

Original Research

Investigation and optimization of friction stir welding process of aluminum 5010 to 6061

Peyman Ghasemi Tamami^{*1}, Abootaleb Javadimanesh², Saeid Mardani³

¹PhD Student, Department of Manufacturing, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

²Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Imam Mohammad Bagher, Mazandaran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Sari, Iran.

³B. Sc., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Imam Mohammad Bagher, Mazandaran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Sari, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 04.25.2020

Revised: 12.25.2020

Accepted: 01.16.2021

Keyword:

Friction stir welding
Aluminum alloys 5010 and 6061
Finite element simulation
Optimization

***Corresponding Author:**

Peyman Ghasemi Tamami

Email:

Engghasemi696@gmail.com

ABSTRACT

The feasibility of joining AA6061 and AA5010 by FSW is one of main purposes of the current research. First, 9 experiments were conducted with aim of optimal pin profile design. These experiments were designed by using various straight cylindrical, square and triangular pin profiles under different frictional conditions. Results of the first stage indicated that the tool with square pin profile leads to the highest tensile strength, hardness and elongation. All process steps were simulated in finite element software and the results were analyzed. Hence, this tool was applied for conducting the second stage of experiments. Experiments of second stage were designed and performed with the aim of investigating the effect of tool rotary speed, welding speed and plunge depth on tensile strength, hardness and elongation and selection of optimal factors combination which result in maximal mechanical properties. In the second stage, the central composite design of experiments was used to conduct experiments and to model mechanical properties accurately and find the optimal solution, the neural network was integrated with particle swarm optimization (PSO). Results demonstrated that the neural network with topography of 3-11-3 yields superior prediction. In addition, tool rotary speed of 800 RPM, welding speed of 60 mm/min and plunge depth of 0.2 mm is the optimal combination that leads to maximal tensile strength, hardness and elongation.



بررسی و بهینه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های آلومینیوم ۵۰۱۰ به آلومینیوم ۶۰۶۱

پیمان قاسمی تمامی^{۱*}، ابوطالب جوادی‌منش^۲، سعید مردانی^۳

- ۱- دانشجوی دکتری، دپارتمان ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۲- عضو هیئت علمی، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده امام محمد باقر (ع)، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان مازندران، ایران.
- ۳- کارشناسی، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده امام محمد باقر (ع)، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان مازندران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف این پژوهش، امکان‌سنجی اتصال آلیاژهای غیرهمجنس آلومینیوم ۶۰۶۱ و آلومینیوم ۵۰۱۰ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد. در ابتدا تعداد ۹ آزمایش با هدف طراحی بهینه هندسه بین ابزار انجام می‌شود. این آزمایش‌ها با سه هندسه پین استوانه‌ای، مثلثی و مربعی و تحت شرایط مختلفی از پارامترهای ورودی فرایند انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که پین با هندسه مربعی سبب رسیدن به بیشترین مقدار استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی شده است. تمامی مراحل اجرای فرایند در نرم‌افزار المان محدود شبیه‌سازی و نتایج به‌دست‌آمده بررسی شد. مرحله دوم آزمایش‌ها با هدف بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر سرعت چرخشی ابزار، سرعت پیش‌روی جوش و عمق غوطه‌وری بر استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی و انتخاب ترکیب بهینه‌ای از پارامترها که سبب بیشترین مقدار ممکن خواص مکانیکی شوند، طراحی و اجرا شده است. در این مرحله، از روش طراحی مرکب مرکزی استفاده و جهت ایجاد مدل دقیق از خواص مکانیکی و انتخاب پارامترهای بهینه، شبکه‌های عصبی مصنوعی با الگوریتم اجتماع ذرات ترکیب شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که شبکه عصبی با ساختار ۳-۱۱-۳ کمترین خطا را در پیش‌بینی خواص مکانیکی خواهد داشت. همچنین نتایج بهینه‌سازی نشان داد که سرعت چرخشی ابزار ۸۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیش‌روی ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق غوطه‌وری ۰/۲ میلی‌متر، جواب‌های بهینه‌ای است که سبب رسیدن به استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی مطلوب خواهد شد.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۶

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۰۵

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷

کلید واژگان:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
آلیاژهای آلومینیوم ۵۰۱۰ و ۶۰۶۱
شبیه‌سازی المان محدود
بهینه‌سازی

*نویسنده مسئول: پیمان قاسمی تمامی

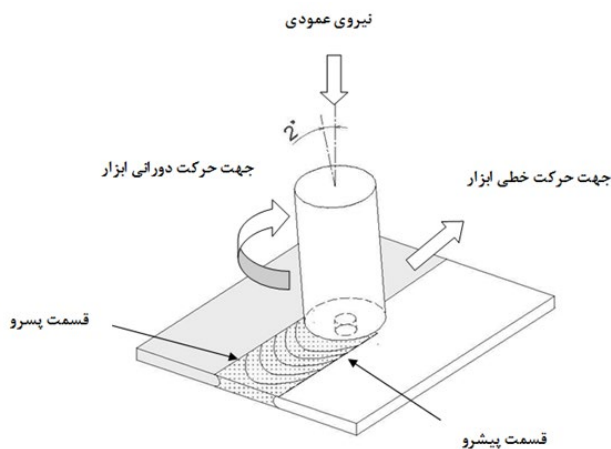
پست الکترونیکی:

Engghasemi696@gmail.com

مقدمه

امروزه فرایندهای جوشکاری در حوزه اتصالات قطعات صنعتی، از جایگاه خاصی برخوردار هستند؛ به گونه‌ای که صنعت مهندسی به سازه‌ها و قطعات جوشکاری شده وابستگی کامل دارد. جوشکاری، رایج‌ترین فرایند در اتصالات فلزی است و در واقع پرکاربردترین روش ساخت و تولید محصولات صنعتی می‌باشد. به گونه‌ای که جوشکاری، نقش کلیدی در کلیه صنایع و زیرساخت‌ها ایفا می‌کند. جوشکاری حالت جامد، فرایندی است که عمل اتصال، زیر درجه حرارت ذوب فلز پایه شکل می‌گیرد [۱]. در نتیجه عمل اکسیداسیون رخ نخواهد داد و استفاده از گاز محافظ، محیط خنثی و مواد مصرفی ضرورتی ندارد. روش‌هایی مانند جوشکاری اصطکاکی، جوشکاری انفجاری، جوشکاری فراصوتی^۱ و جوشکاری نفوذی از فرایندهای حالت جامد محسوب می‌شوند. سه عامل مهم زمان، درجه حرارت و فشار، نوع اتصال جوشکاری را تعیین می‌کنند. با توجه به اینکه در این فرایندها ذوب صورت نمی‌گیرد، عیوب کمتری در مقایسه با روش‌های ذوبی در اتصال ایجاد می‌شود. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ در مؤسسه جوش انگلستان^۲ ابداع گردید [۲]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نوعی از فرایند جوشکاری حالت جامد است که اولین بار برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم استفاده شد. هدف اصلی، فرایند ایجاد اتصال بین موادی است که جوشکاری آنها با روش‌های ذوبی مشکل بوده یا امکان‌پذیر نمی‌باشد. در شکل ۱ شماتیکی از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و پارامترهای تأثیرگذار بر آن نشان داده شده است [۳].

جوشکاری اصطکاکی، اغتشاشی ترکیبی از تغییر شکل پلاستیک و سیلان شدید ماده در منطقه جوش است. الگوی سیلان ماده و توزیع دما در منطقه اتصال توسط پارامترهای جوشکاری تعیین می‌شوند و این پارامترها بر ریزساختار این ناحیه تأثیر مستقیم دارند [۴]. سرعت چرخش و پیش‌روی ابزار، زاویه انحراف ابزار، شکل و جنس ابزار از پارامترهای مؤثر در این روش هستند. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، به دلیل حضور تعداد زیادی پارامتر و تأثیر آنها بر مشخصه‌های خروجی، بسیار پیچیده می‌باشد.



شکل ۱. شماتیکی از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

^۱ ultrasonic

^۲ training within industry (TWI)

همچنین به دلیل وجود این مشکلات ارائه یک مدل فیزیکی- تحلیلی دقیق که با آن بتوان مشخصه‌های خروجی فرایند را پیش‌بینی و تأثیرات متغیرها را بررسی کرد، بسیار پیچیده می‌باشد [۵]. علاوه بر این، پیدا کردن شرایط دقیقی از فرایند که بتواند به میزان قابل قبولی از استحکام کششی، سختی و استحکام تسلیم برسد، بسیار پیچیده است. از این رو، بهترین راه‌حل برای ارائه مدل دقیق از خروجی‌های فرایند و بررسی تأثیرات پارامترها، مطالعات تجربی بر پایه اطلاعات به دست آمده از آزمایش می‌باشد. در این زمینه، پژوهشگران مطالعات گسترده‌ای انجام داده‌اند تا بتوانند تأثیر پارامترهایی مانند سرعت چرخش ابزار، سرعت خطی جوشکاری، نیروی محوری، نسبت قطر شانه به قطر پین، زاویه ابزار بر استحکام کششی، استحکام تسلیم کش آمدگی، سختی، عرض منطقه متأثر از حرارت را بررسی کنند [۶]. آنها توانستند براساس آزمایش‌ها، رابطه‌ای تجربی بین پارامترهای ورودی فرایند و مشخصه‌های خروجی آن برقرار کنند. همچنین توانستند با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی آماری و روش‌هایی مانند روش تاگوچی، جواب‌های بهینه‌ای پیدا کنند که فرایند، به عملکردی مطلوب دست یابد. جایا رامان و همکارانش آزمایش‌هایی را با استفاده از روش مرکب مرکزی انجام دادند و تأثیر سه فاکتور سرعت چرخشی ابزار، سرعت خطی جوشکاری و نیروی محوری جوش را بر استحکام کششی آلیاژ آلومینیوم A356 بررسی کردند [۷]. الانجوان و همکارانش تعداد ۳۰ آزمایش را براساس روش طراحی مرکب مرکزی انجام دادند و تأثیر فاکتورهایی مانند هندسه پین، سرعت چرخشی ابزار، سرعت خطی جوش و نیروی محوری را بر استحکام کششی نهایی آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹ بررسی کردند [۸]. راجا کومار و همکارانش آزمایش‌های گسترده‌ای را برای بررسی تأثیرات سرعت چرخشی ابزار، سرعت خطی جوش، نیروی محوری جوش، قطر پین، قطر شانه ابزار و سختی ابزار بر استحکام کششی، سختی و نرخ خوردگی قطعه کار با استفاده از روش پاسخ سطح انجام دادند [۹]. الاتناسان و سنتیل کومار با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی^۱ و تئوری تابع مطلوب به مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای غیرهمجنس AA6061-T6 و AA7075-T6 پرداختند [۱۰]. کولیراج و همکاران استحکام کششی و سختی در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم غیرهمجنس AA2219 و AA5083 را بررسی کردند [۱۱]. در این پژوهش نیز به بررسی و بهینه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای غیرهمجنس پرداخته شد. نوآوری اصلی این پژوهش امکان‌سنجی و ایجاد اتصال بین آلیاژهای آلومینیوم ۶۰۶۱ و ۵۰۱۰ است. سپس از روش طراحی مرکب مرکزی، استفاده گردید و برای ایجاد مدل دقیق از خواص مکانیکی و انتخاب پارامترهای بهینه، شبکه‌های عصبی مصنوعی با الگوریتم اجتماع ذرات^۲ ترکیب شد.

آزمایشات تجربی

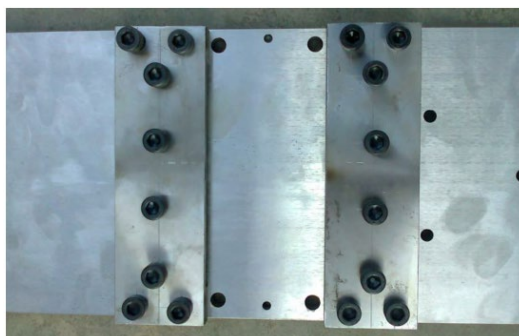
در این پژوهش به منظور عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از ماشین فرز عمودی مدل ۴۳۰۱ ساخت ماشین‌سازی تبریز با ماکزیمم دور ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و توان ۱۵ اسب بخار استفاده شد. این ماشین فرز، اسپیندلی با محور محرک گیربکسی دارد که می‌تواند سرعت چرخشی با محدوده وسیعی را تولید کند. اسپیندل دستگاه با یک کلمگی و ابزارگیر تجهیز شده است که می‌تواند ابزارها را با قطرهای مختلفی کلمپ کند. در شکل ۲ نمایی از دستگاه فرز مورد استفاده نشان داده شده است.

¹ central composite design

² particle swarm algorithm



شکل ۲. دستگاه فرز



شکل ۳. فیکسچر جوشکاری

برای گیربندی و موقعیت‌دهی صحیح قطعات از فیکسچر استفاده شده است. در حین انجام فرایند جوشکاری، نیروی زیادی به قطعات وارد که سبب جدا شدن دو قطعه از یکدیگر می‌شود. به همین دلیل برای ثابت نگه‌داشتن آنها از فیکسچر استفاده شده است. برای ثابت نگه داشتن عمق نفوذ در تمامی نقاط جوش، سطح فیکسچر با دستگاه سنگ پرداخت شده است. برای جلوگیری از انحراف ابزار از خط اتصال در دو انتهای صفحه فیکسچر، دو سوراخ به موازات محور افقی دستگاه تعبیه و خطی بین آنها ترسیم شده است و قطعه‌کارها به صورت لب‌به‌لب در راستای این خط قرار داده شده‌اند. به منظور نگهداری قطعات، دو عدد بلوک ماشین‌کاری و سوراخ‌کاری شده بر روی فیکسچر نصب شده‌اند. در شکل ۳ فیکسچر مورد استفاده برای انجام عملیات جوشکاری نشان داده شده است.

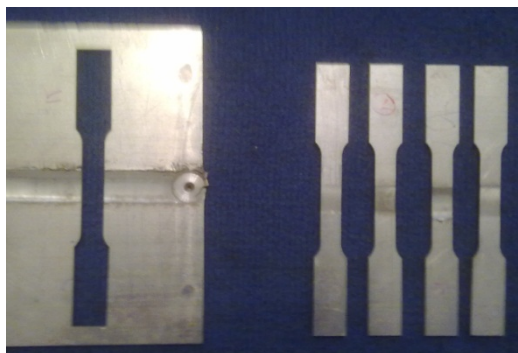
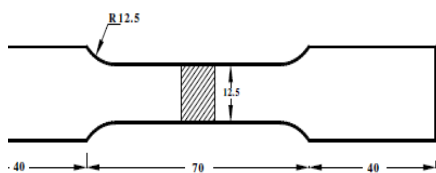
برای انجام فرایند جوشکاری، ورق‌ها در ابعاد $۱۵۰ \times ۱۰۰ \times ۳$ آماده شده‌اند و سطوح جانبی آنها به خوبی پرداخت شده است تا در حین انجام فرایند جوشکاری بر هم منطبق شوند. در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ورق‌ها به صورت لب‌به‌لب در کنار هم قرار می‌گیرد و ابزار با جارو کردن فصل مشترک آنها و انجام عمل اغتشاش، اتصال‌های لب‌به‌لب ایجاد می‌کند. در شکل ۴ نمونه‌های قبل و بعد از جوشکاری با ابزار مربعی نشان داده شده است. پس از انجام عملیات جوشکاری، به منظور بررسی و تعیین استحکام کششی و کش‌آمدگی، نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM با استفاده از دستگاه وایرکات بریده شده و تحت آزمون کشش قرار گرفتند. مشخصات هندسی نمونه‌ی استاندارد ASTM در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین شکل ۵ نمونه‌های بریده شده با استفاده از دستگاه وایرکات را نشان می‌دهد که با توجه به استاندارد تست کشش بریده شده‌اند. پس از انجام عملیات برش،

تمامی نمونه‌ها در دستگاه کشش سنتام^۱، ساخت کشور تایوان، با تناژ ۳۰ تن قرار گرفت و با سرعت خطی ۵ mm/min کشیده شدند.

به علت نیروی بسیار کم در آزمایش میکروسختی‌سنجی و کوچک بودن اثر آن بر روی سطح جوش، سطح نمونه‌ها باید قبل از انجام آزمایش به خوبی صیقل شوند. برای انجام این کار، نمونه‌ها توسط ورق‌های سنباده کاربیدی تا سری ۱۵۰۰، سنباده‌زده شده‌اند. میکروسختی‌سنج مورد استفاده براساس نیروی ۱۰۰ گرم و مدت زمان ۱۵ ثانیه تنظیم شده است. در این دستگاه پس از اعمال نیرو، دو قطر هرم ایجاد شده، توسط میکروسکوپ اندازه‌گیری شده‌اند. مقدار متوسط به نرم‌افزار دستگاه، وارد و مقدار سختی براساس معیار ویکرز محاسبه می‌شود. دستگاه میکروسختی‌سنج ویکرز مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴. نمونه‌های قبل و بعد از انجام عملیات جوشکاری با ابزار مربعی

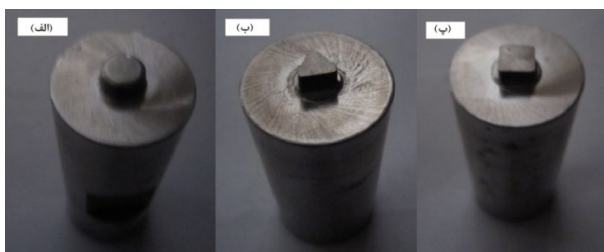


شکل ۵. نمونه‌های استاندارد و برش‌خورده برای آزمون کشش

¹ Santam



شکل ۶. دستگاه میکروسختی سنج



شکل ۷. تصاویر ابزارهای استفاده شده با هندسه پین‌های مختلف در آزمایش‌های مرحله اول (الف) پین

استوانه‌ای ساده (ب) پین مثلثی (پ) پین مربعی

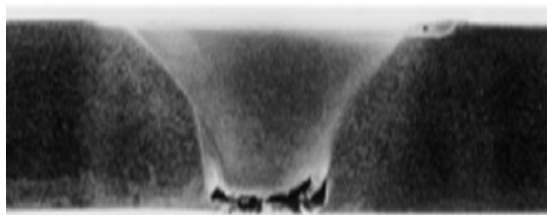
در این پژوهش از ابزار با قطر بدنه ۲۰ میلی‌متر استفاده شده و ابعاد پین نیز براساس نوع هندسه آن متغیر بوده است. پین‌ها در عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی عمل اغتشاش مواد را انجام می‌دهند و شکل پین‌ها در میزان اغتشاش تأثیرگذار می‌باشد. پروفیل پین می‌تواند دایره‌ای، مربعی، شش وجهی و هشت وجهی باشد. در شکل ۷ انواع مختلف شکل پین نشان داده شده است.

برای مطالعه ماکروساختار و میکروساختار نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ورق‌ها در جهت عمود بر راستای جوش بریده و مانت شده است. نمونه‌های مانت شده در ابتدا توسط ورق‌های سنباده کاربیدی تا سری ۵۰۰۰ سنباده زده شده و سپس به وسیله پودر Al_2O_3 پولیش شده‌اند. برای بررسی نحوه پراکندگی ذرات فولاد در ناحیه اغتشاش و همچنین دیدن عیوبی همچون حفره و ترک از میکروسکوپ نوری استفاده شده است. همچنین با استفاده از این دستگاه می‌توان اندازه دانه‌ها را در منطقه جوش مشاهده نمود. در شکل ۸ نمونه‌های مانت شده نمایش داده شده‌اند.

باید در نظر داشت که برخی شرایط، به خصوص هنگام تولید حرارت کم در سرعت‌های دورانی کمتر و توزیع نامناسب مواد در منطقه اتصال، باعث ایجاد عیوب بزرگ‌تر در منطقه اغتشاش می‌شود. این عیوب در سرعت‌های خطی کم بر اثر نیروی ناکافی فورج به وجود می‌آیند. دلیل اصلی ایجاد این عیوب ورود کم مواد خمیری از جلوی ابزار به منطقه اغتشاش می‌باشد. تولید حرارت زیاد و چرخش بیش از اندازه ابزار، سبب اغتشاش و جریان ناآرام مواد در منطقه جوشکاری خواهد شد. این پدیده به واسطه ورود گرمای بیش از اندازه به محل جوشکاری سبب نرمی زیاد قطعه‌کارها و جریان متلاطم می‌شود که نتیجه آن شکل‌گیری عیب کانالی یا سوراخ پین است [۱۲].



شکل ۸. نمونه‌های مانت‌شده



شکل ۹. شکل‌گیری عیب ریشه جوش در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی



شکل ۱۰. شکل‌گیری عیب لوله‌ای در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

ابعاد منطقه اتصال یکی دیگر از پارامترهایی است که به‌طور مستقیم متأثر از جریان مواد است. نتایج حاصل، نشان می‌دهند که جریان مواد خمیری در پشت ابزار بیشتر از جلوی آن است. علت این مسئله، کشیدگی و فورج مواد از سمت جلو به عقب ابزار است. از طرف دیگر، چون مواد در پشت ابزار اغتشاش یافته‌اند و هنوز به حالت جامد در نیامده‌اند، فورج مواد خمیری از جلو به ناحیه پشت ابزار، سبب بیشتر شدن تغییرات در پشت ابزار خواهد شد. با افزایش سرعت دورانی ابزار، گرمای ورودی به محل اتصال افزایش می‌یابد. این پدیده باعث می‌شود تا این حرارت بیشتر به مناطق جلویی نفوذ کند و گستره بیشتری از جلوی ابزار به حالت خمیری برسد. در این شرایط، موادی که به حالت پلاستیکی درآمده‌اند، بیشتر در معرض نیروی فورج و اغتشاش قرار خواهند گرفت و این مسئله باعث بزرگ‌تر شدن منطقه اغتشاش و خط اتصال می‌شود. در این وضعیت احتمال تشکیل عیوب داخلی اتصال بالا می‌رود. دو نمونه از رایج‌ترین عیوب ایجاد شده در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایش داده شده‌اند [۱۲].

بحث و تحلیل نتایج

در قسمت اول این پژوهش نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مرحله اول با هدف طراحی بهینه هندسه پین ابزار بررسی شده است. پس از انتخاب هندسه بهینه پین ابزار، در قسمت دوم نتایج مرحله دوم آزمایش‌ها بررسی شده است. در این قسمت با توجه به روش طراحی آزمایش‌های مرکب مرکزی و با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۱، اثرات پارامترهای نامبرده بر استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی منطقه جوش، تحلیل تجربی و بررسی خواهد شد. در این قسمت تأثیر پارامترها به صورت مستقل و متقابل تحلیل شده است. در ادامه، مدل‌سازی استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی بررسی می‌شود و سپس دقت و صحت مدل‌ها با استفاده از انجام آزمایش‌های مجدد تأیید خواهد شد. در انتها استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی توسط الگوریتم اجتماع ذرات بهینه‌سازی هم‌زمان انجام شده است.

به منظور انتخاب ابزار بهینه، به وسیله سه ابزار با هندسه پین‌های مربعی، دایره‌ای و مثلثی تحت سه شرایط مختلف از انرژی اصطکاکی، ۹ آزمایش انجام شد. این شرایط انرژی اصطکاکی شامل اصطکاک کم، اصطکاک متوسط و اصطکاک زیاد می‌باشد. در اینجا منظور از شرایط مختلف انرژی اصطکاکی، شرایطی است که در آن اصطکاک ایجاد شده کم، متوسط و زیاد است. شرایط اصطکاک کم به معنی آن است که سرعت چرخشی ابزار کم، سرعت پیش‌روی زیاد و عمق غوطه‌وری شانه ابزار بر ورق‌ها نیز کم می‌باشد. شرایط انرژی اصطکاکی متوسط شرایطی است که در آن سرعت چرخشی ابزار متوسط، سرعت پیش‌روی متوسط و عمق غوطه‌وری شانه ابزار بر ورق‌ها نیز متوسط باشد. در نهایت شرایط انرژی اصطکاکی زیاد شرایطی است که در آن سرعت چرخشی ابزار زیاد، سرعت پیش‌روی ابزار کم و عمق غوطه‌وری شانه ابزار بر ورق‌ها زیاد باشد. نتایج به دست آمده از آزمون مراحل اول تا سوم در جدول ۱ نمایش داده شده است. همان‌گونه که از جدول ۱ نتیجه‌گیری می‌شود، پین با هندسه مربعی سبب رسیدن به بیشترین مقدار استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی تحت تمامی شرایط اصطکاکی را خواهد شد. به عبارت دیگر، بدون در نظر گرفتن شرایط فرایندی (شرایط مختلفی از سرعت چرخشی ابزار، سرعت خطی جوش و عمق شناوری شانه ابزار) می‌توان ادعا کرد که پین با هندسه مربعی سبب رسیدن به بیشترین استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی خواهد شد.

جدول ۱. اثرات هندسه پین تحت شرایط مختلف انرژی بر استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی

شماره	هندسه پین	شرایط انرژی اصطکاکی	استحکام کششی (مگاپاسکال)	سختی (ویکرز)	درصد ازدیاد طول
۱	استوانه‌ای	کم	۱۳۲	۵۷	۶.۴
۲	استوانه‌ای	متوسط	۱۷۳	۹۵	۸.۹
۳	استوانه‌ای	زیاد	۱۵۱	۷۵	۱۲.۱
۴	مثلثی	کم	۱۳۵	۷۲	۸.۶
۵	مثلثی	متوسط	۱۷۵	۱۰۶	۱۴.۱
۶	مثلثی	زیاد	۱۵۷	۸۸	۱۷.۲
۷	مربعی	کم	۱۵۶	۸۴	۱۵.۳
۸	مربعی	متوسط	۱۹۷	۱۲۹	۱۹.۵
۹	مربعی	زیاد	۱۷۶	۱۰۵	۲۴

¹ Design expert

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، نسبت بین حجم ساکن مواد و حجم مواد در حال چرخش (زمان انجام فرایند) می‌تواند در تعیین مسیر جریان پلاستیک مؤثر باشد. این نسبت برای پین دایره‌ای برابر ۱، پین مثلثی برابر ۱/۵۶ و پین مربعی برابر ۲/۳ می‌باشد. بنابراین، جریان مواد در پین‌های مثلثی و مربعی به مراتب بهتر صورت می‌گیرد. همچنین پین‌های مربعی و مثلثی سبب به‌وجود آمدن یک جریان اغتشاشی پالی می‌شوند که سبب به‌هم‌خوردن بهتر مواد در منطقه‌ی جوش می‌شود. علاوه‌بر این، به دلیل خارج از مرکز بودن حلقه‌های جریان به‌وجود آمده ناشی از هم‌زدن پین‌های مثلثی و مربعی، اکسیدهای فلزی که در ورق‌ها تشکیل شده، از بین می‌رود و سبب بهبود مقاومت کششی و سختی می‌شود. وجود ظاهر چند وجهی در پین‌های مثلثی و مربعی سبب نرم‌تر شدن بهتر مواد می‌شود و توانایی انجام تغییر شکل پلاستیک را راحت‌تر می‌کند. از این‌رو، بدیهی است که در پین‌های مربعی کش‌آمدگی بهتر صورت می‌گیرد. پس از به‌دست‌آوردن حالت بهینه هندسه پین ابزار، پین مربعی به‌عنوان پین بهینه در تمامی مراحل بعدی استفاده شده است. نرم‌افزار دیزاین اکسپرت برای بررسی تأثیرات متغیرهای یک فرایند بر یک پاسخ مشخص، ابتدا مدل‌های تجربی با دقت بالایی از آن پاسخ را به‌صورت توابع ضمنی چندجمله‌ای استخراج می‌کند و سپس مرحله‌به‌مرحله به بررسی اثرات متغیرها می‌پردازد. در این قسمت برای بررسی تأثیرات متغیرها، بازبینی‌های تجربی مرحله‌به‌مرحله با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت انجام شده است.

جدول ۲. نتیجه‌گیری مرحله دوم آزمایش‌ها برای بررسی تأثیرات متغیرهای فرایند

شماره	فاکتورهای فرایند		پاسخ‌ها		
	سرعت دورانی ابزار (RPM)	سرعت پیش‌روی ابزار (mm/min)	عمق نفوذ (mm)	استحکام کششی (MPa)	سختی (HV)
۱	۶۰۰	۴۰	۰.۱	۱۳۶	۶۱
۲	۱۰۰۰	۴۰	۰.۱	۱۴۵	۷۰
۳	۶۰۰	۸۰	۰.۱	۱۵۶	۸۱
۴	۱۰۰۰	۸۰	۰.۱	۱۵۲	۷۵
۵	۶۰۰	۴۰	۰.۱	۱۶۲	۸۵
۶	۱۰۰۰	۴۰	۰.۱	۱۵۱	۷۴
۷	۶۰۰	۸۰	۰.۳	۱۶۳	۸۶
۸	۱۰۰۰	۸۰	۰.۳	۱۵۵	۷۸
۹	۴۶۰	۶۰	۰.۲	۱۶۳	۸۷
۱۰	۱۱۴۰	۶۰	۰.۲	۱۴۰	۶۴
۱۱	۸۰۰	۲۴	۰.۲	۱۶۲	۸۶
۱۲	۸۰۰	۹۷	۰.۲	۱۵۳	۷۷
۱۳	۸۰۰	۶۰	۰.۳	۱۷۱	۹۵
۱۴	۸۰۰	۶۰	۰.۳۷	۱۶۵	۸۹
۱۵	۸۰۰	۶۰	۰.۲	۱۷۸	۱۰۳
۱۶	۸۰۰	۶۰	۰.۲	۱۹۲	۱۱۷
۱۷	۸۰۰	۶۰	۰.۲	۱۸۹	۱۱۴
۱۸	۸۰۰	۶۰	۰.۲	۱۹۰	۱۱۵
۱۹	۸۰۰	۶۰	۰.۲	۱۸۸	۱۱۷
۲۰	۸۰۰	۶۰	۰.۲	۱۹۴	۱۱۶

برای بررسی تجربی استحکام کششی و تأثیرات پارامترها بر آن، داده‌های موجود در جدول ۲ به نرم‌افزار دیزاین اکسپرت وارد شد و با معادله تجربی به‌دست‌آمده، دقت و صحت آن و همچنین تأثیرات متغیرها بر آن، مرحله‌به‌مرحله بررسی شد. نتیجه معادله چندجمله‌ای شماره ۱، مدل تجربی برای ارائه رابطه بین متغیرهای فرایند و استحکام کششی می‌باشد که از تحلیل در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت به‌دست آمده است.

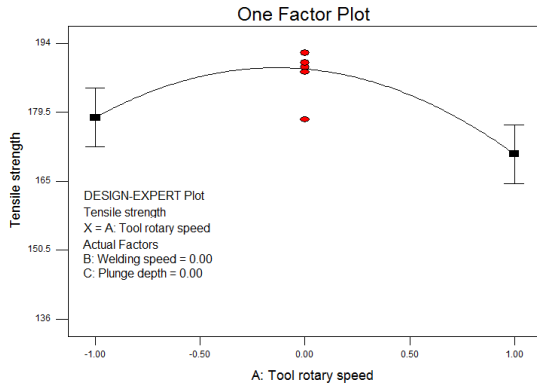
$$TS = 188.65 - 3.86N + 1.23f + 2.34d - 14.08N^2 - 11.95f^2 - 8.24d^2 - 1.25Nf - 3Nd - 2.75fd \quad (1)$$

در رابطه ۱، TS استحکام کششی، N سرعت چرخش ابزار، f سرعت پیش‌روی جوش و d عمق شناوری شانه ابزار می‌باشد. برای بررسی صحت این مدل، آنالیز واریانس مربوط به استحکام کششی در جدول ۳ نشان داده شده است.

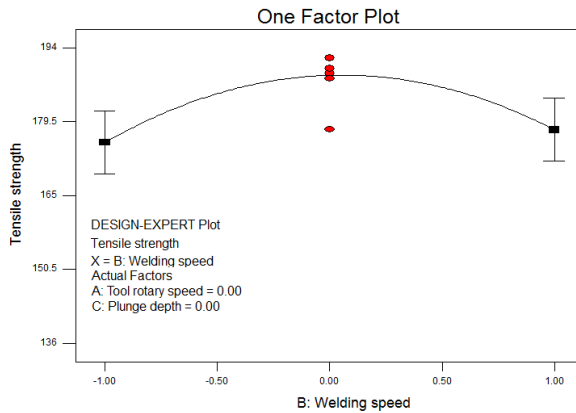
در جدول ۳ دیده می‌شود که مقدار $Prob>F$ برای این مدل حدود ۰.۰۰۰۹ می‌باشد. این مقدار بدین معنی است که این مدل اهمیت قابل‌ملاحظه‌ای در پیش‌بینی استحکام کششی دارد. همچنین مقادیر $Lack of Fit$ ۰.۱۱۲۸ نشان می‌دهد احتمال آنکه این داده‌ها به‌صورت اتفاقی جمع‌آوری شده باشند کم می‌باشد. بنابراین، مدل مرتبط صحت و دقت کافی را در پیش‌بینی استحکام کششی خواهد داشت. از این‌رو، می‌توان این مدل تجربی را برای تحلیل تأثیرات پارامترهای فرایند بر استحکام کششی استفاده کرد. نمودار تأثیرات پارامترهای فرایند بر استحکام کششی در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نشان داده شده است. این شکل‌ها با استفاده از نتایج مدل تجربی نرم‌افزار دیزاین اکسپرت به‌دست آمده‌اند.

جدول ۳. آنالیز واریانس مربوط به مدل‌سازی تجربی استحکام کششی

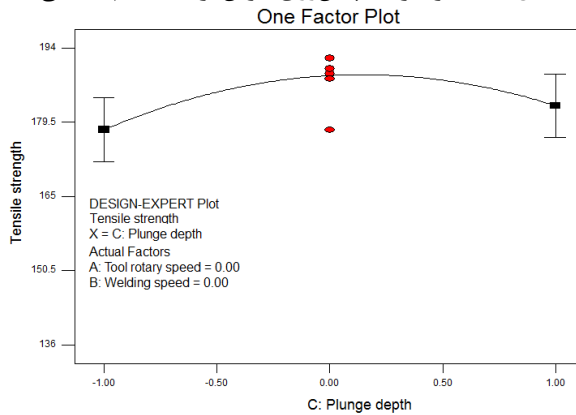
منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	Prob>F
مدل	۵۴۲۹.۹۸	۹	۶۰۳.۳۳	۹.۱	۰.۰۰۰۹
N	۲۰۳.۲۲	۱	۲۰۳.۲۲	۳.۲	۰.۱۰۸۸
F	۲۰.۸۲	۱	۲۰.۸۲	۰.۳۱	۰.۵۵۵۸
D	۷۴.۵۶	۱	۷۴.۵۶	۱.۱۴	۰.۳۱۱۴
N^2	۲۸۵۵.۱۶	۱	۲۸۵۵.۱۶	۴۳.۵۴	۰.۰۰۰۱
f^2	۲۰۵۹.۴۱	۱	۲۰۵۹.۴۱	۳۱.۴	۰.۰۰۰۲
d^2	۹۷۸.۹۴	۱	۹۷۸.۹۴	۱۴.۹۳	۰.۰۰۳۱
Nf	۱۲.۵	۱	۱۲.۵	۰.۱۹	۰.۶۷۱۷
Nd	۷۲	۱	۷۲	۱.۱	۰.۳۱۹۴
Fd	۶۰.۵	۱	۶۰.۵	۰.۹۲	۰.۳۵۹۴
Residual	۶۵۵.۷۷	۱۰	۶۵.۵۷	-	-
Lack of fit	۵۰۰.۲۷	۵	۱۰۰.۰۵	۳.۲۲	۰.۱۱۲۸
Pure error	۱۵۵.۵	۵	۳۱.۱	-	-



شکل ۱۱. تأثیر سرعت چرخش ابزار بر استحکام کششی

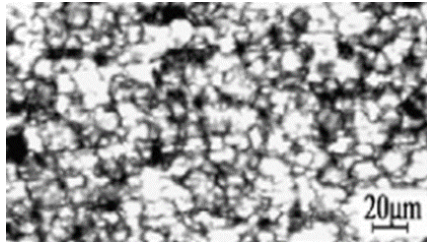


شکل ۱۲. تأثیر سرعت پیش‌روی جوش بر استحکام کششی

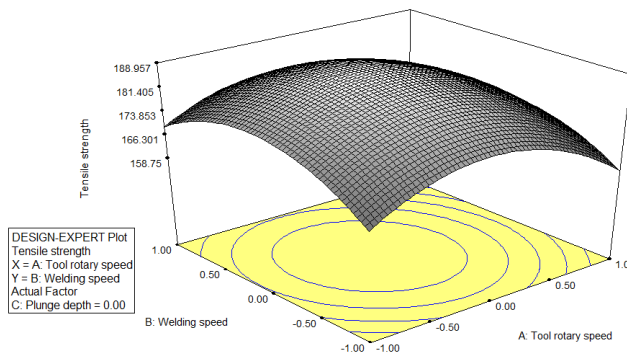


شکل ۱۳. تأثیر عمق غوطه‌وری بر استحکام کششی

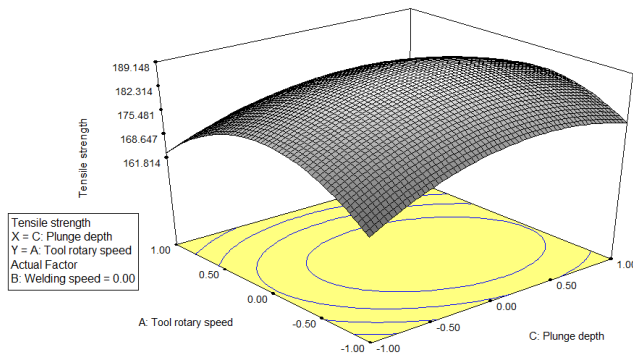
همان گونه که از شکل ۱۱ نتیجه گیری می شود با افزایش سرعت چرخش ابزار مقدار استحکام کششی به تدریج افزایش می یابد و در نقطه ای که سرعت چرخشی ابزار به مقدار ۸۰۰ دور بر دقیقه می رسد، مقدار استحکام کششی به نقطه ماکزیمم خود می رسد. همچنین در این شکل مشاهده می شود که با افزایش بیشتر سرعت چرخشی ابزار، استحکام کششی رفته رفته کاهش پیدا می کند. در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، خواص استحکامی جوش مانند استحکام برشی، استحکام کششی و محل شکست جوش هنگام تست کشش تا حد زیادی به سرعت چرخشی ابزار وابسته می باشد. سرعت چرخشی ابزار، نقش تولید گرما را دارد و در ایجاد حالت پلاستیک و به هم زدن و اغتشاش جوش بسیار مؤثر می باشد. در این فرایند هنگامی که سرعت چرخشی ابزار کمتر از ۸۰۰ دور بر دقیقه باشد، به دلیل تولید نشدن گرمای مناسب در منطقه جوش، عیوبی مانند سوراخ پین شکل و ترک در منطقه جوش مشاهده می شود. بنابراین، عیوب می تواند سبب پایین آمدن استحکام کششی گردد. از طرف دیگر، هنگامی که سرعت چرخشی ابزار از ۸۰۰ دور بر دقیقه بیشتر می شود، به دلیل توسعه زیاد حرارت در منطقه جوش، سبب تغییر ساختارهای متالورژیکی شده و عیوبی مانند تونل را در منطقه جوش ایجاد می کند. همچنین این توسعه زیاد گرما رفته رفته سبب رشد دانه ها در منطقه جوش می شود و استحکام کششی را تحت تأثیر قرار می دهد. علاوه بر این، افزایش سرعت چرخش ابزار باعث افزایش توربولانس می شود و رفتار منظم جریان پلاستیک را بهم می زند. این پدیده نیز سبب تحت تأثیر قرار گرفتن استحکام کششی می شود. همان گونه که توضیح داده شد و در شکل ها دیده می شود، انتخاب سرعت چرخشی ابزار ۸۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیش روی ۶۰ میلی متر بر دقیقه و عمق شناوری ۰.۲ میلی متر، سبب رسیدن به بیشترین استحکام کششی می شود. در شکل ۱۴ تصویر متالوگرافی از محدوده جوش مربوط به این پارامترها نشان داده شده است.



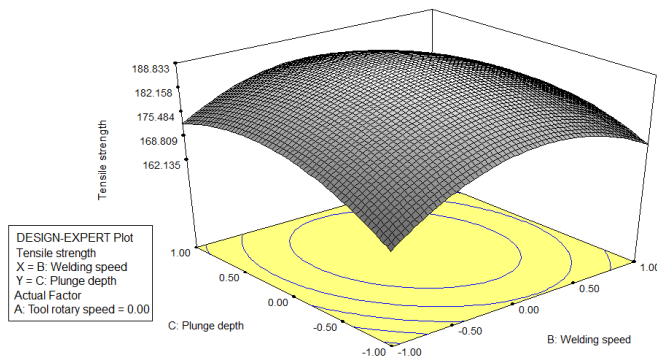
شکل ۱۴. تصویر میکروسکوب نوری از مقطع عرضی



شکل ۱۵. نمودار سه بعدی اثرات متقابل سرعت چرخش ابزار و سرعت پیش روی بر استحکام کششی



شکل ۱۶. نمودار سه بعدی اثرات متقابل سرعت چرخش ابزار و عمق شناوری شانه ابزار بر استحکام کششی



شکل ۱۷. نمودار سه بعدی اثرات متقابل سرعت پیشروی جوش و عمق شناوری شانه ابزار بر استحکام کششی

معادله چند جمله‌ای به‌دست‌آمده شماره ۲، مدل تجربی جهت ارائه رابطه بین متغیرهای فرایند و سختی می‌باشد که نتیجه تحلیل نرم افزار دیزاین اکسپرت است.

$$HV = 113.82 - 4N + 1.09f + 1.9d - 14.53N^2 - 12.4f^2 - 8.69d^2 - 1.5Nf - 2.75Nd - 2.5fd \quad (2)$$

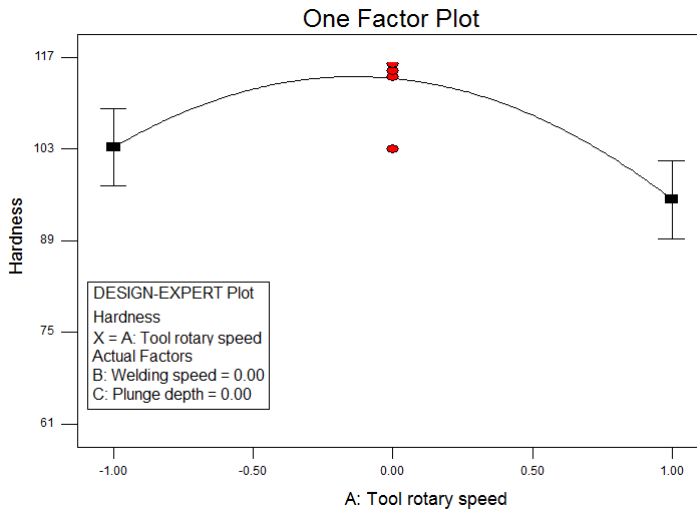
در رابطه ۲، HV استحکام سختی ویکرز، N سرعت چرخش ابزار، f سرعت پیشروی جوش و d عمق شناوری شانه ابزار می‌باشد. برای بررسی صحت این مدل، آنالیز واریانس مربوط به سختی در جدول ۴ نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۴ که از تحلیل در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت به‌دست آمده است، دیده می‌شود که برای مدل مرتبط، مقدار $Prob > F$ کمتر از ۰.۰۵ (برابر با ۰.۰۰۵) می‌باشد که بدان معنی است این مدل در پیش‌بینی سختی بااهمیت است. همچنین مقدار $Lack\ of\ fit$ در جدول ۴ برابر ۰.۱۱۲۴ است که نشان می‌دهد احتمال اینکه داده‌ها به‌طور اتفاقی جمع‌آوری شده باشند کم است. بنابراین، مدل تجربی به‌دست‌آمده از سختی، صحت و دقت کافی را

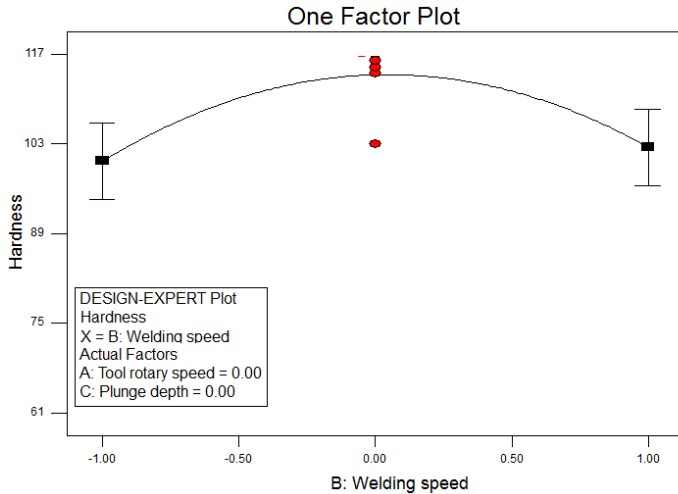
در پیش‌بینی سختی خواهد داشت. از این رو، می‌توان این مدل را برای تحلیل اثرات متغیرهای فرایند بر سختی استفاده نمود. شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ نمودارهای سه بعدی اثرات متغیرهای فرایند را بر سختی منطقه جوش نشان می‌دهند. این نمودارها نیز با توجه به تأثیرات متقابل فاکتورها ترسیم شده‌اند.

جدول ۴. آنالیز واریانس مربوط به مدل‌سازی تجربی سختی

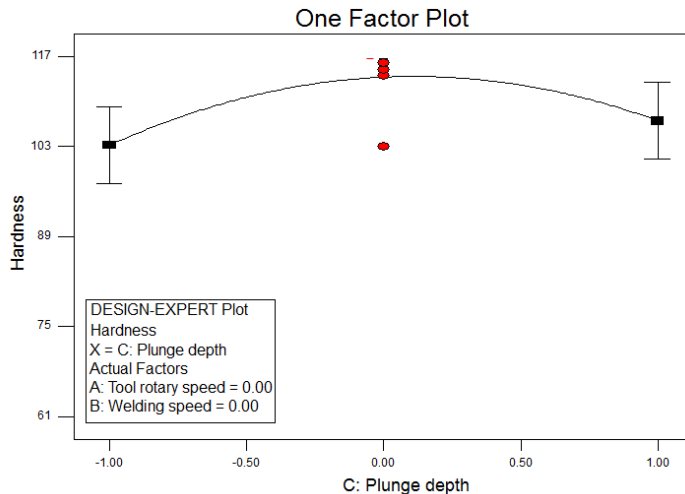
منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	Prob>F
مدل	۵۷۷۷.۵۸	۹	۶۴۱.۹۵	۱۰.۶	۰.۰۰۰۵
N	۲۱۸.۹۴	۱	۲۱۸.۹۴	۳.۶۲	۰.۰۸۶۴
F	۱۶.۱۸	۱	۱۶.۱۸	۰.۲۷	۰.۶۱۶۴
D	۴۹.۱۵	۱	۴۹.۱۵	۰.۸۱	۰.۳۸۸۷
N^2	۳۰۴۰.۷۷	۱	۳۰۴۰.۷۷	۵۰.۲۳	۰.۰۰۰۱
f^2	۲۲۱۷.۴۹	۱	۲۲۱۷.۴۹	۳۶.۶۳	۰.۰۰۰۱
d^2	۱۰۸۸.۸۳	۱	۱۰۸۸.۸۳	۱۷.۹۸	۰.۰۰۱۷
Nf	۱۸	۱	۱۸	۰.۳	۰.۵۹۷۵
Nd	۶۰.۵	۱	۶۰.۵	۱.۰	۰.۳۴۱۱
Fd	۵۰	۱	۵۰	۰.۸۳	۰.۳۸۴۸
Residual	۶۰۵.۴۲	۱۰	۶۰.۵	-	-
Lack of fit	۴۶۲.۰۹	۵	۹۲.۴۲	۳.۲۲	۰.۱۱۲۴
Pure error	۱۴۳.۳	۵	۲۱.۱	-	-



شکل ۱۸. تأثیر سرعت چرخش ابزار بر سختی منطقه جوش



شکل ۱۹. تأثیر سرعت پیش‌روی بر سختی منطقه جوش



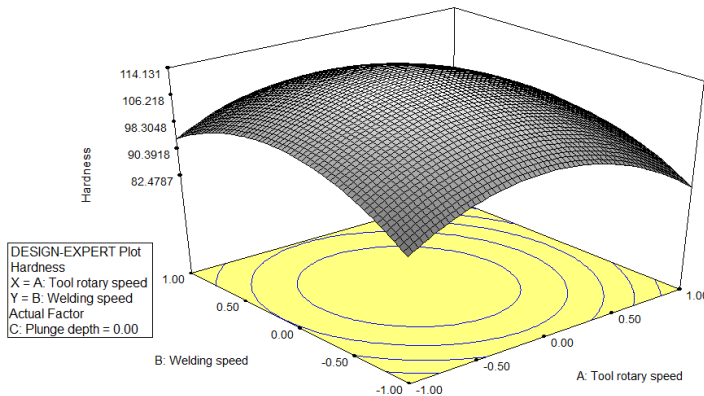
شکل ۲۰. تأثیر عمق شناوری بر سختی منطقه جوش

اثر سرعت چرخشی ابزار بر سختی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، سختی منطقه جوش داده‌شده از سختی فلزات پایه بیشتر می‌باشد. این پدیده دو دلیل دارد: اولین دلیل آن است که در این فرایند، اندازه دانه‌ها در منطقه جوش، به مراتب کوچک‌تر از اندازه دانه‌های فلزات پایه می‌باشد. بنابر رابطه هال-پچ، اندازه دانه‌ها با سختی، رابطه عکس دارد؛ یعنی هرچه اندازه دانه‌ها کوچک‌تر باشد، سختی بیشتر خواهد شد. دلیل دیگری که سبب افزایش سختی در منطقه جوش داده‌شده می‌شود، این است که در اثر حرارت زیاد ایجاد شده در این فرایند ساختارهایی بین فلزی ایجاد می‌شود که در سختی منطقه جوش بسیار تأثیرگذار می‌باشد و سبب افزایش آن می‌گردد. در این فرایند (این پژوهش) هنگامی که سرعت کم می‌باشد (کمتر از ۸۰۰ دور بر دقیقه) گرمای موضعی و غیریکنواخت در اثر اصطکاک کمتر ایجاد می‌شود. به همین دلیل، مواد به خوبی

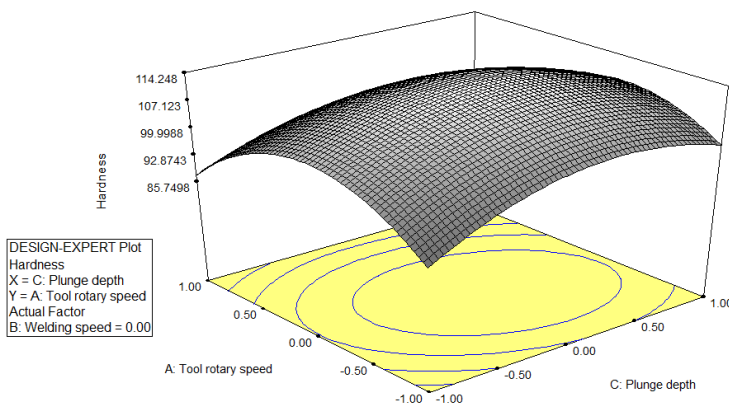
هم نخوردند و سختی پایین می‌باشد. هنگامی که سرعت رفته‌رفته افزایش پیدا می‌کند، گرمای ایجاد شده به مراتب بالاتر می‌رود و این گرما سبب بهبود اغتشاش می‌شود و مواد در حالت ویسکوپلاستیک بهتر هم زده می‌شوند. این گرما و اغتشاش مناسب، سبب ایجاد یک سری ترکیبات بین فلزی می‌شود و سختی منطقه جوش را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، در سرعت چرخشی مناسب (۸۰۰ دور بر دقیقه) به دلیل انجام کار مکانیکی مناسب دانه‌ها ریز می‌شوند و افزایش سختی را در بر خواهد داشت. از طرف دیگر هنگامی که سرعت چرخشی ابزار از ۸۰۰ دور بر دقیقه بیشتر می‌شود مقدار سختی رفته‌رفته کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت چرخشی ابزار، به دلیل افزایش اصطکاک بین ابزار و ورق‌ها، گرمای زیادی ایجاد می‌شود و این حرارت سبب رشد دانه‌ها می‌گردد. همچنین این گرما سبب کاهش دانسیته ناهنجاری‌ها در منطقه جوش می‌شود و سبب کاهش سختی خواهد شد.

تأثیرات سرعت خطی جوش بر سختی در شکل ۱۹ نشان داده شده است. حین فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، سرعت چرخشی ابزار و سرعت پیش‌روی جوش، عکس یکدیگر عمل می‌کنند؛ یعنی هرچه سرعت پیش‌روی جوش کمتر باشد یا سرعت چرخشی ابزار بیشتر باشد، گرمای تولید شده بیشتر خواهد بود و برعکس. با توجه به شکل مربوطه و بدون در نظر گرفتن سرعت، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش سرعت پیش‌روی جوش مقدار سختی افزایش پیدا می‌کند و در ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. دلیل این پدیده را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با افزایش سرعت پیش‌روی، رفته‌رفته حرارت ایجاد شده در منطقه جوش کاهش می‌یابد و کاهش این گرما از رشد دانه‌ها جلوگیری خواهد کرد و سبب ریزتر شدن آن می‌گردد که افزایش سختی را در بر خواهد داشت. اما هنگامی که سرعت پیش‌روی از ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه بیشتر شود، به دلیل کاهش کار مکانیکی ناهنجاری‌ها به‌طور مناسب تشکیل نخواهد شد و سبب کاهش سختی می‌شود. همچنین به دلیل کاهش بیش از حد گرما (در سرعت‌های پیش‌روی بالا) ترکیبات بین فلزی ایجاد نمی‌شود و سبب کاهش سختی خواهد شد.

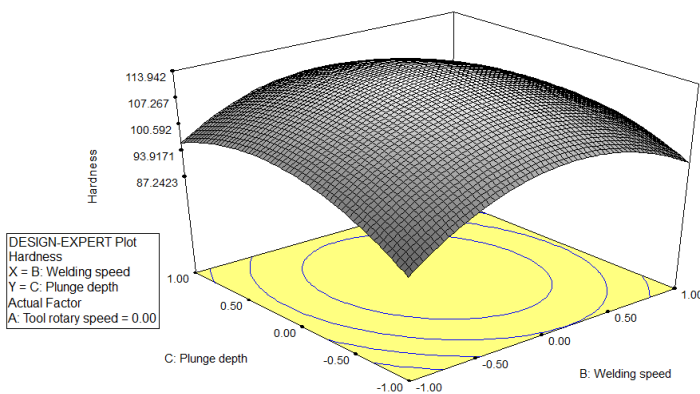
تأثیر عمق شناوری بر سختی در شکل ۲۰ نشان داده شده است. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، عمق شناوری را می‌توان با نیروی محوری جوش و اصطکاک تولید شده هم‌ارز دانست. هرچه عمق شناوری بیشتر شود، مقدار نیروی محوری افزایش می‌یابد، اصطکاک بین ورق‌ها و ابزار بیشتر می‌شود و همچنین مقدار کار مکانیکی انجام شده نیز افزایش خواهد یافت. در این شکل، با افزایش عمق شناوری شانه ابزار بر ورق‌ها، مقدار سختی رفته‌رفته بیشتر می‌شود و هنگامی که این مقدار به ۰/۲ میلی‌متر برسد، مقدار سختی به بالاترین حد خود خواهد رسید و پس از آن با افزایش بیشتر مقدار عمق شناوری، مقدار سختی کم‌کم کاهش پیدا می‌کند. با افزایش عمق شناوری تا ۲ میلی‌متر، مقدار نیروی محوری افزایش پیدا می‌کند و سبب افزایش کار مکانیکی می‌شود. این افزایش در کار مکانیکی سبب ریزتر شدن دانه‌ها و افزایش چگالی ناهنجاری‌ها در منطقه جوش خواهد شد. از این‌رو، سختی منطقه جوش افزایش می‌یابد. هنگامی که عمق شناوری از مقدار ۰/۲ میلی‌متر بیشتر شود، اگرچه نیروی محوری و کار مکانیکی افزایش پیدا می‌کند ولی حرارت زیادی ناشی از اصطکاک بین ابزار و ورق‌ها ایجاد خواهد شد و این حرارت زیاد سبب رشد دانه‌ها و کاهش چگالی ناهنجاری می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش بیش از حد عمق شناوری (بیشتر از ۰/۲ میلی‌متر) مقدار سختی منطقه جوش رفته‌رفته کاهش می‌یابد.



شکل ۲۱. نمودار سه بعدی تأثیرات متقابل سرعت چرخش ابزار و سرعت پیشروی بر سختی



شکل ۲۲. نمودار سه بعدی تأثیرات متقابل سرعت چرخش ابزار و عمق شناوری بر سختی



شکل ۲۳. نمودار سه بعدی تأثیرات متقابل سرعت پیشروی جوش و عمق شناوری بر سختی

با توجه به شکل‌های ۲۱ تا ۲۳ می‌توان نتیجه گرفت که برای رسیدن به بیشترین مقدار سختی، باید پارامترهای فرایند در مقادیر میانی خود قرار گیرند. به عبارت دیگر، هنگامی می‌توان بیشترین سختی را به دست آورد که سرعت چرخشی ابزار ۸۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیش‌روی ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق شناوری ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه باشد.

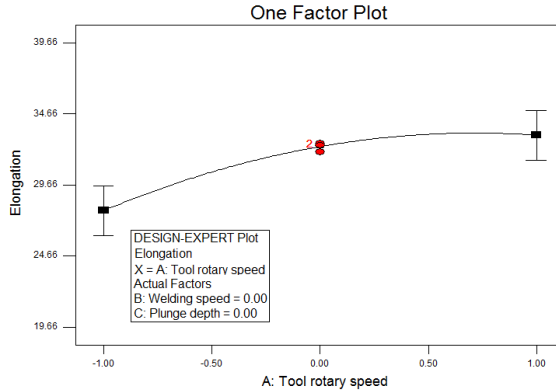
برای بررسی تجربی کش‌آمدگی و تأثیرات پارامترها بر آن، داده‌های موجود در جدول ۲ به نرم‌افزار دیزاین اکسپرت داده خواهد شد و معادله تجربی به دست می‌آید، دقت و صحت آن و همچنین تأثیرات متغیرها بر آن مرحله به مرحله بررسی شد. معادله چندجمله‌ای به دست آمده شماره ۳، مدل تجربی برای ارائه رابطه بین متغیرهای فرایند و کش‌آمدگی می‌باشد که نتیجه تحلیل نرم‌افزار دیزاین اکسپرت است.

$$El = 32.37 + 2.65N - 3.58f + 5.02d - 1.85N^2 - 0.42f^2 - 1.25d^2 - 0.32Nf + 0.11Nd + 1.06fd \quad (3)$$

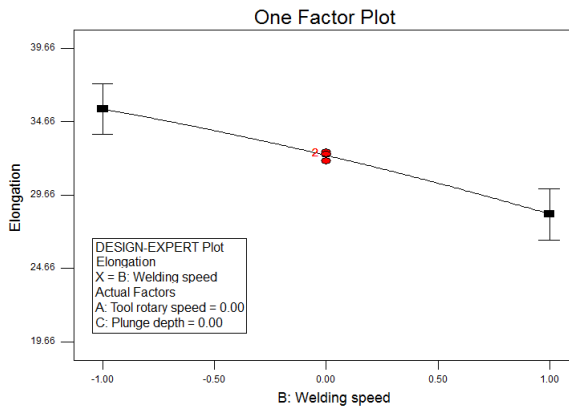
در رابطه ۳، El کش‌آمدگی، N سرعت چرخش ابزار، f سرعت پیش‌روی جوش و d عمق شناوری شانه ابزار می‌باشد. برای بررسی صحت این مدل، آنالیز واریانس مربوط به کش‌آمدگی در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۵ که از تحلیل در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت به دست آمده است، دیده می‌شود که برای مدل مرتبط مقدار $Prob > F$ کمتر از ۰.۰۵ می‌باشد که بدان معنی است این مدل در پیش‌بینی سختی با اهمیت است. همچنین مقدار $Lack of Fit$ در این جدول برابر ۰.۳۳۴۶ است که نشان می‌دهد داده‌ها به صورت اتفاقی جمع‌آوری نشده‌اند. از این رو، مدل به دست آمده از کش‌آمدگی صحت و دقت کافی را در پیش‌بینی سختی خواهد داشت. بنابراین، می‌توان از این مدل جهت تحلیل تأثیرات متغیرهای فرایند بر کش‌آمدگی استفاده نمود.

جدول ۵. آنالیز واریانس مربوط به مدل‌سازی تجربی کش‌آمدگی

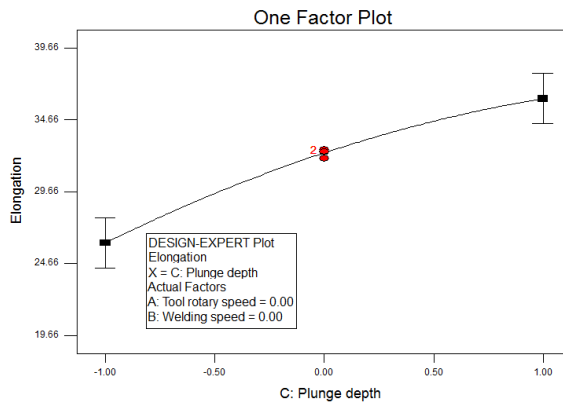
منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	Prob>F
مدل	۶۹۲.۵۱	۹	۷۶.۹۵	۱۴.۷۳	۰.۰۰۰۱
N	۹۶.۲۵	۱	۹۶.۲۵	۱۸.۴۲	۰.۰۰۱۶
f	۱۷۵.۲۹	۱	۱۷۵.۲۹	۰.۲۷	۰.۰۰۰۲
d	۳۴۴.۸۳	۱	۳۴۴.۸۳	۳۳.۵۵	۰.۰۰۰۱
N^2	۴۹.۳۷	۱	۴۹.۳۷	۶۶.۰۱	۰.۰۱۱۸
f^2	۲.۵۷	۱	۲.۵۷	۹.۴۵	۰.۴۹۸۷
d^2	۲۲.۴۵	۱	۲۲.۴۵	۰.۴۹	۰.۰۶۴۹
Nf	۰.۸۲	۱	۰.۸۲	۴.۳	۰.۷۰۰۴
Nd	۰.۰۹۲	۱	۰.۰۹۲	۰.۱۶	۰.۸۹۶۸
fd	۹.۰۷	۱	۹.۰۷	۰.۱۸	۰.۲۱۶۹
Residual	۵۲.۲۴	۱۰	۵.۲۲	-	-
Lack of fit	۵۲.۰۵	۵	۱۰.۴۱	۲.۱۱	۰.۳۳۴۵
Pure error	۰.۱۹	۵	۰.۰۳۸	-	-



شکل ۲۴. تأثیر سرعت چرخش ابزار بر کش آمدگی



شکل ۲۵. تأثیر سرعت پیشروی بر کش آمدگی

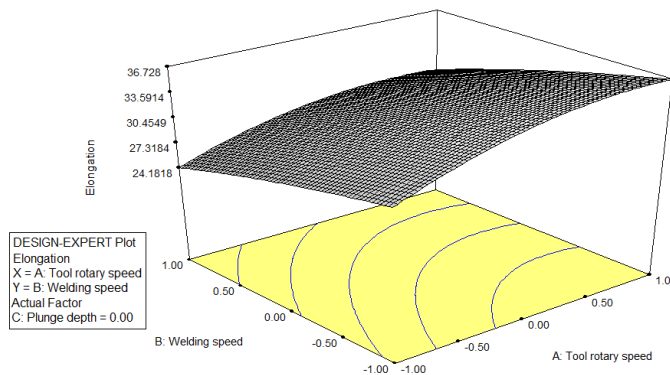


شکل ۲۶. تأثیر عمق غوطه‌وری شانه ابزار بر کش آمدگی

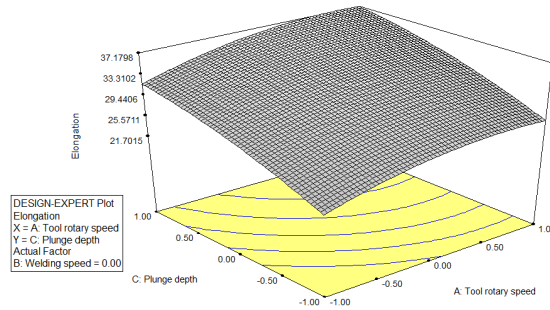
تأثیر سرعت چرخشی ابزار بر کش آمدگی در شکل ۲۴ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می شود با افزایش سرعت چرخشی ابزار میزان کش آمدگی افزایش می یابد. دلیل این پدیده را می توان این گونه توجیه کرد که افزایش سرعت چرخش ابزار سبب افزایش حرارت ایجاد شده در منطقه جوش می گردد. این حرارت، سبب رشد دانه ها می شود و تغییر شکل پلاستیک را در منطقه جوش راحت تر می کند. بنابراین، ماده، نرم تر می شود و هنگام آزمون کشش، تغییر طول بیشتری می دهد. علاوه بر این، حرارت سبب کاهش دانسیته نابه جایی ها می شود و تغییر شکل پلاستیک را راحت تر می کند. پس می توان این گونه بیان کرد که با افزایش سرعت چرخشی ابزار، مقدار کش آمدگی نیز افزایش می یابد.

تأثیر سرعت پیش روی بر کش آمدگی در شکل ۲۵ نشان داده شده است. در این شکل دیده می شود که با افزایش سرعت پیش روی، مقدار کش آمدگی کاهش پیدا می کند. دلیل این پدیده را می توان در حالت معکوس تأثیر سرعت چرخش ابزار توجیه کرد. هنگامی که سرعت پیش رو افزایش پیدا می کند، حرارت ایجاد شده در منطقه جوش کاهش می یابد و از رشد دانه ها جلوگیری می کند. بنابراین، تغییر شکل پلاستیک در هنگام تست کشش کم خواهد شد. علاوه بر این، حرارت کمتر سبب افزایش چگالی نابه جایی ها می شود و قابلیت تغییر شکل پلاستیک را کاهش خواهد داد. بنابراین می توان این گونه توجیه کرد: هر عاملی که سبب افزایش حرارت شود و تأثیری بر رشد دانه ها و کاهش چگالی نابه جایی ها داشته باشد، سبب بهبود تغییر شکل پلاستیک می شود و کش آمدگی را افزایش می دهد.

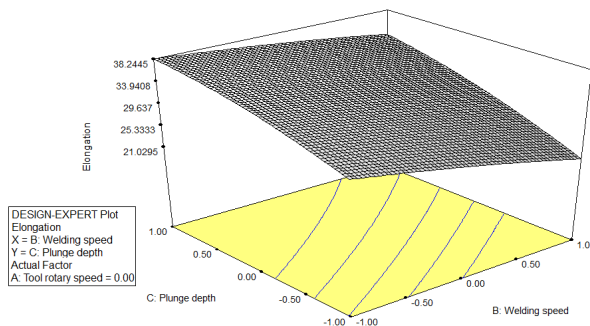
اثر عمق شناوری شانه ابزار بر کش آمدگی در شکل ۲۶ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، با افزایش عمق شناوری مقدار کش آمدگی افزایش پیدا خواهد کرد. این پدیده به دلیل آن است که افزایش عمق شناوری سبب افزایش اصطکاک بین ابزار و ورق ها می شود. این افزایش اصطکاک، توسعه حرارت را در منطقه جوش به همراه خواهد داشت. در اثر افزایش حرارت، دانه ها در منطقه جوش رشد می کنند و سبب بهبود تغییر شکل پلاستیک می شوند و کش آمدگی را افزایش می دهند. دلیل دیگری که تأثیر به سزایی بر کش آمدگی دارد این است که افزایش حرارت سبب کاهش چگالی نابه جایی ها می شود و کش آمدگی را افزایش می دهد.



شکل ۲۶. نمودار سه بعدی تأثیرات متقابل سرعت چرخش ابزار و سرعت پیش روی بر کش آمدگی



شکل ۲۸. نمودار سه بعدی تأثیرات متقابل سرعت چرخش ابزار و عمق شناوری شانه ابزار بر کش آمدگی



شکل ۲۹. نمودار سه بعدی تأثیرات متقابل سرعت پیش‌روی جوش و عمق شناوری بر کش آمدگی

اثرات متقابل پارامترهای فرایند بر کش آمدگی در شکل‌های ۲۷ تا ۲۹ نشان داده شده‌اند. از این شکل‌ها که دوه‌دو برای متغیرها رسم شده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین سرعت چرخشی و عمق غوطه‌وری شانه ابزار و کمترین سرعت پیش‌روی سبب رسیدن به بیشترین مقدار کش آمدگی می‌شود. به عبارت دیگر، انتخاب سرعت چرخشی ۱۱۴۰ دور بر دقیقه، سرعت خطی ۲۴ دور بر دقیقه و عمق غوطه‌وری ۰/۳۷ میلی‌متر، سبب رسیدن به بیشترین مقدار کش آمدگی می‌شود. دلیل این امر همان‌گونه که بیان شد می‌توان در توسعه‌ی حرارت زیاد ناشی از انتخاب این پارامترها دانست. این حرارت سبب رشد دانه‌ها می‌شود و چگالی نابه‌جایی را در منطقه جوش کاهش می‌دهد. بنابراین، سبب بهبود تغییر شکل پلاستیک می‌شود و کش آمدگی را افزایش می‌دهد.

بهینه‌سازی

پس از ادغام توابع مدل‌سازی شده (مدل‌های به‌دست‌آمده از شبکه عصبی) و الگوریتم اجتماع ذرات، در نرم‌افزار متلب^۱، این الگوریتم ۵ بار تکرار و نتایج جواب‌های در جدول ۶ فهرست شده است [۱۳]. در جدول ۶ دیده می‌شود که سرعت چرخشی ابزار حدود ۸۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیش‌روی جوش حدود ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق شناوری حدود ۰/۲ میلی‌متر، سبب رسیدن به بیشترین مقدار استحکام کششی،

¹ Matlab

سختی و کش آمدگی می‌شود. با توجه به تحلیل‌هایی که انجام شد، به نظر می‌رسد جواب‌های به‌دست‌آمده منطقی می‌باشد. هنگام بهینه‌سازی، وزن‌های بیشتری به استحکام کششی و سختی تعلق گرفته است؛ از این رو بدیهی است جواب‌هایی که سبب رسیدن به بیشترین مقدار استحکام کششی و سختی می‌شوند در اولویت قرار خواهند گرفت. علاوه بر این، در جواب‌های بهینه مقدار کش آمدگی با توجه به وزن، اهمیت آن مطلوب می‌باشد، اما نیاز است که این جواب‌ها تأیید شوند. از این‌رو، یک آزمایش برای تأیید این جواب‌ها انجام شده است. نتیجه این آزمون‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. با توجه به جدول ۷ می‌توان مشاهده کرد که مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش با نتایج مقادیر بهینه‌سازی، بسیار به هم نزدیک هستند. این تطابق نشان می‌دهد که الگوریتم به‌کاررفته و شبکه عصبی مرتبط در مدل‌سازی و بهینه‌سازی این فرایند بسیار موفق است و می‌توان از این روش در مدل‌سازی و بهینه‌سازی دیگر فرایندهای تولید استفاده کرد.

مراحل شبیه‌سازی

روش اجزا محدود یا روش المان‌های محدود که به اختصار FEM^1 نامیده می‌شود، روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادله‌های انتگرالی است. اساس کار این روش، حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آن‌ها به معادلات دیفرانسیل معمولی می‌باشد که با روش‌های عددی مثل اویلر حل می‌شوند.

جدول ۶. نتایج به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی فرایند

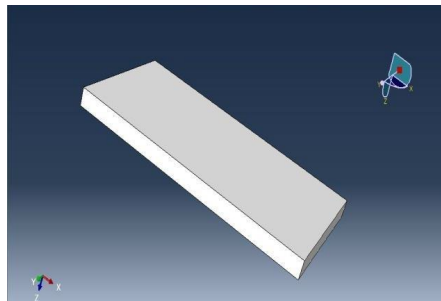
مرحله	ترکیب فاکتورهای بهینه		عمق نفوذ (mm)	سرعت پیش‌روی ابزار (mm/min)	سرعت دورانی ابزار (RPM)	پاسخ‌های بیشینه
	استحکام کششی (MPa)	سختی (HV)				
۱	۵۷.۲۵	۱۱۳.۷	۰.۲۱	۵۷.۲۵	۷۴۰.۳	۳۲.۱۳
۲	۵۹.۲	۱۱۴.۵	۰.۲۵۵	۵۹.۲	۷۷۴	۳۴.۴
۳	۵۷.۲۵	۱۱۳.۱	۰.۱۹	۵۷.۲۵	۷۸۵.۶	۳۲.۲۱
۴	۵۹.۳	۱۱۳.۹۳	۰.۲۰۷	۵۹.۳	۷۹۸.۲	۳۲.۸۱
۵	۵۷.۶۶	۱۱۳.۹۶	۰.۲۲۱	۵۷.۶۶	۸۰۲.۳	۳۳.۷

جدول ۷. نتایج آزمایش برای تأیید جواب بهینه

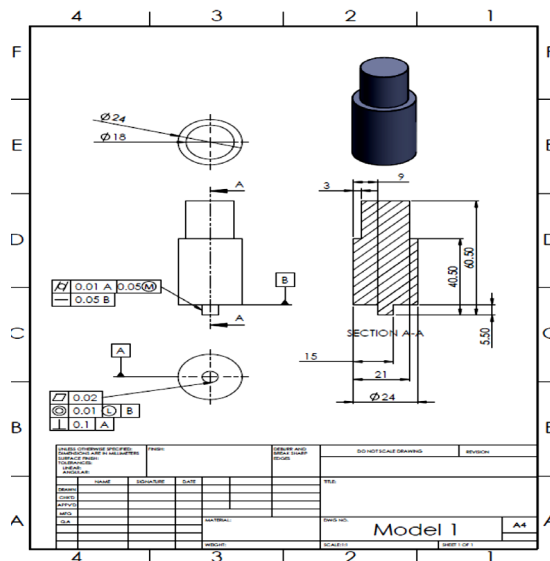
ترکیب فاکتورهای بهینه		پاسخ‌های بیشینه		سرعت دورانی ابزار (RPM)	سرعت پیش‌روی ابزار (mm/min)	عمق نفوذ (mm)	اندازه‌گیری شده	پیش‌بینی شده	اندازه‌گیری شده	پیش‌بینی شده	ازدییاد طول (%)
استحکام کششی (Mpa)	سختی (HV)	ازدییاد طول (%)									
۸۰۰	۶۰	۰.۲	۱۹۴	۱۸۹.۹	۱۱۶	۱۱۴.۳	اندازه‌گیری شده	پیش‌بینی شده	اندازه‌گیری شده	پیش‌بینی شده	۳۳.۷

¹ finite element method

آباکوس^۱ قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیرخطی را دارد. این نرم‌افزار دارای مجموعه المان‌های بسیار گسترده‌ای می‌باشد که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان توسط این المان‌ها مدل کرد. در این پژوهش به منظور بررسی فرایند در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی و استخراج پارامترهای تأثیرگذار بر فرایند جوشکاری، کلیه مراحل جوشکاری در نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شده است. در این مدل‌سازی با هدف رسیدن به جواب دقیق‌تر و خروجی‌های نزدیک‌تر به جواب حقیقی، کلیه قطعات با دقت بسیار بالا در نرم‌افزار رسم شده‌اند. مدل‌های رسم‌شده قطعه‌کار و ابزار در شکل‌های ۳۰ و ۳۱ نشان داده شده است. از جمله عملیات مهمی که در این مرحله انجام شده است پارتیشن‌بندی قطعات یا بخش‌بندی قطعات می‌باشد که این کار با هدف دسترسی به بهترین حالت مش‌بندی و رسیدن به جواب‌های دقیق‌تر صورت گرفته است.

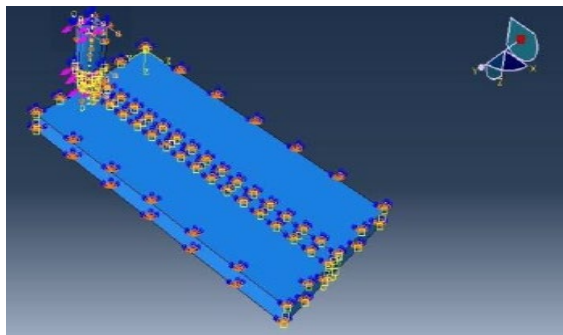


شکل ۳۰. مدل هندسی قطعه‌کارها



شکل ۳۱. ابزار استوانه‌ای مدل‌شده در نرم‌افزار

¹ Abaqus



شکل ۳۲. مدل مونتاژ شده با اعمال شرایط بار

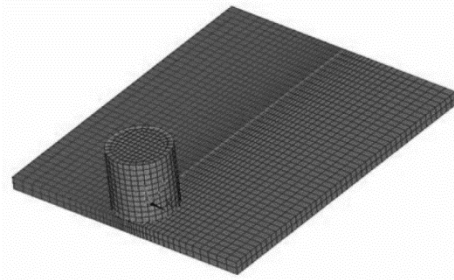
به دلیل آنکه هدف ما از تحلیل در آباکوس مباحث حرارتی و مکانیکی در جوشکاری اصطکاکی می‌باشد، پارامترهای ورودی نیز از نوع خواص حرارتی و مکانیکی ماده هستند. باید توجه داشت به دلیل اینکه در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، قطعه کار وارد ناحیه پلاستیک می‌شود باید خواص مربوط به ناحیه پلاستیک ماده نیز وارد نرم‌افزار شود. نمودار تنش- کرنشی که به نرم‌افزار معرفی می‌شود، باید نمودار تنش-کرنش حقیقی باشد و همچنین ناحیه الاستیک آن حذف شده باشد. در تحلیل مورد نیاز برای این تحقیق، حالت **Coupled Thermal/displacement** انتخاب شده است. در تحلیل‌های غیرخطی که از روش نیوتن رافسون حل می‌شوند، نکته بسیار مهم تعیین مقادیر مربوط به مقدار اولیه و نهایی و سایر مقادیر مرتبط با حل می‌باشد. شایان یادآوری است که تحلیل از نوع **Transient** و **Nonlinear** در حالت روشن است و کل تحلیل در **Time Period** ۱۰۰ ثانیه صورت می‌گیرد. برای تحلیل دقیق‌تر مسئله و به علت پیچیده بودن روش حل آن، تعداد مراحل حل یا تعداد اینکریمنت بر ۱۰۰۰ تنظیم شده است که زمان حل را تا ۱۵ الی ۲۰ ساعت افزایش خواهد داد. حداکثر تغییرات دمایی مجاز در هر اینکریمنت نیز بر روی ۵ درجه تنظیم شده است. نوع تماس مکانیکی به صورت **Tangential Behavior** و مقدار ضریب اصطکاک یا **Friction Coefficient** ۰.۳ و نوع تماس حرارتی به صورت **Heat Generation** تعریف شده است. نکته مهم در این مرحله تعریف **Thermal conductivity** می‌باشد که بیانگر گذردهی حرارتی بین سطوح تماسی دو قطعه می‌باشد. این مقدار نیز براساس استاندارد تعریف شده است. در بخش بارگذاری شرایط مرزی حاکم بر مسئله و نیروهای خارجی، اعمالی تعریف می‌گردد. برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ابزار دارای حرکت دورانی و خطی و قطعه کار ثابت می‌باشد. برای تعریف حرکت دورانی آباکوس در ماژول، بارگذاری گزینه **Velocity/Angular velocity** انتخاب و سرعت دورانی مورد نظر وارد می‌شود. برای تعریف حرکت خطی مطابق گزینه **Displacement/Rotation** انتخاب و سرعت خطی مورد نظر وارد خواهد شد. سایر شرایط مرزی مورد نیاز نیز در همین مرحله به قطعات داده و قطعات طبق شرایط اعمال شده مقید می‌شوند. در شکل ۳۲ مدل مونتاژ شده ابزار و قطعه کار با اعمال شرایط مرزی نشان داده شده است.

نوع و سائز مش در دقت نتایج تحلیل، تأثیر بسیاری دارد و چنانچه مش خوب برای قطعات در نظر گرفته نشود، احتمال دقت پایین نتایج تحلیل و حتی واگرایی جواب تحلیل وجود خواهد داشت. در این پژوهش سعی شده است تا از طریق پارتیشن‌بندی و استفاده از مش‌های لبه‌ای، بهترین نوع مش برای قطعات استفاده شود تا جواب تحلیل، دقت کافی را داشته باشد. مطابق شکل ۳۳ برای قطعه کار شکل هندسی مش **Hex/Structured** می‌باشد و براساس نوع تحلیل که **Coupled Temperature-displacement** است، نوع مش **C3D8RT** می‌باشد. نکته بسیار مهم آن است که با توجه به تغییر شکل شدید قطعه در این مدل‌سازی، به صورت ساده مش‌ها له

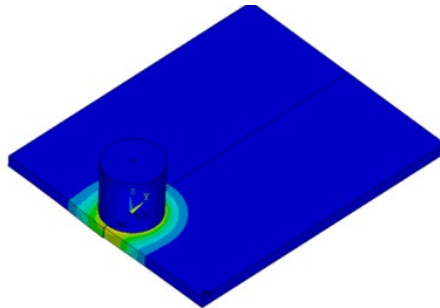
می‌شوند و جواب تحلیل‌ها اشتباه درمی‌آیند و تحلیل واگرا می‌شود. در این مرحله باید از Adaptive meshing استفاده کرد که مربوط به مش‌بندی اویلر و لاگرانژ می‌باشد.

در شکل ۳۴ شبیه‌سازی مدل مونتاژ شده ابزار و قطعه‌کار در حین انجام عملیات جوشکاری نشان داده شده است. در انتها شرایط بهینه جوشکاری در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و خروجی‌های مورد نیاز از نرم‌افزار استخراج شده است.

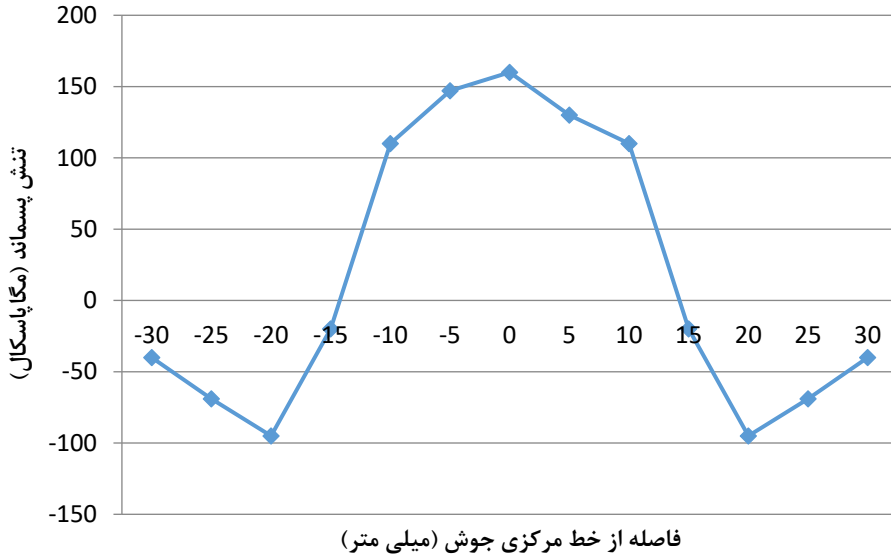
در شکل ۳۵ تنش‌های پسماند ناشی از عملیات جوشکاری نشان داده شده است و مشاهده می‌شود در نواحی که عمل اغتشاش بیشتر صورت گرفته است و متحمل شار حرارتی بیشتری شده، تنش پسماند باقی مانده نیز بیشتر است. با توجه به شکل ۳۵ مشاهده می‌شود که در ناحیه STIR تنش پسماند مثبت و از نوع کششی می‌باشد و در نواحی اطراف و مناطق HAZ مقدار تنش پسماند منفی و از نوع فشاری است. در عملیات جوشکاری، بعد از مرحله سرد شدن جسم، تنش‌هایی در آن باقی می‌ماند که به این تنش‌ها، تنش‌های پسماند می‌گویند. این تنش‌ها و همچنین تغییر شکل‌های ناخواسته ناشی از جوشکاری، مهم‌ترین عواملی هستند که باعث ضعیف شدن اتصالات جوشی و ناکارایی آن‌ها در تحمل طولانی‌مدت بارها می‌شوند. تنش پسماند اطراف جوش یکپارچگی قطعه جوش شده را از بین می‌برد و کششی بزرگ در نزدیکی خط جوش ایجاد می‌کند که باعث ترد شدن قطعه‌کار و کاهش طول عمر سازه می‌شود. علاوه بر این، تنش‌های پسماند فشاری نیز در نقاطی دورتر از خط جوش به وجود می‌آیند که اثرات سوئی بر کماتش اعضای فشاری دارند.



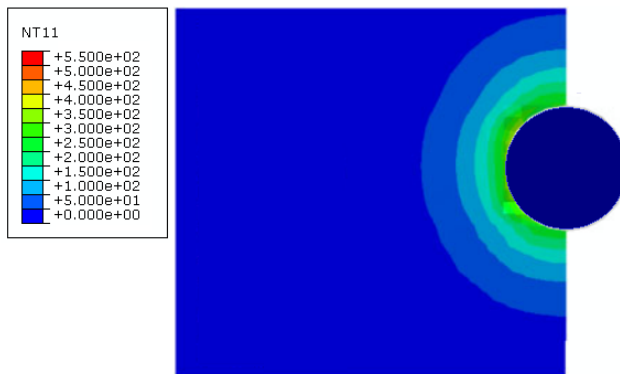
شکل ۳۳. مدل مش‌زده شده قطعه‌کار و ابزار



شکل ۳۴. شبیه‌سازی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

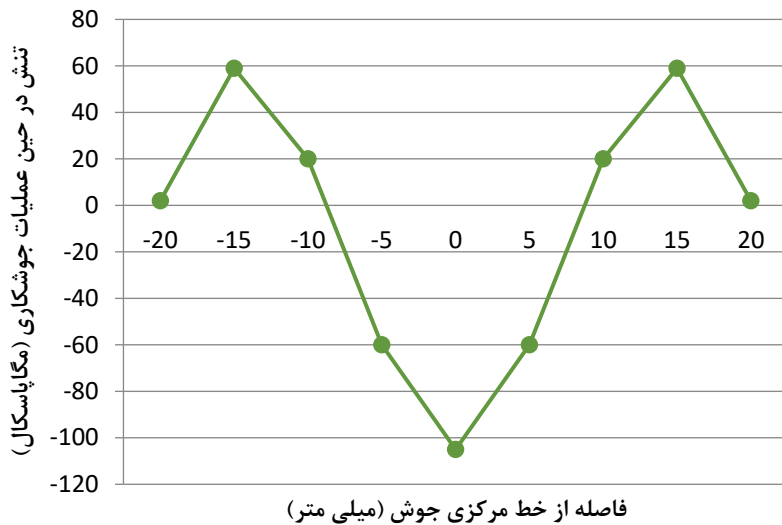


شکل ۳۵. تنش پسماند ایجادشده در نمونه، بر حسب فاصله از خط مرکزی جوش



شکل ۳۶. کانتور حرارتی ایجادشده روی قطعه کار در حین فرایند

به‌طور کلی، می‌توان بیان کرد که تنش ایجادشده در قطعه حین عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی رابطه عکس با دمای ایجادشده و توزیع حرارتی در ساختار قطعه دارد. کانتور حرارتی به‌وجودآمده بر قطعه‌کار در حین انجام فرایند در شکل ۳۶ نشان داده شده است. در هر مرحله که دمای بیشتری در قطعه ایجاد شده باشد و به تبع آن توزیع حرارتی بیشتری به‌وجود آمده باشد، تنش کمتری به قطعه وارد می‌شود و عمل اغتشاش مورد نیاز با مقادیر کمتری از تنش اعمال‌شده به قطعه صورت خواهد گرفت که نتایج حاصل از تنش وارد شده بر قطعه تحت عملیات جوشکاری در شکل ۳۷ نمایش داده شده است.



شکل ۳۷. تنش ایجادشده در قطعه حین عملیات، بر حسب فاصله از خط مرکزی جوش



شکل ۳۸. کرنش ایجادشده در قطعه حین عملیات بر حسب فاصله از خط مرکزی جوش

به‌طور کلی، در شرایط جوشکاری در هر ناحیه‌ای که تنش دارای مقادیر بالاتری باشد، به تبع آن کرنش نیز در آن ناحیه بیشتر خواهد شد. این موضوع را می‌توان در جوشکاری براساس تنش پسماند و میزان کرنش در قطعات بیان کرد. شکل ۳۸ نشان‌دهنده اندازه کرنش ایجادشده در قطعه حین عملیات جوشکاری می‌باشد.

نتیجه گیری

این پژوهش شامل مطالعه آزمایشگاهی، مدل سازی تجربی و پیش بینی دقیق و بهینه سازی استحکام کششی، سختی و کش آمدگی در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای غیرهمجنس آلومینیوم ۶۰۶۱ و آلومینیوم ۵۰۱۰ می باشد. هدف اصلی در این پژوهش بررسی تأثیرات پارامترهایی نظیر هندسه پین ابزار، سرعت چرخشی ابزار، سرعت خطی پیشروی جوش و عمق شناوری شانه ابزار بر ورقها بوده است. از این رو، آزمایشهای انجام شده به دو قسمت تقسیم بندی شد. آزمایشهای مرحله اول به طراحی بهینه هندسه ابزار اختصاص داده شد. در این مرحله تعداد ۹ آزمایش تحت شرایط مختلف اصطکاک بین ابزار و ورق با هندسه های مختلفی مانند پین استوانه ای ساده، پین مربعی و پین مثلثی انجام شد. پس از انجام آزمایشها، نتایج، بررسی شد و ابزاری که سبب رسیدن به بیشترین استحکام کششی، سختی و کش آمدگی شد، انتخاب گردید. در ادامه کار، آزمایشهای مرحله دوم با ابزاری انجام شد که در مرحله اول آزمایشها انتخاب گردید. در مرحله دوم آزمایشها، هدف بررسی تأثیرات پارامترهای فرایندی مانند سرعت چرخشی ابزار، سرعت خطی پیشروی جوش و عمق شناوری شانه ابزار بر استحکام کششی، سختی و کش آمدگی بود. همچنین انتخاب شرایط بهینه ای که فرایند به بیشترین مقدار استحکام کششی، سختی و کش آمدگی برسد، از اهداف این مرحله بود. از این رو، تعداد ۲۰ آزمایش با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی انجام شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفتند. جهت بررسی تجربی تأثیرات پارامترها بر استحکام کششی، سختی و کش آمدگی از روش پاسخ سطح استفاده گردید. با استفاده از این روش، گرافها و نمودارهایی در نرم افزار دیزاین کسپرت رسم شد که اثرات متغیرها را به درستی نمایش می دهد. پس از بررسی تجربی و تحلیل نتایج، برای پیش بینی دقیق خواص مکانیکی بیان شده، از شبکه های عصبی مصنوعی استفاده شد. با استفاده از این شبکه، یک رابطه دقیق بین پارامترها و خواص مکانیکی ایجاد شد تا بتوان بدون انجام آزمایش، خواص مکانیکی را پیش بینی کرد. در ادامه کار، این مدل دقیق با الگوریتم اجتماع ذرات ترکیب شد تا بتوان پارامترهای فرایند را طوری به دست آورد تا تحت آن شرایط پارامترهای استحکام کششی، سختی و کش آمدگی به بیشترین مقدار خود برسند.

با توجه به توضیحات داده شده، خلاصه نتایج به شرح زیر می باشد:

- در بین پینها با هندسه های استوانه ای، مثلثی و مربعی، پین با هندسه مربعی سبب رسیدن به بیشترین استحکام کششی، سختی و کش آمدگی شده است. بعد از پین مربعی، پین مثلثی بالاترین خواص مکانیکی را دارد. دلیل این پدیده وجود حالت های چند لبه در این پینها است که سبب بهتر هم زدن منطقه جوش می شود و خواص مکانیکی جوش را بهبود می بخشد.
- با افزایش سرعت چرخش ابزار، ابتدا مقدار استحکام کششی و سختی، افزایش پیدا می کند و به حد ماکزیمم در ۸۰۰ دور بر دقیقه می رسد. سپس با افزایش بیشتر سرعت چرخش ابزار، مقدار استحکام کششی و سختی رفته رفته کاهش می یابد. اما با افزایش سرعت چرخشی ابزار مقدار کش آمدگی به دلیل توسعه حرارت و درشت تر شدن دانه ها افزایش پیدا خواهد کرد.
- با افزایش سرعت پیشروی جوش، ابتدا مقدار استحکام کششی و سختی، افزایش می یابد و به حد ماکزیمم در ۶۰ میلی متر بر دقیقه می رسد. سپس با افزایش سرعت پیشروی، مقدار استحکام کششی و سختی رفته رفته کاهش خواهد یافت؛ اما با افزایش سرعت پیشروی، به دلیل کم شدن حرارت، مقدار کش آمدگی دچار کاهش می شود.
- عمق غوطه وری ابزار، رفتاری مشابه با سرعت چرخشی ابزار دارد؛ یعنی با افزایش عمق غوطه وری، ابتدا مقدار استحکام کششی و سختی افزایش می یابد و به حد ماکزیمم در ۰/۲ میلی متر می رسد، سپس با افزایش بیشتر

- عمق غوطه‌وری مقدار استحکام کششی و سختی رفته‌رفته کاهش پیدا می‌کند. اما با افزایش عمق غوطه‌وری مقدار کش آمدگی به دلیل توسعه حرارت و درشت‌تر شدن دانه‌ها افزایش خواهد یافت.
- در مدل‌سازی و پیش‌بینی استحکام، سختی و کش آمدگی با استفاده از شبکه‌های عصبی، یک شبکه پس از انتشار با ساختار ۳-۱۱-۳ سبب رسیدن به بالاترین دقت خواهد شد. این شبکه در داده‌هایی که در آموزش آن حضور نداشتند نیز آزمایش شد و نتایج قابل قبولی در پیش‌بینی آن به دست آمد.
 - هنگام بهینه‌سازی به دلیل اهمیت بیشتر استحکام کششی و سختی، به آنها در مقایسه با کش آمدگی، وزن‌های بیشتری داده شد. پس از بهینه‌سازی، نتایج نشان داد که سرعت چرخش ابزار ۸۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیش‌روی ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق غوطه‌وری ۰/۲ میلی‌متر سبب رسیدن به بیشترین مقدار استحکام، سختی و کش آمدگی می‌شود.
 - با توجه به مدل‌های شبیه‌سازی شده مشخص شد در نواحی که عمل اغتشاش و شار حرارتی بیشتری صورت گرفت، تنش پسماند باقی‌مانده نیز بیشتر شد. در ناحیه STIR، تنش پسماند مثبت و از نوع کششی و در نواحی اطراف و مناطق HAZ مقدار تنش پسماند منفی و از نوع فشاری می‌باشد.
 - با توجه به مدل‌های شبیه‌سازی شده می‌توان نتیجه گرفت که تنش ایجاد شده در قطعه حین عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، رابطه معکوس با دمای ایجاد شده و توزیع حرارتی در ساختار قطعه دارد؛ هرچه در قطعه ایجاد شده دما بیشتر و به تبع آن توزیع حرارتی بیشتری باشد، تنش کمتری به قطعه وارد می‌شود و عمل اغتشاش مورد نیاز با مقادیر کمتری از تنش اعمال شده به قطعه صورت می‌گیرد. تنش و کرنش در نواحی مرکزی جوش، دارای بیشترین مقدار و در اطراف منطقه جوش دارای کمترین مقدار می‌باشند.
- نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی با انجام آزمایش‌های دوباره تأیید شد. این تأیید نشان‌دهنده آن است که هم مدل شبکه عصبی و هم الگوریتم اجتماع ذرات، کارایی و دقت لازم را در مدل‌سازی و بهینه‌سازی این فرایند داشته‌اند.

Reference

1. Thomas, W. M. (1991). Friction stir butt welding. Int. Patent No. PCT/GB92/02203.
2. Asadi Borujeni, B., Mozaffari Vanani, L. (2020). "The effect of tool geometry on tensile strength of polypropylene welded parts by friction stir welding method". *Karafan scientific-research quarterly*, 17(1), 143-155. (In Persian)
3. Elangovan, K., & Balasubramanian, V. (2007). "Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy". *Materials Science and Engineering: A*, 459(1-2), 7-18.
4. Taban, E., Gould, J. E., & Lippold, J. C. (2010). "Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel: Properties and microstructural characterization". *Materials & Design*, 31(5), 2305-2311.
5. Zhou, C., Yang, X., & Luan, G. (2006). "Effect of root flaws on the fatigue property of friction stir welds in 2024-T3 aluminum alloys". *Materials Science and Engineering*, 418(1-2), 155-160.
6. Jayaraman, M., Sivasubramanian, R., & Balasubramanian, V. (2010). "Establishing relationship between the base metal properties and friction stir welding process parameters of cast aluminium alloys". *Materials & Design*, 31(9), 4567-4576.
7. Jayaraman, M., Sivasubramanian, R., Balasubramanian, V., & Lakshminarayanan, A. K. (2008). "Prediction of tensile strength of friction stir welded A356 cast aluminium alloy using response surface methodology and artificial neural network". *Journal for Manufacturing Science and Production*, 9(1-2), 45-60.

8. Elangovan, K., Balasubramanian, V., & Babu, S. (2008). "Developing an empirical relationship to predict tensile strength of friction stir welded AA2219 aluminum alloy". *Journal of materials engineering and performance*, 17(6), 820.
9. Rajakumar, S., Muralidharan, C., & Balasubramanian, V. (2011). "Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints". *Materials & Design*, 32(2), 535-549.
10. Ghosh, M., Kumar, K., Kailas, S. V., & Ray, A. K. (2010). "Optimization of friction stir welding parameters for dissimilar aluminum alloys". *Materials & Design*, 31(6), 3033-3037.
11. Koilraj, M., Sundareswaran, V., Vijayan, S., & Rao, S. K. (2012). "Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA2219 to AA5083—Optimization of process parameters using Taguchi technique". *Materials & Design*, 42, 1-7.
12. Murr, L. E., Flores, R. D., Flores, O. V., McClure, J. C., Liu, G., & Brown, D. (1998). "Friction-stir welding: microstructural characterization". *Material Research Innovations*, 1(4), 211-223.
13. Mohammadkhani, B., Maleki, M. (2020). "Experimental and numerical investigation of dynamic density of aluminum powder under high speed loading". *Karafan scientific-research quarterly*, 17(1), 157-175. (In Persian)