حاصل شده از طریق این فرآیند با تغییر در فشار حاصل از تابش لیزر، ارتفاع و پهنای شیار و بر مبنای محاسبه سرعت و زاویه برخورد ورق ها و نحوه قرارگیری آن در پنجره جوش پذیری و ماکزیمم شدن پهنای شیار، بهینه شود. انجام این پژوهش، علاوه بر ارائه روشی نوین و کاربردی در فرآیند پوشش دهی با استفاده از کوبش لیزری، سبب ارائه راهکاری در راستای کاهش هزینه و زمان لازم جهت انتخاب مشخصات شیار مورد نیاز به منظور انجام پوشش دهی در شرایط بهینه، می گردد.

واژه های کلیدی :

جوشکاری با استفاده از کوبش لیزری، پوشش دهی، پنجره جوش پذیری، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات چندهدفه

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): golabi-s@kashanu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: mehrdadbabaeian@gmail.com

Optimization of cladding using laser shock welding by Multi-objective particle swarm algorithm

S. Golabi

Mechanical Engineering Department
Kashan University

M. Babaeian

Mechanical Engineering Department
Kashan University

ABSTRACT :

The laser shock welding that recently attracted the attention of many researchers, includes impact welding process and such as explosive welding and magnetic welding, follows the principles of solid state welding and is based on the influence of high-velocity collision of plates and the formation of jet as a result of hydrodynamic flow at the point of collision so that the jet caused by the flow when getting away from the collision of two plates, causes separation of the surface layers such as metal oxides and is created metallurgical atomic bonding in the solid phase at the interface contact. the laser shock welding like other impact welding process, is done at ambient temperature and on the effects of high speed contact. In this process, the energy required to move the flyer plate, is produced by plasma pressure created by laser radiation on the surface of the plate. Similar to cladding process, the main advantage of this connection is its capability to attach two dissimilar metals in order to create enhanced physical, chemical, or mechanical properties on one side of the two binded metal's surface that it is economically very important.

Same as other methods of the welding, it is very important forecast and optimization of the weld quality obtained by this process. So due to the importance of calculating and checking the characters such as impact speed and angle in the impact welding process to determine the quality connection at the collision point of two plates, in this paper first, Finite element method using abaqus software, was employed to simulate the welding status and the results is checked with experimental tests and then, by the multi-objective particle swarm optimization (MOPSO), in a certain thickness of the flyer plate, this welding status was optimized by changing in the pressure of the laser, the height and width of groove based on the collision point velocity and angle in the weldability window and maximizing the width of groove.

The comparison of the laser shock welding simulation with the experimental tests and the doing of the optimization is based on the weldability window. The results of the optimization indicates an increase weld quality at the point of connection along with reducing the number of grooves that can reduce the cost. This method, in addition to providing a new and practical solution to the laser cladding process, reduces the cost and time required to select the groove profile for optimum cladding.

Keywords:

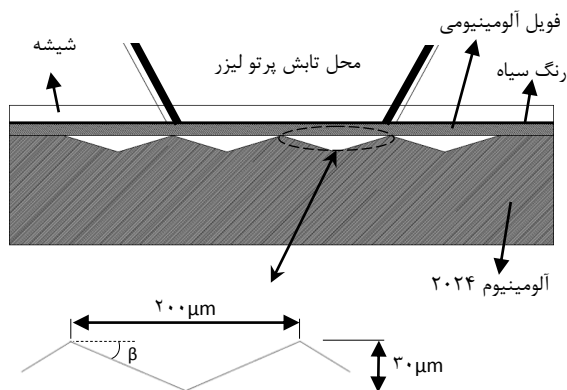
Laser shock welding, Cladding, Weldability Window, Multi-Objective Particle Swarm Optimization

۱- مقدمه

تشخیص نوع کیفیت اتصال در محل برخورد دو ورق، در این مقاله سعی شده است روشی متفاوت از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، صورت پذیرد. بر همین اساس در ابتدا بر مبنای آزمایش تجربی انجام شده توسط دوبروجیارد و جیان‌دین [۲]، به مدلسازی، تحلیل و استخراج نتایج لازم جهت بررسی کیفیت جوش بر مبنای پنجره جوش پذیری و صحت‌یابی این نتایج پرداخته شده است و سپس در ضخامت مشخصی از ورق پرنده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه، وضعیت جوش حاصل شده از طریق این فرآیند با تغییر در فشار حاصل از تابش لیزر، ارتفاع و پهنای شیار و بر مبنای محاسبه سرعت و زاویه برخورد ورق‌ها و نحوه قرارگیری آن در پنجره جوش پذیری و ماکزیمم شدن پهنای شیار، بهینه شده است.

۲- شرح مسئله

دوبروجیارد و جیان‌دین [۲]، با استفاده از لیزر پالسی نئودیمیموم-شیشه^۷ با طول موج ۱/۰۶ میکرون و مدت تابش پالس ۳۰ نانو ثانیه، پرتویی به قطر ۶ میلی‌متر و چگالی انرژی ۳۵۰ ژول بر سانتی متر مربع را بر روی فویل آلومینیومی که از آن به عنوان ورق پرنده استفاده می‌شود و از جنس آلومینیوم خالص (۹۹/۹ درصد) و با ضخامت ۲۰ میکرون می‌باشد، تاییدند. بر روی فویل آلومینیومی و در محل تابش، رنگ سیاهی جهت جذب انرژی لیزر، مالیده شده و بر روی آن به جهت افزایش فشار پلاسمای ایجاد شده، یک لایه شیشه‌ای مطابق شکل ۱، قرار داده شده است. ورق پایه^۸ از جنس آلومینیوم ۲۰۲۴ می‌باشد و روی سطح تماس آن با ورق پرنده، شیارهایی مثلثی و یکسان، جهت ایجاد برخورد مایل بین آنها تعبیه شده است. عمق این شیارهای متساوی الساقین، ۳۰ میکرون و قاعده آن‌ها ۲۰۰ میکرون می‌باشند. بنابراین زاویه برخورد دو ورق پرنده و پایه، ۱۶/۷ درجه است.



شکل (۱): هندسه و نحوه قرارگیری ورق‌ها [۲].

یکی از روش‌های جوشکاری فلزات همجنس و غیر همجنس، جوشکاری ضربه‌ای^۱ می‌باشد. جوشکاری انفجاری^۲، مغناطیسی^۳ و کوبش لیزری^۴ از جمله روش‌های انجام جوشکاری ضربه‌ای می‌باشند. اساس این روش‌ها بر مبنای جوشکاری حالت جامد می‌باشد که در آن فلزات با سرعت‌های بسیار بالا با یکدیگر برخورد می‌کنند و انرژی حاصل از آن صرف سیلان هیدرودینامیکی سطوح در نقطه برخورد می‌شود. بطوری که جت به وجود آمده در اثر این سیلان، در هنگام دور شدن از نقطه 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 می‌گردد [۱]. جوشکاری با استفاده از کوبش لیزری همچون سایر روش‌های جوشکاری ضربه‌ای در دمای محیط و متکی بر تأثیر سرعت بسیار بالای برخورد، انجام می‌شود و انرژی لازم جهت حرکت صفحه پرنده^۶ توسط فشار پلاسمای ایجاد شده به واسطه تابش لیزر بر روی آن، تولید می‌شود.

دوبروجیارد و جیان‌دین [۲] اولین بار در سال ۱۹۹۴ با استفاده از کوبش لیزری و بر اساس اصول جوشکاری انفجاری، آلومینیوم خالص را به آلومینیوم ۲۰۲۴ متصل کردند. در سال ۲۰۱۱ راهن و دیپولد [۳] پروسه جوش با استفاده از کوبش لیزری را بر مبنای برخورد مایل دو ورق، در قالب اختراعی به ثبت رساندند. زهانگ و همکارانش [۴] در سال ۲۰۱۱ دو ورق همجنس آلومینیومی (AA۱۱۰۰) و دو ورق از جنس‌های آلومینیوم (AA۱۱۰۰) و فولاد کم کربن (۱۰۱۰) که تحت زاویه ۱۵ درجه نسبت به هم قرار گرفته بودند را جوش دادند. وانگ و همکارانش [۵] در سال ۲۰۱۲ تغییرات هندسی مختلف و اثرات ناشی از آن را بر روی فرآیند جوشکاری با استفاده از کوبش لیزری، مورد بررسی قرار دادند. وانگ و همکارانش [۶] در سال ۲۰۱۳ دو ورق غیر همجنس آلومینیومی و مسی که نسبت به هم با زاویه ۲۰ درجه قرار گرفته‌اند را توسط کوبش لیزری به یکدیگر متصل کردند. وانگ و همکارانش [۷] در سال ۲۰۱۴ با تغییر قطر پرتولیزر، فاصله دو ورق و انرژی لیزر، تأثیرات آنها را به صورت تجربی و تحلیلی در هنگام جوشکاری توسط فرآیند کوبش لیزری دو ورق که به صورت موازی نسبت به هم قرار گرفته‌اند را مورد بررسی قرار دادند.

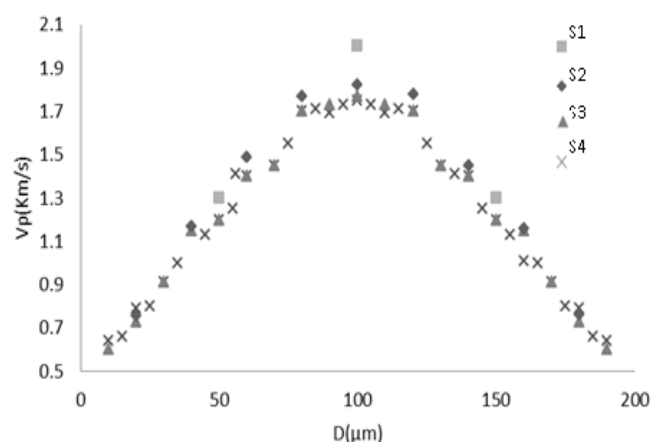
با توجه به اهمیت محاسبه و بررسی خصوصیات همچون سرعت و زاویه برخورد در جوشکاری‌هایی از نوع ضربه‌ای جهت

- 1 - Impact Welding
- 2 - Explosive Welding
- 3 - Magnetic Pulse Welding
- 4 - Laser Shock Welding
- 5 - Atomic Bond
- 6 - Flyer Plate

۳- مدل‌سازی و تحلیل

رسم گردیده است. همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، در چهار حالت، نمودار روندی شبیه به هم را دارند اما دو حالت S3 و S4 تقریباً همگرا شده‌اند و اختلاف حالت S2 با آنها، کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد. بنابراین و به دلیل افزایش سرعت تحلیل، از حالت S2 جهت مش بندی مدل، استفاده شده است.

براین اساس، ورق پرنده شامل ۶۱۸۳۴ المان شده است که ۴۲۹۵۲ تعداد از آنها در محدوده تابش لیزر قرار می‌گیرد و تعداد المان‌های ورق پایه ۱۲۱۰۶۶۸ می‌باشد که تعداد ۱۷۹۱۷۷ المان از آن، سهم محدوده نزدیک به شیارها می‌شود. جنس ورق پایه، آلومینیوم ۲۰۲۴ و ورق پرنده آلومینیوم با خلوص ۹۹/۹ درصد براساس خواص نشان داده شده در جدول ۱، در نظر گرفته شده است.



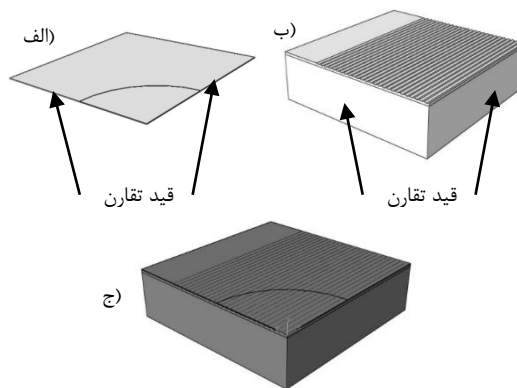
شکل (۳): نتایج حاصل از بررسی استقلال شبکه

جدول (۱): خواص جنس ورق ها [۲].

عنوان	جنس	چگالی (kg/m ³)	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

در این شبیه سازی از مدل پلاستیسیته‌ی جانسون-کوک^۳ که نوع ویژه‌ای از پلاستیسیته فن میسر^۴ و حالت خاصی از سخت شدن ایزوتروپیک می‌باشد و در روابط ۱ و ۲ ارائه شده است [۸]، به دلیل سرعت بالای فرآیند و فشار بالای وارد شده که سبب نرخ کرنش بسیار بالایی می‌شود، با بکارگیری از ضرایب موجود در جدول ۲، استفاده شده است [۹].

شبیه سازی این فرآیند در نرم افزار آباکوس انجام شده است. با توجه به ماهیت کاملاً دینامیکی و ایجاد کرنش‌هایی با نرخ بالا در آن، از حلگر ضمنی^۱ جهت تحلیل بکارگرفته شده است. مدل‌سازی هندسی ورق پرنده و پایه به صورت سه بعدی و جهت افزایش سرعت تحلیل و با توجه به تقارن حاکم بر مسئله، تنها یک چهارم آن و با در نظر گرفتن قید تقارن^۲ در دو سطح جانبی آنها، همانطور که در شکل ۲ نمایش داده شده، صورت پذیرفته است.



شکل (۲): الف) مدل یک چهارم ورق پرنده، ب) مدل یک چهارم ورق پایه، ج) قرارگیری دو ورق بر روی هم.

ابعاد مدل یک چهارم ورق پرنده، ۷×۷×۰/۰۲ میلی متر، ابعاد مدل یک چهارم ورق پایه، ۷×۷×۲ میلی متر و شعاع محل اثر لیزر، ۳ میلی متر در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل و هندسه اجزاء و خواص حاکم بر مسئله و به منظور کاهش زمان اجرای نرم افزار با المان‌هایی با نقاط انتگرالگیری کاهش یافته نسبت به المان‌هایی از نوع انتگرال کامل، به خصوص در حالت سه بعدی، در کنار توجه به چگالی شبکه به منظور کنترل دقت جواب‌های مسئله و همچنین با توجه به وجود تغییر شکل زیاد در شبکه، نوع المان‌ها در هر دو ورق پایه و پرنده، C3DAR انتخاب شده است.

به دلیل تأثیر بهتر فشار ناشی از پرتو لیزر، در محدوده تابش در 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 می‌باشد. بر این اساس و به دلیل بررسی استقلال شبکه در این نواحی، با در نظر گرفتن چهار اندازه ۰/۰۵، ۰/۰۲، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۵ میلی متر برای ناحیه تابیده شده لیزر بر روی 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 است،

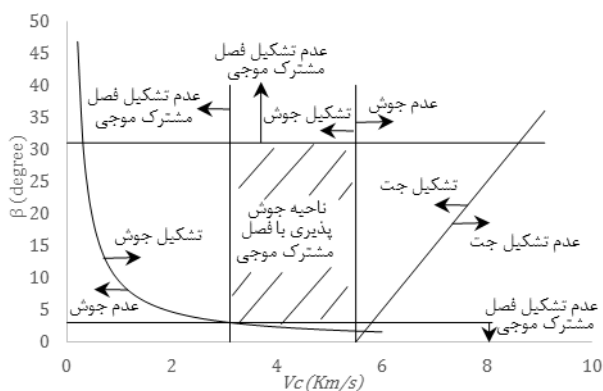
3 - Johnson-Cook
4 - Von-Mises

1 - Explicit
2 - Symmetry

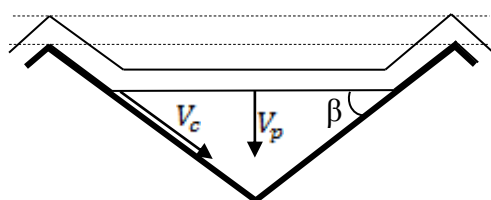
برخورد آنها می‌باشد. پنجره جوش پذیری ورق پایه و پرنده در این مقاله، با استفاده از جدول ۱ و روابط ارائه شده در مورد حد زاویه بحرانی برخورد جهت تشکیل جت [۱۴]، حد بالا و پایین زاویه دینامیکی برخورد [۱۵] و سرعت جوشکاری [۱۶ و ۱۷]، فشار بحرانی که فراتر از آن می‌توان رفتار فلز را سیال گونه فرض کرد [۱۸] و ماکزیمم سرعت صفحه پرنده جهت جلوگیری از ایجاد عیوبی نظیر پوسته پوسته شدن در فصل مشترک [۱۹ و ۲۰]، در شکل ۵ رسم گردیده است.

سرعت جوشکاری دو ورق V_c ، با توجه به سرعت عمودی ورق پرنده در لحظه برخورد آن با ورق پایه V_p و براساس شکل ۶ و رابطه ۳ محاسبه گردیده است [۲۱].

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



شکل (۵): پنجره جوش پذیری ورق پرنده و پایه.



شکل (۶): زاویه برخورد و بردارهای سرعت عمودی و جوشکاری.

۵- بررسی نتایج حاصل از آنالیز اجزاء محدود

جهت محاسبه سرعت ورق پرنده در لحظه برخورد با ورق پایه، هر قسمت از ورق پرنده که بر روی یک شیار قرار دارد به ۱۰ قسمت با فواصل ۲۰ میکرون تقسیم شده است. نمودار مربوط به سرعت برخورد ورق پرنده با ورق پایه در هر گره^۱ بجز گره‌هایی که دارای تماس اولیه با رأس هر شیار می‌باشند، برحسب فاصله هر گره از مرکز تابش در راستای عمود بر شیارها و براساس نتیجه حاصل از تحلیل نرم افزاری، در شکل ۷ قابل ملاحظه می‌باشد. جهت محاسبه سرعت برخورد عمودی در هر گره، اولین ماکزیمم سرعتی

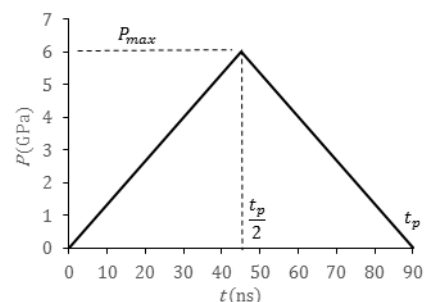
$$\sigma = (A + B \varepsilon^n) [1 + C \ln(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)] [1 - (T^*)^m] \quad (1)$$

$$T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room}) \quad (2)$$

جهت اعمال اثر پرتو لیزر بر روی ورق پرنده در این شبیه سازی از فشار معادل حاصل از پلاسمای ایجاد شده، استفاده می‌شود. براساس انرژی پالس لیزر تابش شده، مقدار فشار ماکزیمم وارده، ۶ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است [۲] و براساس نتایج حاصل از تحقیقات پیر و همکارانش [۱۰] نحوه 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 مثلثی بسیار شبیه است و می‌توان از تابع مثلثی همانند شکل ۴، استفاده نمود [۱۲]. طبق این تابع، فشار در نصف زمان اعمال، به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. در هنگامی که از لایه شیشه‌ای جهت افزایش فشار پلاسمای ایجاد شده بر روی ورق پرنده استفاده شود، زمان اعمال فشار t_p ، ۲ تا ۳ برابر زمان تابش لیزر در نظر گرفته می‌شود [۹ و ۱۳]. در این مقاله، زمان اعمال فشار ۹۰ نانوثانیه در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): ضرایب معادله 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	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵
n	۰/۳۴	۰/۳۴
m	۱	۱
T_{melt} (°K)	۷۷۵	۹۳۳/۱۵
T_{room} (°K)	۳۰۰/۱۵	۳۰۰/۱۵
$\dot{\varepsilon}_0$ (s ⁻¹)	۱	۱

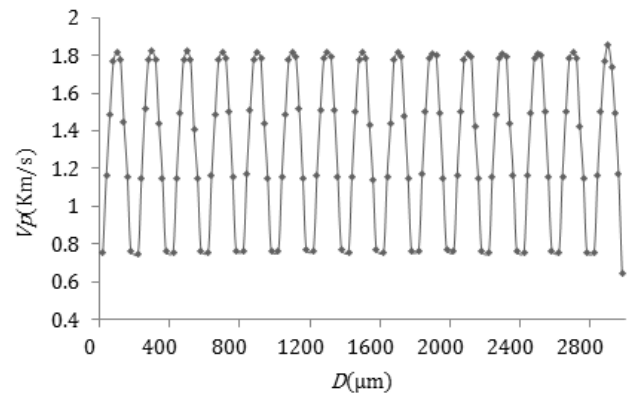


شکل (۴): توزیع مثلثی فشار [۱۲].

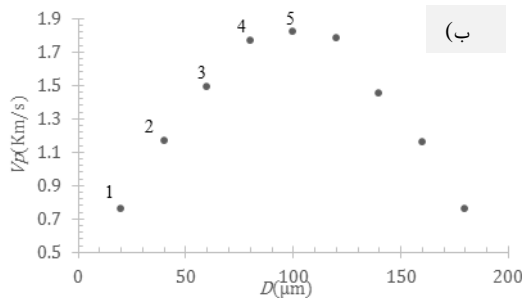
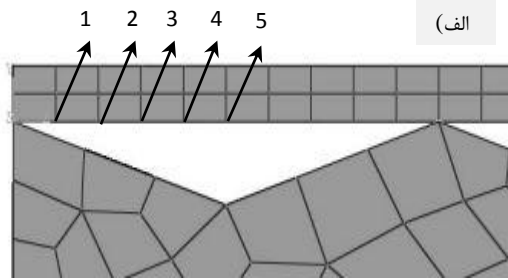
۴- رسم پنجره جوش پذیری

هدف از رسم پنجره جوش پذیری، پیش بینی وضعیت جوش براساس دو عامل اصلی سرعت جوشکاری دو ورق و زاویه دینامیکی

که هر گره در نمودار سرعت-زمان، به آن دست می‌یابد، به عنوان سرعت برخورد آن گره با ورق پایه، در نظر گرفته شده است.



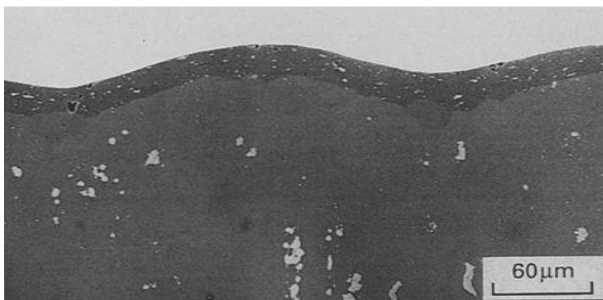
شکل (۷): سرعت برخورد گره‌های ورق پرنده بر حسب فاصله از مرکز تابش.



شکل (۸): الف) شماره گذاری گره‌ها بر روی ورق پرنده، ب) سرعت برخورد گره‌ها.

ناحیه دوم مطابق شکل ۱۱(ب)، در قسمت میانی شیار می‌باشد. گره‌های معادل این ناحیه گره‌های ۲ و ۳ می‌باشند که مطابق شکل ۱۰، در قسمت جوش خوردگی قابل قبول و به صورت موجی، قرار گرفته‌اند.

ناحیه سوم در قسمت بالایی شیار می‌باشد. در این ناحیه طبق شکل ۱۱(ج)، جوش خوردگی به صورت صاف قابل مشاهده می‌باشد. گره معادل این ناحیه گره شماره ۱ می‌باشد که مطابق شکل ۱۰، در قسمتی قرار گرفته است که بیان کننده جوش خوردگی صاف و بدون موجی شدن می‌باشد. بنابر مقایسه انجام شده، تطابق مطلوبی بین نتایج تجربی و عددی برقرار می‌باشد.



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

با توجه به این نمودار، سرعت ورق پرنده در تمامی شیارها تقریباً شبیه به هم می‌باشند و همچنین پروفیل سرعت در هر شیار نسبت به نیمه آن، متقارن است. بنابراین جهت محاسبه سرعت جوشکاری و بکارگیری آن در پنجره جوشکاری، سرعت گره‌های شماره گذاری شده بر روی ورق پرنده در نیمه 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 است، در نظر گرفته نشده است. نتایج حاصل از آزمایش تجربی انجام شده توسط دوبروجیود و جیاندین [۲] که توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده است، در شکل ۹ قابل مشاهده می‌باشد. براساس سرعت گره‌های نمایش داده شده در شکل ۸ و با استفاده از رابطه ۳ و در نظر گرفتن زاویه ۱۶/۷ درجه به عنوان زاویه دینامیکی برخورد، سرعت جوشکاری گره‌های مورد نظر محاسبه گردیده و در پنجره جوش پذیری مطابق شکل ۱۰، قرار داده شده است. با دقت در شکل ۹ و همچنین شکل ۱۰، سه ناحیه قابل مشاهده می‌باشد. این سه ناحیه در شکل ۱۱ بزرگ نمایی شده‌اند.

ناحیه اول در قسمت تحتانی شیار می‌باشد. در این ناحیه طبق شکل ۱۱(الف)، ذوب شدگی مشاهده می‌شود که همچون میله‌ای در سرتاسر شیار ادامه پیدا کرده است [۲]. گره‌های معادل این ناحیه گره‌های ۴ و ۵ می‌باشند که مطابق شکل ۱۰، در قسمتی قرار می‌گیرند که در لحظه برخورد، جت سیال ایجاد می‌شود ولی در محدوده جوش‌پذیری قرار نمی‌گیرند. بنابراین وجود این ناحیه ذوب شده را می‌توان عدم امکان خروج جت سیال ایجاد شده از محدوده برخورد و تجمع آن در انتهای شیار تحلیل کرد.

۶- بهینه سازی فرآیند

بهینه سازی با هدف افزایش سطح اتصال مطلوب و مورد قبول در محدوده اتصال هر شیار به همراه ماکزیمم نمودن پهنای شیارها به منظور کاهش هزینه ساخت، صورت پذیرفته است. بدین منظور با استفاده از ایجاد ارتباط دو نرم افزار متلب و آباکوس، از الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه با اهداف کاهش اختلاف بین سرعت‌های جوشکاری گره‌های ۱ و ۵ در شکل ۸ با سرعت مربوط به نقطه مرکز سطح پنجره جوش پذیری آنها و کاهش اختلاف بین زاویه جوشکاری دو ورق با زاویه مربوط به نقطه مرکز سطح پنجره جوش پذیری 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. البته این نکته قابل ذکر می‌باشد که به دلیل قرارگیری سرعت گره‌های ۲، ۳ و ۴ در محدوده بین سرعت گره‌های ۱ و ۵، از وارد کردن آنها در محاسبات مربوط به بهینه سازی به منظور کاهش زمان تحلیل، صرف نظر شده است. سرعت و زاویه مربوط به مرکز سطح ناحیه هاشور خورده در شکل ۵ و براساس شکل ۱۰، به ترتیب برابر با ۴/۳۰۰۷ کیلومتر بر ثانیه و ۱۷ درجه می‌باشند.

الگوریتم بکار گرفته شده در این مقاله بر مبنای اصول بیان شده در مقاله‌ای که توسط کوئلو کوئلو [۲۶] ارائه شده است و با در نظر گرفتن تعداد ۱۵ ذره^۱ و ۱۰۰ عمل تکرار^۲، می‌باشد.

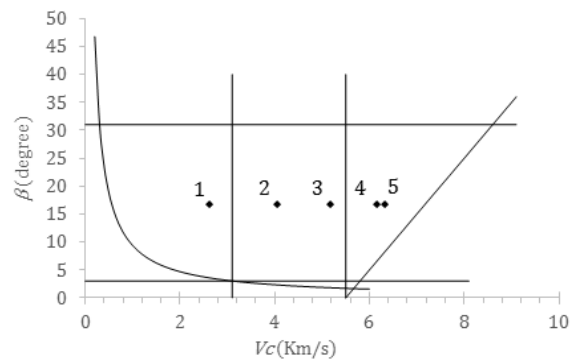
در الگوریتم‌های بهینه سازی چند هدفه، نتیجه یک جواب بهینه نیست بلکه مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه براساس اهداف مسئله می‌باشند، که یکدیگر را مغلوب نمی‌کنند. به منظور ذخیره سازی این مجموعه جواب‌های بهینه از یک آرشیو خارجی که در اصطلاح ریپازیتوری^۳ نامیده می‌شود و ظرفیت آن در این مقاله تعداد ۵۰ جواب نا مغلوب در نظر گرفته شده است، استفاده می‌شود. در این مسئله اهدافی که در پی مینیمم سازی آنها می‌باشیم، همچون روابط ۳، ۴، ۵ و ۶ می‌باشد که به صورت بی بعد در نظر گرفته شده است.

$$D_1 = \frac{|V_{c1} - \bar{V}_c|}{\bar{V}_c} \quad (3)$$

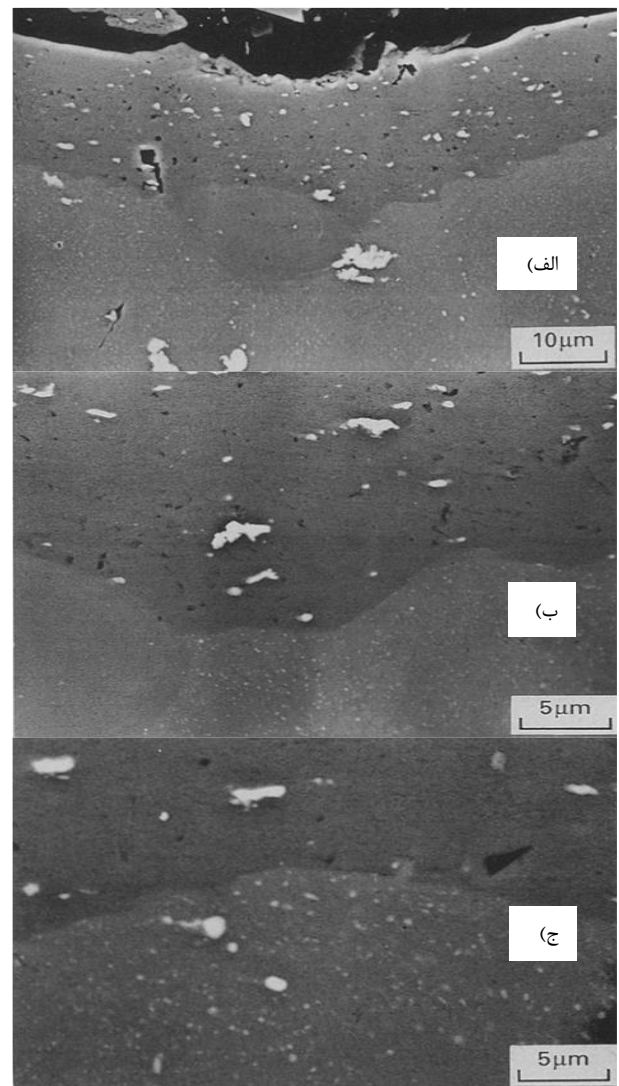
$$D_2 = \frac{|V_{c5} - \bar{V}_c|}{\bar{V}_c} \quad (4)$$

$$D_3 = \frac{|\beta - \bar{\beta}|}{\bar{\beta}} \quad (5)$$

$$D_4 = \frac{t}{a} \quad (6)$$



شکل (۱۰): نتایج حاصل از تحلیل نرم افزاری در پنجره جوش پذیری براساس شماره گره‌ها.



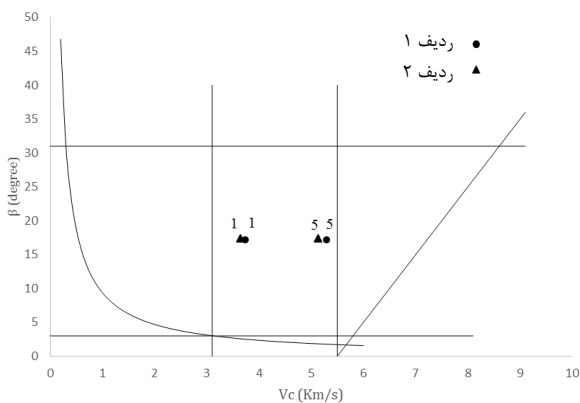
شکل (۱۱): (الف) ناحیه ۱، اثرات ذوب شدگی در انتهای شیار، (ب) ناحیه ۲، جوش خوردگی با سطح مشترک موجی، (پ) ناحیه ۳، جوش خوردگی با سطح مشترک نسبتاً صاف [۲].

1 - Particle
2 - Iteration
3 - Repository

گره‌های ۱ و ۵ در آنها به طور همزمان درون پنجره جوش پذیری قرار گیرد. براین اساس در بین آرشیو جواب‌های حاصل شده، جواب‌هایی که دارای این خصوصیات می‌باشند، انتخاب گردید. مقادیر مربوط به جواب‌های انتخاب شده و نحوه قرارگیری آنها درون پنجره جوش پذیری در جدول ۳ و شکل ۱۲ قابل ملاحظه می‌باشد.

جدول (۳): نتایج حاصل از بهینه سازی.

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



شکل (۱۲): نحوه قرارگیری نتایج حاصل از بهینه سازی در پنجره جوش پذیری.

با مقایسه شکل های ۱۰ و ۱۲ و همچنین مشاهده جدول ۳، می‌توان دریافت که علاوه بر قرارگیری مقادیر مربوط به سرعت و زاویه جوشکاری تمامی سطح جوش خورده درون پنجره جوش پذیری 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.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به مقایسه تصاویر حاصل از آزمایش تجربی با نتایج حاصل از تحلیل نرم افزاری که بر مبنای پنجره جوش پذیری انجام شده است، تطابق مقبولی بین آنها قابل مشاهده می‌باشد که این امر سبب می‌شود تا بتوان از این روش جهت پیش بینی وضعیت جوش حاصل شده در این فرآیند، کمک گرفت. همچنین بررسی نتایج حاصل شده از بهینه سازی این فرآیند که در پنجره جوش پذیری صورت پذیرفته است، نشان دهنده بهبود در وضعیت جوش در

در این روابط \bar{V}_c ، $\bar{\beta}$ به ترتیب سرعت و زاویه مربوط به مرکز سطح ناحیه هاشور خورده در شکل ۵ و t, β, V_{c5}, V_{c1} به ترتیب سرعت‌های جوشکاری گره‌های ۱ و ۵ در شکل ۸، زاویه جوشکاری دو ورق، ضخامت ورق پرنده و پهنای شیار می‌باشند و ضخامت ورق پرنده، مقدار ثابت ۲۰ میکرون در نظر گرفته شده است.

روند الگوریتم بهینه سازی چند هدفه مورد استفاده در این مسئله، به صورت ذیل می‌باشد [۲۶]:

(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 مینیمم سازی اهداف بیان شده در روابط ۳، ۴، ۵ و ۶)؛

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

(۵) جدول بندی 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 خاطره شخصی)؛

(۷) بهترین خاطره شخصی هریک 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 می‌باشد)، اعضای اضافی نیز حذف می‌شود؛

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

پس از انجام فرآیند بهینه سازی تعداد ۵۰ عدد جواب بهینه، که بر اساس چهار هدف تعریف شده یکدیگر را مغلوب نمی‌کنند، حاصل گردید. بر اساس قید مسئله، که مطلوب بودن تمام سطح جوش خورده و به دنبال آن قرارگیری مقادیر مربوط به سرعت و زاویه جوشکاری تمامی سطح جوش خورده درون پنجره جوش پذیری می‌باشد، از بین جواب‌های بهینه حاصل شده، جواب‌هایی انتخاب گردید که مقادیر سرعت و زاویه جوشکاری مربوط به

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, 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. Wielage, H. and Vollertsen, F. "Influence of different process parameters on deformation velocity in laser shock forming", 4th International Conference on High Speed Forming, Columbus Ohio, USA (2010).
23. Beitz, W., ed., Grote, K. H., ed. "Dübel : Taschenbuch für den Maschinenbau", 20th Edition, Springer, Berlin (2000).
24. Hosford, W. F. and Caddell, R. M. "Metal Forming : Mechanics and Metallurgy", third Edition, Chapter 12, Cambridge University Press (2007).
25. Lange, K., ed. "Metalforming-Handbook for Industry and Science", 2nd ed., Vol.3 of Sheet Metal Processing, Springer-Verlag, Berlin (1990).
26. Coello Coello, C. A. "Handling Multiple Objectives With Particle Swarm Optimization", IEEE Congress on Evolutionary Computation, 8 (3), pp. 256-279 (2004).

محل اتصال دو ورق به همراه افزایش پهنای شیارها می‌باشد. بنابراین می‌توان از روش انجام شده در این مقاله، جهت حذف و یا کاهش تست‌های تجربی و عملیات سعی و خطا به منظور بهینه سازی فرآیند، استفاده شود که این امر باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت در رسیدن به پارامترهای بهینه جهت حصول اطمینان از اتصال مورد قبول در این فرآیند، می‌گردد. البته قضاوت صحیح تر مستلزم پژوهش‌های بیش تر در آینده می‌باشد.

۷- مراجع

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., Blakely, M., Kwasegroch, J., Laha, M. 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 Lippold, J. C. "Laser welding-process introduction and key variables", 5th Conference on High Speed Forming, Columbus Ohio, USA (2012).
6. Wang, X., Gu, C., Zheng, Y., Shen, Z. and Liu, H. "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., Ma, Y., Zhang, D. and Liu, H. "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., Huang, Z., Li, W., Zheng, Y. and Wang, X. "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 Lieurade, H. P. "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", pp. 76-77 CRC Press, Boca Raton (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).

