



تحلیل تجربی پارامترهای مؤثر بر خصوصیات مکانیکی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپرآلیاژ اینکونل 625

غلام عباس مرادی^۱، علی حیدری^{۲*} - امین کلاه‌دوز^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران

۲ و ۳- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران

heidari@iaukhsh.ac.ir

چکیده:

سوپر آلیاژ اینکونل 625 به دلیل خواص مکانیکی بالا، قابلیت جوش‌پذیری و مقاومت به خوردگی بالا به طور وسیعی در ساخت تجهیزات صنایع نیروگاهی، هوافضا و صنایع معدنی به کار می‌رود. یکی از روش‌های متداول جوشکاری این آلیاژ روش جوش مقاومتی نقطه‌ای می‌باشد. ارزیابی جوش نقطه‌ای به منظور اطمینان از کیفیت و استحکام جوش در ایمنی سیستم بسیار مؤثر است. در این مقاله، برای اولین بار نحوه تأثیر عواملی چون شدت جریان، زمان جوشکاری، فشار وارد بر ورق‌ها و تعداد پالس‌های جوش بر استحکام کششی، و سختی سطح موضع جوش در ورق‌های اینکونل 625 به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا طراحی آزمایش با استفاده از روش تاگوچی صورت گرفته است. براساس آن تحلیل سیگنال به نویز انجام شده و تأثیر فاکتورهای اصلی بر روی خروجی‌ها بررسی شده و شرایط بهینه فرآیند جهت دسترسی به بالاترین کیفیت جوش ارائه شده است. همچنین بر روی داده‌های آزمایش، تحلیل ANOVA صورت گرفته و برای تعیین خروجی‌ها برحسب فاکتورهای اصلی و تعاملات رابطه‌هایی با دقت بالا ارائه شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که فاکتورهای اصلی به ترتیب شدت جریان با 42٪، زمان با 26.3٪، فشار با 20.4٪ و تعداد پالس با 11.3٪ بیشترین تأثیر را بر روی استحکام کششی دارند. همچنین شدت جریان با 32.3٪، زمان با 31٪، فشار با 23.7٪ و تعداد پالس با 13٪ به ترتیب بیشترین تأثیر گذاری را بر روی سختی سطح دارند.

کلیدواژگان: جوش مقاومتی نقطه‌ای، سوپر آلیاژ اینکونل 625، استحکام کششی، سختی سطحی، طراحی و تحلیل آزمایش

Experimental study of effective parameters on mechanical properties of resistance spot welding of super alloy Inconel 625

Gholam Abas Moradi¹, Ali Heidari^{2*}, Amin Kolahdooz²

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran

2,3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran

†Corresponding Author Email: heidari@iaukhsh.ac.ir

Abstract:

The Inconel 625 super alloy is widely used in the power plant, aerospace and mining industries due to its good mechanical properties, weldability and high corrosion resistance. One of the most common methods of welding this alloy is the resistance spot welding. Evaluation of spot-welding in order to ensure the quality and strength of the machine parts is very necessary. In this paper, for the first time some parameters such as current, welding time, pressure and pulse are experimentally studied to determine the tensile strength and hardness for the sheets of Inconel 625 alloy. Also design of experiments by Taguchi method has been used to study the interaction of these parameters. Based on the analysis of S/N, the effect of these parameters on the tensile strength and hardness are provided and the optimum conditions of process are presented to achieve the highest quality of welding. Also based on the test data, the ANOVA analysis with high precision is done to determine the main factors and interactions between them. The experimental results showed that the main factors with greatest effect on the tensile strength are respectively the current (42%), time (26.3%), pressure (20.4%) and number of pulse (11.3%). Also, the current (32.3%), time (31%), pressure (23.7%) and number of pulse (13%), respectively, have the highest impact on the surface hardness.

Keywords: Resistance spot welding, Inconel 625, Tensile strength, Hardness, Design of experiments

جوش کاری مقاومتی نقطه‌ای^۱ (RSW) یکی از قدیمی‌ترین روش‌های جوشکاری هست که کاربرد وسیعی در صنایع مختلف مانند نیروگاه، خودروسازی، هوافضا و غیره دارد. جوش نقطه‌ای از سال 1950 در صنعت خودرو به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفت، به طوری که امروزه در بدنه یک خودرو مدرن، بین 2000 تا 5000 جوش نقطه‌ای وجود دارد [۱]. جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فرآیندی است، که در آن سطوح فلزی با فشار روی همدیگر قرار گرفته و از طریق حرارت تولید شده در یک یا چند نقطه به یکدیگر متصل می‌شوند. گرمای تولید شده در این نقاط، حاصل از شار جریان الکتریکی است که بین الکترودها برقرار می‌شود و از میان قطعات نیز عبور می‌کند. ضمن اینکه الکترودها در این وضعیت با اعمال فشاری خاص، سطوح را به هم نزدیک می‌کنند. پارامترهای مؤثر بر جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای عبارتند از: شدت جریان، زمان، فشار و تعداد پالس‌های جریان [۲].

سوپر آلیاژ اینکونل 625، آلیاژی است بر پایه نیکل که دارای مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون بالا هست. امروزه این آلیاژ در موارد مختلف مانند ساخت محفظه‌های احتراق و خطوط مواد شیمیایی، مبدل‌های حرارتی، کوره‌ها، تجهیزات مورد استفاده در تولید اسیدها، قسمت‌هایی از بدنه‌های هواپیما و غیره بکار گرفته می‌شود که در بسیاری از آنها از جوشکاری مقاومتی جهت ساخت تجهیزات استفاده می‌شود.

سنکارا^۲ و همکاران [۳] پدیده پاشش مذاب در فرآیند جوش نقطه‌ای را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که پارامتر نیرو در پدیده پاشش مذاب عامل بسیار مهمی است. عیسی‌زاده^۳ و همکاران [۴] با استفاده از روش المان محدود به بررسی و پیش‌بینی توزیع گرمایی و اندازه قطر دکمه جوش پرداختند و نشان دادند که اگر ضخامت ورق افزایش یابد، باید مقدار جریان عبوری نیز افزایش یابد. لو^۴ و همکاران [۵] پس از بررسی پارامترهای مؤثر جوش نقطه‌ای بر استحکام کششی و اندازه قطر دکمه جوش به این نتیجه رسیدند که این تأثیر غیرخطی است و تأثیر عوامل دوتایی و اثرات متقابل پارامترها را نیز نباید ناچیز انگاشت.

اسلانلار^۵ [۶] نشان داد که حرارت تولید شده بین دو ورق از نیروی فشاری دو الکترودها، جریان و زمان جوشکاری تأثیر

می‌پذیرد. فلورا^۶ و همکاران [۷] کیفیت جوش را برای شرایط جوشکاری مختلف و به منظور دستیابی به نتایج بهینه محصول نهایی را مقایسه کردند. آنها دریافتند وابستگی قوی بین پارامترهای جوشکاری و اندازه دانه‌ها و جهت‌گیری آن وجود دارد. مارتین^۷ و همکاران [۸] به بررسی اثر پارامترهای جوش نقطه‌ای بر خصوصیات فیزیکی جوش با استفاده از شبکه‌های عصبی پرداختند. یانگ^۸ و همکاران [۹] اثرات اندازه دکمه جوش بر استحکام جوش نقطه‌ای را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که ضخامت و طول جوش دو پارامتر تأثیرگذار بر استحکام کششی جوش نقطه‌ای هستند.

خدابخشی^۹ و همکاران [۱۰] فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای برای جوشکاری ورق‌های CGP با تغییر شکل‌های مختلف را بهینه‌سازی کردند. آنها دریافتند که پارامترهای جوشکاری بهینه (جریان جوش و زمان جوشکاری) برای ورق‌های فوق‌العاده ریز به مقادیر پایین‌تر تغییر پیدا می‌کند. فلورا^{۱۰} و همکاران [۱۱] رفتار خستگی RSW آلیاژ آلومینیوم T6-6061 را بررسی کردند. تحقیقات آنها نشان داد که پارامترهای فرآیند جوشکاری نفوذ زیادی بر روی ریزساختار و عمر خستگی اتصالات جوش نقطه‌ای مقاومتی ورق آلومینیوم دارد. رضایی^{۱۱} و همکاران [۱۲] تأثیر قطر الکترودها را با توجه به اثرات متقابل آن با دیگر پارامترها، بر توزیع دمایی فرایند و شکل‌گیری دکمه جوش در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپر آلیاژ اینکونل 625 با استفاده از روش اجزا محدود مورد بررسی قرار دادند. فرایند توسط یک مدل متقارن محوری دو بعدی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس به صورت تحلیل وابسته الکتریکی-حرارتی و غیر وابسته مکانیکی شبیه‌سازی شده است. نتایج تحلیل با استفاده از نتایج آزمایش‌های تجربی از طریق مقایسه قطر دکمه جوش اعتبارسنجی شده است که دقت قابل قبول و مناسبی را نشان داده است. میرزائی^{۱۲} و همکاران [۱۳] تأثیر پارامترهای شدت جریان، زمان و فشار الکترودها در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های فولادی گالوانیزه را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که در کنار پارامترهای جوشکاری، تعاملات این پارامترها تأثیر چشمگیری روی اندازه قطر دکمه جوش و استحکام اتصال دارند.

⁶ -Florea

⁷ -Martin

⁸ -Yang

⁹ -Khodabakhshi

¹⁰ -Florea

¹¹ -Rezaei

¹² - Mirzaei

¹ -Resistance spot welding

² -Senkara

³ -Eisazadeh

⁴ -Luo

⁵ -Aslanlar

عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند و هر کدام در سه سطح مطابق با جدول (۱) طراحی شده‌اند. خصوصیات مکانیکی جوش مانند سختی سطح جوش و استحکام کششی جوش به عنوان پاسخ آزمایش‌ها انتخاب شده است. طراحی آزمایش‌ها بر اساس آرایه استاندارد **L9** انجام شد. ماتریس آزمایش‌ها نشان‌دهنده ترتیب چیدمان متغیرها و سطوح آن است که در هر کدام از آزمایش‌های عملی کدام سطح از متغیرها انتخاب شود و بر روی دستگاه جوش تنظیم شود که در جدول (۲) آمده است.

جدول (۱) - پارامترهای به کار گرفته شده جهت آزمایش‌ها

۳	۲	۱	سطوح آزمایش
۷	۶	۵	جریان (کیلوآمپر)
۱۱	۱۰	۹	زمان (سیکل)
۲.۵	۲.۲	۲	فشار (بار)
۳	۲	۱	پالس

جدول (۲) - ماتریس آزمایش‌ها بر اساس آرایه استاندارد **L9** تاگوچی

پالس (PL)	فشار (P)	زمان (t)	جریان (I)	شماره آزمایش
1	1	1	1	1
2	2	2	1	2
3	3	3	1	3
3	2	1	2	4
1	3	2	2	5
2	1	3	2	6
2	3	1	3	7
3	1	2	3	8
1	2	3	3	9

۳- روش انجام آزمایشات

جنس ورق‌های مورد استفاده در این تحقیق سوپر آلیاژ اینکونل 625 است که ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول (۳) و خواص مکانیکی آن در جدول (۴) آورده شده است. به دلیل این که اندازه‌گیری سختی قبل از تست کشش می‌تواند باعث ایجاد تمرکز تنش در نمونه شود آزمایش‌ها در دو گروه مجزا انجام گرفته است. بدین صورت که تعداد 9 نمونه برای سختی سنجی و 9 نمونه آزمایش برای استحکام کششی در نظر گرفته شد.

جدول (۳) - ترکیب شیمیایی اینکونل 625 بر حسب درصد وزنی

Ni	C	Si	Nb	C _r	Mo
59.28	0.023 5	0.057 1	3.09	20.72	8.03
Sb	Zn	Fe	Al	Co	Cu
0.008 5	0.008 9	0.319	0.099 5	0.087 2	0.024 9
As	S	Ta	Ti	Zr	Mg
0.003 3	0.001 1	0.045 3	0.227	0.007 4	0.038 1

ویشوکارما^{۱۳} و همکاران [۱۴] فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای **AISI 1008** و **ASTM A366** را به روش تاگوچی بهینه‌سازی کردند. ایشان پارامترهای فشار الکتروود، شدت جریان و زمان را به عنوان فاکتورهای ورودی بهینه‌سازی و قطر دکمه جوش و استحکام را به عنوان تابع هدف در نظر گرفتند. نتایج بررسی ایشان حاکی از این مطلب بود که شدت جریان بیشترین تاثیر را روی توابع هدف مورد نظر دارد. صفری^{۱۴} و همکاران [۱۵] فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای **AISI 201** را به صورت عددی و تجربی تحلیل کردند. ایشان در تحلیل تجربی خود از طراحی آزمایش باکس بنکن^{۱۵} و روش رویه پاسخ^{۱۶} استفاده کرده و در بخش عددی یک تحلیل الکتریکی - حرارتی - مکانیکی انجام دادند. نتایج تحلیل ایشان نشان داد که با افزایش شدت جریان، اندازه قطر دکمه جوش بزرگتر می‌شود.

در تحقیق حاضر اثر پارامترهای مهم جوش نقطه‌ای از جمله شدت جریان، زمان، فشار و تعداد پالس جریان بر روی خصوصیات مکانیکی جوش مانند استحکام کششی و سختی سطح جوش سوپر آلیاژ اینکونل 625 برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تحلیل داده‌های طراحی آزمایش از روش **S/N** و آنوا^{۱۷} بهره گرفته شده است.

۲- طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی

به طور کلی متغیرهای مورد بررسی در یک فرایند دارای اثرات هم‌زمان بوده و تغییر در یکی، باعث تغییر در سایر متغیرها و نهایتاً تغییر در خروجی می‌شود. لذا بررسی تأثیر هر یک از متغیرها بر روی خروجی به تنهایی صحیح نیست. بدین منظور از روش طراحی آزمایش تاگوچی در نرم‌افزار **Minitab 16** جهت تحلیل داده‌ها استفاده شده است. به علت اینکه هدف پیدا کردن بیش‌ترین مقدار خروجی است در روش سیگنال به نویز (**S/N**)، معیار هر چه بزرگتر بهتر ۱۸ طبق رابطه شماره (۱) انتخاب شده است [۱۶].

$$S/N = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{Y_i^2} \right)}{n} \right] \quad (1)$$

که Y_i مقدار خروجی و n تعداد تکرار هر آزمایش است. چهار پارامتر جریان، زمان جوشکاری، فشار و تعداد پالس‌ها به

¹³ Vshwakarma
¹⁴ Safari
¹⁵ Box- Behnken
¹⁶ Response surface methodology
¹⁷ ANOVA
¹⁸ Larger is better

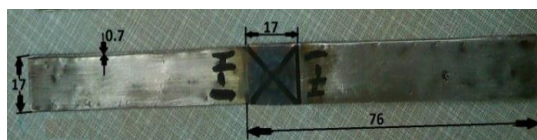
جدول (۴) - خواص مکانیکی اینکونل 625

درصد ازدیاد طول (%)	استحکام تسلیم (MPa)	سختی (HV)	استحکام نهایی (MPa)
5	1386	425	1510

۱-۳- آماده‌سازی اولیه

در این تحقیق از سوپر آلیاژ اینکونل 625 به شکل تسمه در ابعاد $0.7 \times 17 \times 76$ میلی‌متر استفاده شده است. نمونه‌ها توسط گیوتین بریده شده تا لبه‌ها کاملاً صاف بوده و به خوبی بر روی یکدیگر قرار گیرند. کلیه نمونه‌ها توسط میکرومتر اندازه‌گیری شده که دارای تolerانس 0.40 میلی‌متر است.

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش در حالت نورد سرد و بدون اعمال هیچ‌گونه عملیات حرارتی می‌باشند و با توجه به لایه‌های اکسیدی، رطوبت، آلودگی‌های سطحی و دیگر موارد مشابه که روی ورق‌های اینکونل وجود دارد. بر روی دکمه جوش و در نتیجه خواص جوش اثرات مخرب بر جا می‌گذارد. لذا فرآیند زدودن این لایه‌ها قبل از جوشکاری ضروری است. بدین منظور قبل از جوشکاری، سطح نمونه‌ها با سنباده شماره 220 و 400 تمیز گردیدند. ابعاد اتصال مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل (۱) آمده است.



شکل (۱) - نمونه آزمون کشش بر طبق استاندارد ANSI/AWS/SAE/C1.1

۲-۳- وسایل جوشکاری

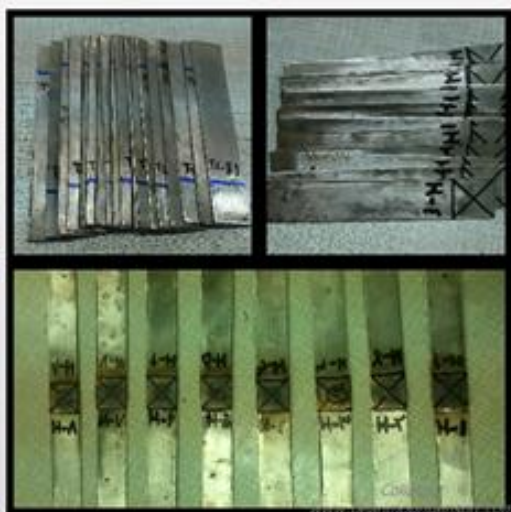
جوشکاری توسط دستگاه جوش نقطه‌ای ثابت با توان kVA 100 ساخت شرکت پارس پایا و مدل MST-100 انجام شده است (شکل ۲). این دستگاه قابلیت تنظیم دیجیتالی تمامی متغیرهای جوشکاری نقطه‌ای را دارا می‌باشد. همچنین برای جوش دادن نمونه‌ها از الکتروود گروه آلیاژی مس-کروم، مطابق کلاس 2 دسته‌بندی RWMA استفاده شده است.



شکل (۲) - دستگاه جوش مقاومت نقطه‌ای

۳-۳- وسایل آزمون کشش و سختی

برای ارزیابی استحکام کششی نمونه‌های جوشکاری شده، آزمون کشش در دمای اتاق و توسط دستگاه یونیورسال (مدل SBMU 405) با سرعت 15 میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است (شکل ۳). در این آزمایش‌ها بیشترین نیروی تحمل شده توسط جوش قبل از پارگی یا شکست به‌عنوان استحکام جوش در نظر گرفته شده است.

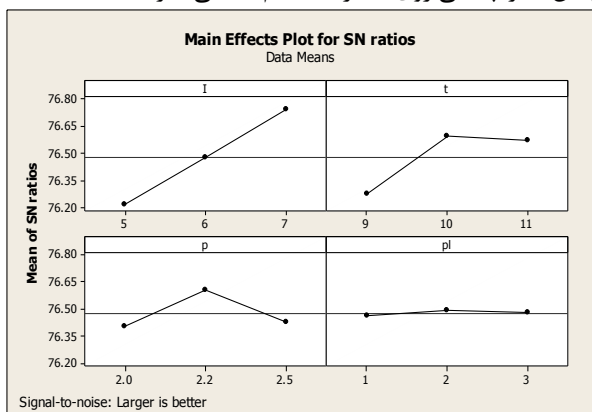


شکل (۳) - (الف) نمونه‌ها جهت آزمون کشش، (ب) دستگاه تست کشش

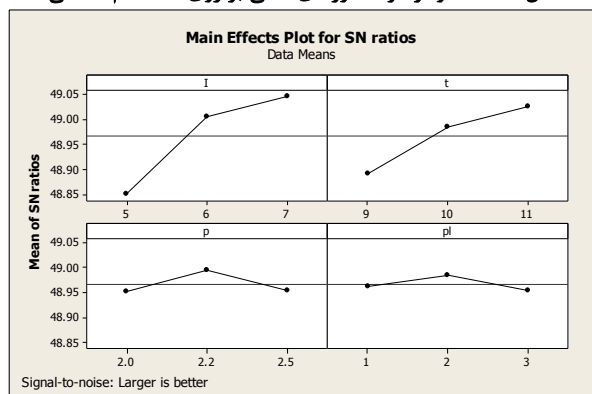
آزمایش‌های ریز سختی سنجی ویکرز توسط دستگاه KOOPA مطابق با استاندارد AWS/D8.9 در دمای اتاق انجام گرفته است. یک بار 100 گرمی به مدت 15 ثانیه اعمال شده و سپس میزان سختی با اندازه‌گیری قطرهای لوزی ایجاد شده روی نمونه توسط شاخص‌های دستگاه محاسبه شده است. این مقادیر از خط مرکزی دکمه جوش به سمت فلز پایه در فواصل مشخص اندازه‌گیری شده است. شکل شماتیک فرو-رفتگی در شکل (۴) دیده می‌شود. به منظور محاسبه سختی فلز پایه، سختی در سه نقطه اندازه‌گیری شد و میانگین آنها به‌عنوان سختی فلز پایه در نظر گرفته شده است. سختی پنج نقطه از مرکز جوش به طرف فلز پایه اندازه‌گیری شد و میانگین آنها

۴-۱- تحلیل S/N تاگوچی

شکل (۶) نتایج حاصل از تحلیل سیگنال به نویز استحکام کششی را با استفاده از طراحی آزمایشات تاگوچی نشان می‌دهد. در این نمودار باید به این نکته توجه کرد که بیشینه‌ی عددی در "Mean of SN ratios" برای سطحی از یک متغیر، نشان دهنده این است که آن سطح بهینه‌ترین سطح برای دستیابی به بالاترین استحکام می‌باشد. ضمناً باید در نظر داشت در هر متغیر هر چه شیب تغییرات از یک سطح به سطح دیگر بیشتر باشد، آن متغیر تاثیر بیشتری در بالا رفتن کیفیت (استحکام) دارد. با دقت در شکل (۶) مشخص می‌شود که متغیر شدت جریان جوشکاری بیشترین تاثیر را در افزایش استحکام دارند. این امر نشان دهنده این موضوع است که برای افزایش استحکام، بیشتر باید به شدت جریان توجه داشت تا زمان، فشار و تعداد پالس. به عبارتی انتخاب یک سطح مناسب از شدت جریان نسبت به دیگر متغیرها تاثیر بیشتری در استحکام دارد. افزایش متغیر فشار نیز ابتدا استحکام را افزایش می‌دهد زیرا باعث افزایش قطر دگمه جوش می‌شود. ولی در ادامه افزایش فشار منجر به فشرده شدن بیش از حد دو ورق شده و مقاومت تماسی کاهش می‌یابد. این موضوع حرارت تولید شده را کاهش داده و باعث کاهش استحکام می‌شود. تغییر تعداد پالس تاثیر چندانی روی مقدار استحکام کششی ندارد.

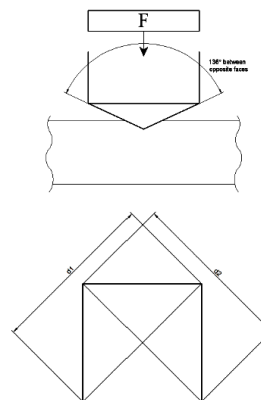


شکل (۶) - نمودار اثر فاکتورهای اصلی بر روی استحکام کششی

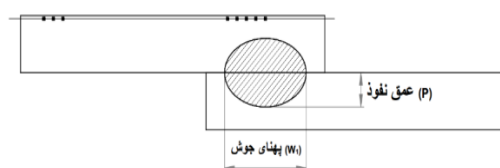


شکل (۷) - نمودار اثر فاکتورهای اصلی بر روی سختی

به عنوان سختی سطح جوش در قسمت نتایج ارائه شده است. شکل (۵) شماتیک نقاط اندازه‌گیری سختی را نمایش می‌دهد.



شکل (۴) - شماتیک فرورفتگی در سختی سنجی ویکرز



شکل (۵) - شماتیک نقاط اندازه‌گیری سختی

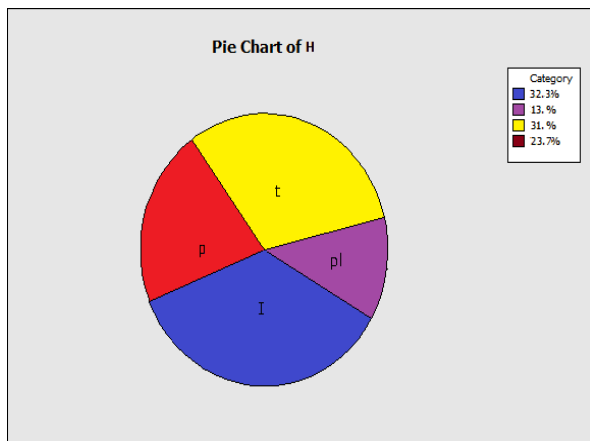
۴- نتایج و بحث

برای نمونه‌های طراحی شده در آرایه L9 تاگوچی، نتایج تست‌های کشش و سختی ویکرز سطح جوش در جدول (۵) آمده است. مشخص است که هرچه استحکام و سختی بیشتر باشد، کیفیت جوش بالاتر است، برای همین الگوی هرچه بزرگتر بهتر در تحلیل‌های S/N انتخاب شده است. در خصوص اختلاف کم بین داده‌های سختی بایستی به این نکته توجه نمود که با توجه به جنس انتخاب شده و همچنین فرآیند مورد نظر که جوشکاری نقطه‌ای است، انتظار تغییرات زیاد در میزان سختی وجود ندارد. البته این تغییرات کم قبلاً نیز توسط محققین دیگر برای شرایط و جنس‌های دیگری نیز گزارش شده است [۱۷، ۱۸].

جدول (۵) - نتایج تست‌های کشش و ریز سختی نمونه‌های جوشکاری شده

شماره آزمایش	I (kA)	t (Cycle)	P (Bar)	PL	Pmax (N)	H (VHN)
1	5	9	2	1	6250	274
2	5	10	2.2	2	6605	279
3	5	11	2.5	3	6500	278
4	6	9	2.2	3	6605	280
5	6	10	2.5	1	6700	282
6	6	11	2	2	6720	284
7	7	9	2.5	2	6685	281
8	7	10	2	3	6900	283
9	7	11	2.2	1	7000	286

مرکز جوش و سطح ورق وجود دارد. لذا در شدت جریان و زمان بیشتر، حرارت در مرکز جوش افزایش یافته و به سطوح ورق منتقل می‌شود که هر چقدر این انتقال حرارت بیشتر شود باعث تغییر ساختار بیشتر سطح جوش و تغییر سختی سطحی می‌شود.



شکل (۹) - نمودار درصد مشارکت فاکتورهای اصلی بر روی سختی

در جدول (۶) سطوح بهینه‌ی هر متغیر برای رسیدن به بالاترین استحکام ممکن در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در ورق‌های اینکونل 625 آورده شده است. سطوح بهینه برای سختی سطح در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول (۶) - سطح بهینه متغیرها برای رسیدن به بالاترین استحکام کششی

I (kA)	t (Sec)	P (Bar)	PL	P _{max} (N)
7	10	2.2	2	7015

جدول (۷) - سطح بهینه متغیرها برای رسیدن به بالاترین سختی

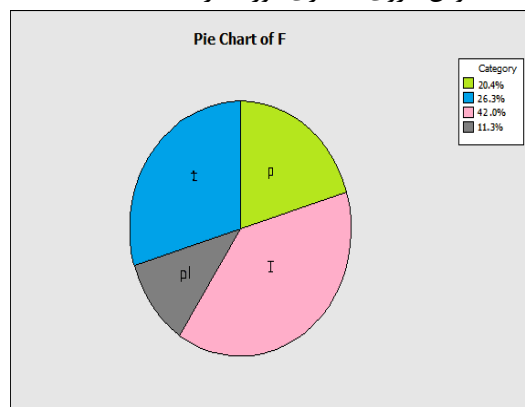
I (kA)	t (Sec)	P (Bar)	P L	H (VHN)
7	11	2.2	2	285.33

۴-۲- تحلیل آنوا و معادله‌ی رگرسیون

نتایج حاصل از تحلیل آنوا برای استحکام کششی در جدول (۸) آمده است. با توجه به این که اکثر مقادیر P-Value از 0.05 کمتر شده‌است، رابطه منطقی بین متغیرها و خروجی استحکام وجود دارد. از طرفی مقدار R-Sq(adj) بیان می‌کند که رابطه‌ای که از تحلیل رگرسیون به دست می‌آید حدود 97% قابلیت اعتماد دارد. در جدول (۹) نتایج تحلیل آنوا برای سختی ارائه شده است. مقدار R-Sq(adj) در این جدول بیانگر این موضوع است که حدود 89% داده‌ها توسط مدل به دست آمده پوشش داده شده‌اند. بالا بودن این ضریب، نشان دهنده کنترل پذیر بودن فرآیند و کاهش اثرات عوامل نویزی در سیستم است.

نتایج حاصل از تحلیل سیگنال به نویز سختی در شکل (۷) نشان داده شده است. با دقت در این شکل مشخص می‌شود که متغیر شدت جریان و زمان جوشکاری بیشترین تأثیر را در افزایش سختی دارند. تأثیر عامل شدت جریان الکتریکی و زمان جوشکاری تقریباً مشابه یکدیگر است به طوری که با افزایش هر دو عامل، سختی سطح جوش افزایش می‌یابد هر چند تأثیر جریان جوشکاری، کمی بیشتر از زمان می‌باشد. با افزایش زمان جوشکاری، مدت زمان لازم جهت تغییر ریز ساختار جوش و شرایط جهت ایجاد ریزساختار همگن تر فراهم می‌شود. افزایش شدت جریان با ایجاد گرمای بیشتر و در نتیجه افزایش مقدار فلز ذوب شده که این امر هم در جهت ایجاد ریز ساختار یکنواخت تر کمک کرده و نتیجه آن افزایش سختی سطح جوش می‌باشد. همچنین این موضوع بیان می‌کند که برای افزایش سختی، بیشتر باید به شدت جریان و زمان توجه داشت تا فشار و تعداد پالس.

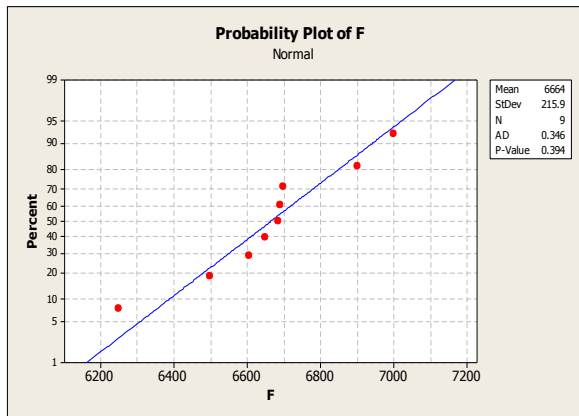
شکل (۸) درصد و رتبه‌ی تأثیر گذاری فاکتورهای مورد آزمایش را بر روی استحکام کششی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل شدت جریان با 42% بیشترین تأثیر گذاری را بر استحکام کششی دارد و بعد از آن زمان با 26.3%، فشار با 20.4% و تعداد پالس با 11.3% قرار دارد. بدلیل اینکه افزایش شدت جریان و زمان، باعث افزایش حرارت و ذوب شدن مقدار بیشتری از ماده در موضع جوش می‌شود و در نتیجه قطر دکمه جوش افزایش می‌یابد، تأثیر شدت جریان و زمان قابل پیش‌بینی است. بنابراین برای جدا کردن دو ورق از یکدیگر یا گسیختن دکمه جوش نیروی بیشتری مورد نیاز است.



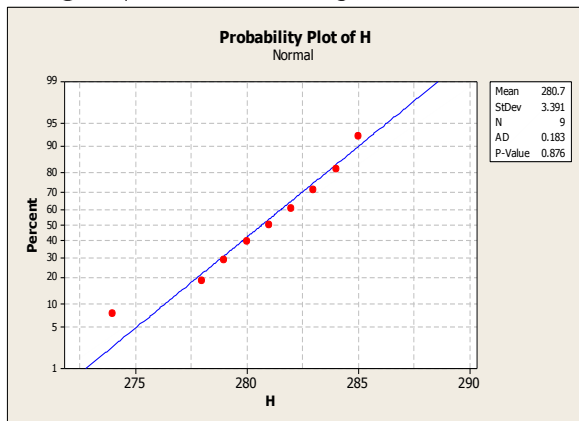
شکل (۸) - نمودار درصد مشارکت فاکتورهای اصلی بر روی استحکام کششی

درصد و رتبه تأثیر گذاری فاکتورهای ورودی آزمایش بر روی سختی در شکل (۹) نشان داده شده است. با توجه به این شکل شدت جریان با 32.3% بیشترین تأثیرگذاری را بر روی سختی دارد و بعد از آن زمان با 31%، فشار با 23.7% و تعداد پالس با 13% قرار دارد. به دلیل ضخامت ورق تفاوت دمایی بین

و رابطه رگرسیون قابل اعتمادتر است. با مشاهده شکلها مشخص می‌شود که شرایط برای هر دو خروجی ایده‌آل است.



شکل (۱۰) - نمودار توزیع باقیمانده‌ها برای استحکام کششی



شکل (۱۰) - نمودار توزیع باقیمانده‌ها برای سختی

با توجه به بررسی‌های فوق می‌توان انتظار داشت که رابطه‌های (۲) و (۳) به ترتیب مقدار خروجی استحکام و سختی را با دقت بالایی پیش‌بینی می‌کنند.

$$F = -17108.3 + 305 I + 2375 T + 8830 P + 9.16667 PL - 8.33333 I \times I - 113.333 T \times T - 1955.56 P \times P \quad (2)$$

$$H = -18.6667 + 25.1667 I + 18.8333 T + 100 P - 0.166667 PL - 1.83333 I \times I - 0.833333 T \times T - 22.2222 P \times P \quad (3)$$

۴-۳- تعامل بین متغیرها

تعامل، رابطه بین دو متغیر است که طی آن، تاثیر یکی از متغیرها بر خروجی، به میزان متغیر دیگر بستگی پیدا می‌کند. شکل (۱۲) تعامل‌های خروجی استحکام کششی را نمایش می‌دهد. در این نمودار، اعداد محور افقی مربوط به سطوح متغیرها و اعداد محور عمودی مربوط به استحکام کششی

جدول (۸) - آنالیز واریانس نتایج آزمون کشش

Source	D F	SS	MS	F	P-value	% variance
Regression	7	376 071	5372 4.4	3868 1.6	0.003 9150	-
I	1	252 150	1289 .0	928. 1	0.020 8894	42%
t	1	704 17	2817 9.6	2028 9.3	0.004 4693	26.3 %
P	1	0	2714 1.6	1954 2.0	0.004 5540	20.4 %
PL	1	504	504. 2	363. 0	0.033 3832	11.3 %
I*I	1	139	138. 9	100. 0	0.063 4510	-
T*T	1	256 89	2568 8.9	1849 6.0	0.004 6809	-
P*P	1	271 72	2717 1.9	1956 3.8	0.004 5514	-
Error	4	680 5	6805	1701	-	-
Total	8	376 072	-	-	-	-

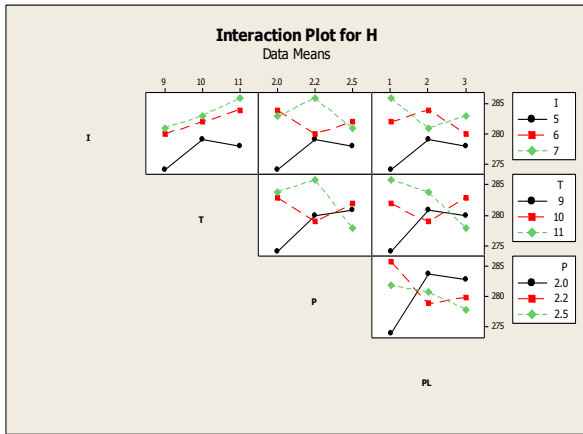
S = 41.2466 R-Sq = 98.67%
R-Sq(adj) = 97.33% R-Sq(pred) = 92.40%

جدول (۹) - آنالیز واریانس نتایج آزمون سختی

Source	D F	SS	MS	F	P-value	% variance
Regression	7	100. 167	14.3 095	10.3 029	0.235 540	-
I	1	60.1 67	8.77 64	6.31 90	0.241 035	32.3 %
t	1	28.1 67	1.77 20	1.27 58	0.461 325	31%
P	1	0.04 7	3.48 11	2.50 64	0.358 651	23.7 %
PL	1	0.16 7	0.16 67	0.12 00	0.787 704	13%
I*I	1	6.72 2	6.72 22	4.84 00	0.271 599	-
T*T	1	1.38 9	1.38 89	1.00 00	0.500 000	-
P*P	1	3.50 9	3.50 88	2.52 63	0.357 513	-
Error	4	1.38 9	1.38 89	-	-	-
Total	8	101. 556	-	-	-	-

S = 1.17851 R-Sq = 98.63%
R-Sq(adj) = 89.06% R-Sq(pred) = 92.25%

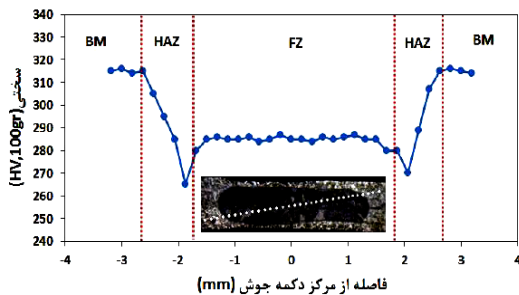
شکل (۱۰) و (۱۱) به ترتیب توزیع باقی مانده‌ها در خروجی استحکام کششی و خروجی سختی را نشان می‌دهند. در این نمودارها هرچه نقاط بیشتری روی خط رگرسیون باشند یا به این خط نزدیک باشند، نشان دهنده این است که نتایج دقیق‌تر



شکل (۱۳) نمودار تعامل اثرها در سختی

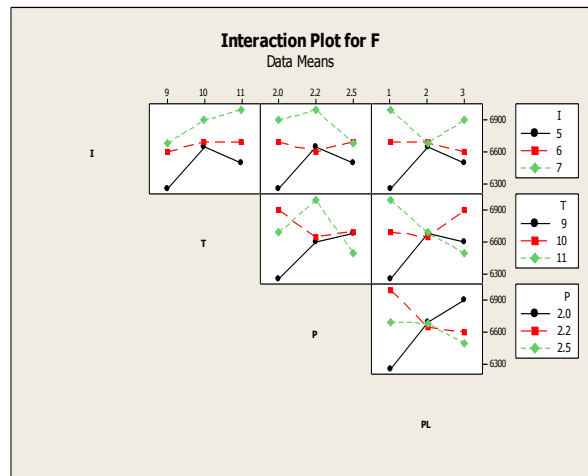
۴-۴- ریزسختی جوش‌ها

ریزسختی معیار کیفی است که نشان دهنده ریزساختار و فازهای موجود می‌باشد. پروفیل ریز سختی به دست آمده از نمونه جوشکاری شده با جریان جوشکاری 7 کیلو آمپر، مدت زمان جوشکاری 11 ثانیه، فشار 2.2 بار و تعداد یک پالس در شکل (۱۴) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی در مناطق متأثر از حرارت و منطقه‌ی دکمه جوش کمترین مقدار را دارد. البته سختی در منطقه دکمه جوش نسبت به منطقه متأثر از حرارت دارای مقادیر بالاتری است ولی از فلز پایه کمتر است. یکی از دلایل تغییرات سختی و استحکام در آلیاژ اینکونل 625، تشکیل رسوبات بسیار ریز [Ni₃(Nb,Mo)] یا [Ni₃(Nb,Al,Ti)] در زمینه آلیاژ است که با اعمال حرارت نسبتاً بالا در حین فرایند RSW این رسوبات درشت می‌شوند و در نتیجه سختی در مناطق حرارت دیده کاهش می‌یابد [۱۹]. دلیل دیگر کاهش سختی آن است که ورق پس از فرآیند نورد عملیات حرارتی آنیلینگ یا تنش‌زدایی نشده است، با انجام جوشکاری تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند کار سرد آزاد شده و سختی نواحی مختلف جوش کاهش می‌یابد. همچنین کاهش سختی در منطقه متأثر از حرارت را می‌توان به پدیده تبلور مجدد و رشد دانه‌ها وابسته دانست.



شکل (۱۴) - پروفیل سختی در امتداد قطری

است. اگر خطوط موجود در یک نمودار با یکدیگر موازی باشند، بدان معنی است که تعاملی بین متغیرها وجود ندارد. هر چه خطوط موجود در یک نمودار به دفعات بیشتر و با شیب بیشتری یکدیگر را قطع کنند، تعامل بالاتر و اثربخش‌تری بین متغیرها وجود دارد. وجود تعامل‌های مختلف برای یک خروجی به این معنا می‌باشد که برای اثربخش بودن تغییر سطح یک متغیر، باید به سطح سایر متغیرها هم توجه داشت. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، خطوط تعامل‌های شدت جریان- تعداد پالس، زمان- تعداد پالس و فشار-تعداد پالس، هم شیب تندی دارند، هم به دفعات بیشتری نسبت به سایر تعامل‌ها یکدیگر را قطع کرده‌اند. این امر نشان دهنده این موضوع است که تعامل‌های ذکر شده، اثر بیشتری در تغییرات استحکام دارند و باید بیشتر به آنها توجه شود. برای نمونه اگر به تعامل شدت جریان- تعداد پالس دقت شود، مشخص می‌شود که تاثیر تعداد پالس بر استحکام کششی به شدت جریان جوشکاری وابسته است. بدین صورت که برای شدت جریان 5kA در تعداد پالس دو استحکام ماکزیمم شده در حالی که برای شدت جریان 7kA در تعداد پالس دو استحکام مینیمم شده است.



شکل (۱۲) - نمودار تعامل اثرها در استحکام

تعامل‌های خروجی سختی در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با دقت در این شکل می‌توان پی برد که تعامل‌های فشار- زمان، فشار- تعداد پالس و زمان- تعداد پالس اثر بیشتری در تغییرات سختی سطح دارند. برای نمونه اگر به تعامل فشار- تعداد پالس دقت شود، مشخص می‌شود که تاثیر تعداد پالس بر سختی سطح به فشار وابسته است. بدین صورت که برای فشار 2Bar در تعداد پالس دو سختی سطح ماکزیمم شده در حالی که برای فشار 2.2Bar در تعداد پالس دو سختی سطح مینیمم شده است.

on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry," *Materials & Design*, vol. 27, pp. 125-131, 2006.

[7] R. Florea, K. Solanki, D. Bammann, J. Baird, J. Jordon, and M. Castanier, "Resistance spot welding of 6061-T6 aluminum: Failure loads and deformation," *Materials & Design*, vol. 34, pp. 624-630, 2012.

[8] Ó. Martín, P. De Tiedra, and M. López, "Artificial neural networks for pitting potential prediction of resistance spot welding joints of AISI 304 austenitic stainless steel," *Corrosion Science*, vol. 52, pp. 2397-2402, 2010.

[9] H. Yang, Y. Zhang, X. Lai, and G. Chen, "An experimental investigation on critical specimen sizes of high strength steels DP600 in resistance spot welding," *Materials & Design*, vol. 29, pp. 1679-1684, 2008.

[10] F. Khodabakhshi, M. Kazeminezhad, and A. Kokabi, "Resistance spot welding of ultra-fine grained steel sheets produced by constrained groove pressing: Optimization and characterization," *Materials Characterization*, vol. 69, pp. 71-83, 2012.

[11] R. Florea, D. Bammann, A. Yeldell, K. Solanki, and Y. Hammi, "Welding parameters influence on fatigue life and microstructure in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy," *Materials & Design*, vol. 45, pp. 456-465, 2013.

[12] H. R. Rezaei, R. Zarandooz, and M. Sohrabian, "The numerical investigation of influence of electrode diameter on nugget diameter and thermal distribution in the resistance spot welding (RSW) of Inconel 625," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 15, pp. 116-124, 2015. (In Persian)

[13] F. Mirzaei, H. Ghorbani, and F. Kolahan, "Numerical modeling and optimization of joint strength in resistance spot welding of galvanized steel sheets," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, pp. 34-89-3501, 2017.

[14] S. K. Vshwakarma, A. Shrivastava, and S. Singh, "Optimization of Resistance Spot welding Parameters Using Taguchi Method," *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, vol. 3, pp. 506-513, 2017.

[15] M. Safari, H. Mostaan, H. Y. Kh, and D. Asgari, "Effects of process parameters on tensile-shear strength and failure mode of resistance spot welds of AISI 201 stainless steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, pp. 1853-1863, 2017.

۵- نتیجه‌گیری

• پس از بررسی پارامترهای مؤثر بر جوش نقطه‌ای در سوپر آلیاژ اینکونل 625، نتایج تحلیل‌ها را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود: - در بین پارامترهای مؤثر بر جوش نقطه‌ای، شدت جریان بیشترین تأثیر را بر استحکام جوش نقطه‌ای دارد.

• در بین پارامترهای مؤثر بر جوش نقطه‌ای، به ترتیب شدت جریان و زمان بیشترین تأثیر را بر سختی سطح دارند.

• افزایش تعداد پالس‌ها باعث تغییر کمی در سختی و استحکام نقطه جوش می‌شود ولی استفاده از تعداد دو پالس نسبت به استفاده از حالت تک پالسی (آنچه در صنعت معمول است) مناسب‌تر است.

• افزایش عامل فشار، ابتدا سختی و استحکام کششی نقطه‌جوش را افزایش می‌دهد، اما اگر فشار از حد معینی بیشتر گردد منجر به کاهش سختی و استحکام کششی نقطه‌جوش خواهد شد.

• اثر تعامل‌های شدت جریان-تعداد پالس، زمان-تعداد پالس و فشار-تعداد پالس، بیشترین تأثیر را بر استحکام کششی جوش دارند.

• تعامل‌های فشار- زمان، فشار-تعداد پالس و زمان-تعداد پالس اثر بیشتری در تغییرات سختی سطح دارند.

۶- مراجع

[1] V. Onar and S. Aslanlar, "Welding Time Effect of Welding Joints in Micro Alloyed and TRIP 800 Steels in Resistance Spot Welding," *Acta Physica Polonica A*, vol. 131, pp. 389-391, 2017.

[2] V. Onar, S. Aslanlar, and N. Akkaş, "Effect of Welding Current on Tensile-Peel Loading of Welding Joints in TRIP 800 and Micro-Alloyed Steels in Resistance Spot Welding," *Acta Physica Polonica A*, vol. 132, pp. 822-824, 2017.

[3] J. Senkara, H. Zhang, and S. Hu, "Expulsion prediction in resistance spot welding," *Welding Journal-New York-*, vol. 83, pp. 123-S, 2004.

[4] H. Eisazadeh, M. Hamedi, and A. Halvaei, "New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using finite element method," *Materials & Design*, vol. 31, pp. 149-157, 2010.

[5] Y. Luo, J. Liu, H. Xu, C. Xiong, and L. Liu, "Regression modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheet," *Materials & Design*, vol. 30, pp. 2547-2555, 2009.

[6] S. Aslanlar, "The effect of nucleus size

[16] S. Faiyaz and M. J. Borke, "The Experimental Investigation and Analysis of Spot Welding Process Parameters for Maximum Tensile Strength," International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology, vol. 3, pp. 397-402, 2017.

[17] H. Kazdal Zeytin, H. Ertek Emre, and R. Kaçar, "Properties of Resistance Spot-Welded TWIP Steels," Metals, vol. 7, p. 14, 2017.

[18] M. Pouranvari, "Effect of Resistance Spot Welding Parameters on the HAZ Softening of DP980 Ferrite-Martensite Dual Phase Steel Welds," World Applied Sciences Journal, vol. 15, pp. 1454-1458, 2011.

[19] K. H. Song and K. Nakata, "Mechanical properties of friction-stir-welded inconel 625 alloy," Materials transactions, vol. 50, pp. 2498-2501, 2009.