



Electroplastic friction stir spot welding for joining AA6061-T6 aluminum to galvanized DP590 steel

A. Barimani-Varandi, A. Jalali Aghchai*

Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: The friction stir spot welding has shown great potential for joining low-ductility aluminum to high-strength steels. In the last decade, wide researches were done to achieve high strength and tool life enhancement in friction stir spot welding. The electroplastic effect, with its environmentally friendly nature and high efficiency, has resulted in a reduction of flow stress and tool wear, improvement of plasticity and material flow for various processes. On the other hand, adding nanoparticles to the friction stir spot welded area joint increased the tool wear despite the improved strength. In this paper, the joint strength and spindle output power are investigated in electroplastic friction stir spot welding process for joining of AA6061-T6 with 1 mm thickness to DP590 steel sheet of 1.5 mm. A 2^k design was used for statistical analysis considering four parameters of rotational velocity (1000, 2000 rpm), dwell time (2, 4s), electrical current (250, 500A), and adding SiC reinforcing nanoparticles. A quantitative study of the current density was performed by the finite element code with thermal-electric coupling. Results showed that electroplastic effect had a compatible impact with nanoparticles on strength improvement by accelerating the occurrence of dynamic recovery and recrystallization, and neutralized the negative effect of nanoparticles on tool life since created joints with failure loads above 7 kN.

Review History:

Received: Jul. 05, 2020

Revised: Nov. 07, 2020

Accepted: Nov. 14, 2020

Available Online: Nov. 26, 2020

Keywords:

Joining

Electroplastic friction stir spot welding

Al/St joint

Failure load

Failure mode.

1- Introduction

Reducing the emissions as well as increasing the fuel efficiency request the wide use of lightweight aluminum alloys in the automotive industry. However, aluminum alloys are not completely replaceable with steels since the cost, performance, formability, and joining problems. So, the hybrid use of aluminum alloys and high strength steel alloys is an inevitable trend for fabricating lightweight assemblies made in aluminum to steel (Al/St) [1, 2]. To overcome the joining difficulties, in 2003, Friction Stir Spot Welding (FSSW) with the solid-state mechanism was first used in the Al/St assemblies for the rear door of the Mazda MX-5 [3].

In electrically-assisted processes, the effect of electrical current on the mechanical behavior of metal materials during the process is termed an electroplastic effect. This effect was firstly assessed and reported by Troitskii and Likhtman in 1963 [4]. The current density is applied to assess the amount of electric current passing through the cross-section. Significant changes will occur in the material behavior at the threshold current values of the current density [5]. Theories related to the electroplastic effect are divided into two groups of thermal and athermal effects [6]. Since most electroplastic manufacturing processes are performed at low temperatures, the athermal effect will be much more interesting.

According to the literature review, the reduction of the plunge force during creating the nanocomposite needs to be

*Corresponding author's email: jalali@kntu.ac.ir

investigated for FSSW process. So, the athermal effect of the electroplasticity on the applied force on the tool, failure load and mode, and the addition of the nanoparticles in the FSSW process should be studied. In this paper, the ElectroPlastic Friction Stir Spot Welding (EPFSSW) process is investigated by adding SiC nanoparticles to join the AA6061-T6 to galvanized DP590 steel. The main purpose of this paper is to simultaneously achieve high strength joints and increase tool life with the help of EPFSSW process. For this purpose, a 2^k factorial design was used for the statistical analysis and modeling of the four process parameters. The finite element code was generated with a thermal-electrical coupling to assess the current density. In addition, the electroplastic effect on the failure force and load, microstructure, and output power of the spindle was experimentally investigated.

2- Methodology

In all experiment, the upper AA6061-T6 sheet with a thickness of 1 mm was FSSWed to the lower DP590 + Z140 steel with a sheet thickness of 1.5 mm. The tungsten carbide (WC) tool with 10% cobalt and hardness of 90 HRA was made by a simple cylindrical pin with a diameter of 4.6 mm and a shoulder diameter of 16 mm. To achieve a strong joint, the pin with a length of 1.6 mm with a penetration depth of 0.7 mm into the steel sheet was utilized. Also, to perform the process by applying nano powder, SiC nanoparticles with a diameter of 45-65 nm were used.



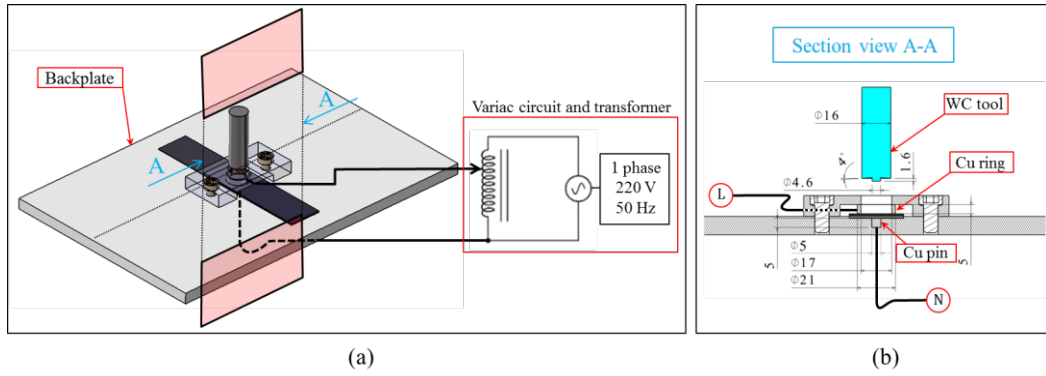


Fig. 1. (a) Schema of the electrically-assisted equipment and (b) longitude section with dimensions (mm)

The employment of alternating current 500 A started as the tool touched the aluminum sheet and was stopped after 10 s. The electrical current was manually adjustable by a variac connected to the transformer and a digital clamp meter. Fig. 1 schematically shows the electrically-assisted tools.

To quantify the current density generated by electrical current, the finite element code of ABAQUS/CAE 6.16 software with thermal-electric coupling and standard solver was utilized. The parts were discretized with the DC3D8E linear element with 8 nodes and degrees of freedom of temperature and electricity.

Planning the 2^k factorial design, statistical study and analysis of variance (ANOVA) considering three continuous parameters of rotational speed (A), dwell time (B), electrical current (C), and addition of SiC nano powder (D) as categorical factor, were performed using MINITAB 19 statistical software (Table 1).

It is noteworthy that in order to eliminate the effects of noise and reduce experimental errors, experiments were performed randomly with two replicates to extract the outputs of failure load and relative output power.

3- Results and Discussion

3- 1- Statistical analysis of DOE

Subsequent to assess the importance of all parameters, the model can be created by deleting insignificant terms. According to the ANOVA, the main parameters of dwell time, rotational speed, electrical current and SiC addition, respectively, had the greatest impact on the failure load. Additionally, the linear regression equation for the failure load is as follows:

$$F = -4468.3 + 927.2 A + 1426.6 B + 341.2 C + 216 D + 60.6 A \times B - 19.1 A \times C + 21.2 A \times D + 118.9 B \times C + 82.1 B \times D - 25.4 C \times D - 82.5 A \times C \times D - 68.9 B \times C \times D \quad (1)$$

In the study of output power effect, the main parameters of rotational speed, electrical current and powder had the most impact, respectively. The dwell time did not affect this output. The linear regression equation for the relative output power obtained from ANOVA is as follows:

$$P = 51.094 + 9.094 A - 0.219 B - 6.719 C + 2.906 D + 1.031 A \times B - 0.844 A \times C + 0.781 A \times D - 0.031 B \times C - 0.781 B \times D + 1.219 C \times D - 0.656 A \times B \times D + 0.531 B \times C \times D \quad (2)$$

3- 2- Distribution of current density

The distribution for the current density at the electrical current of 500 A is predicted in Fig. 2. Although the current density for the aluminum side is lower than that of the steel sheet; according to the theory of magnetoplasticity, the passage of electrical current can facilitate the movement of dislocations by creating a magnetic field, reducing flow stress, and thus improving material flow [7]. Besides, it is expected that the higher resistance of steel generates larger electroplastic effect. For the steel sheet, the maximum current density was about 45 A/mm² at 500 A, which is higher than the threshold current density of DP590. As a result, the athermal effect of the electroplasticity promises useful merits includes that reducing the plunge force and increasing the strength obtained from grain refinement.

Table 1. Limits of the parameters

Factors	Low (-1)	High (+1)
Rotational velocity (rpm)	1000	2000
Dwell time (s)	2	4
Electrical current (A)	0	500
SiC nanoparticles	No	Addition

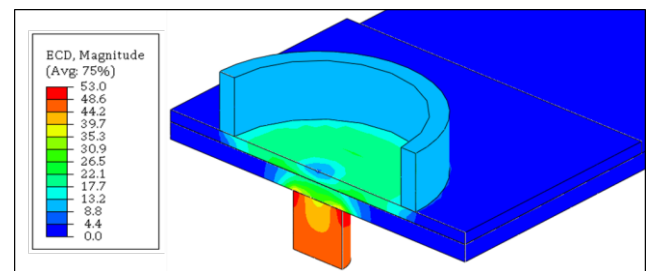


Fig. 2. Current density distribution at 500 A

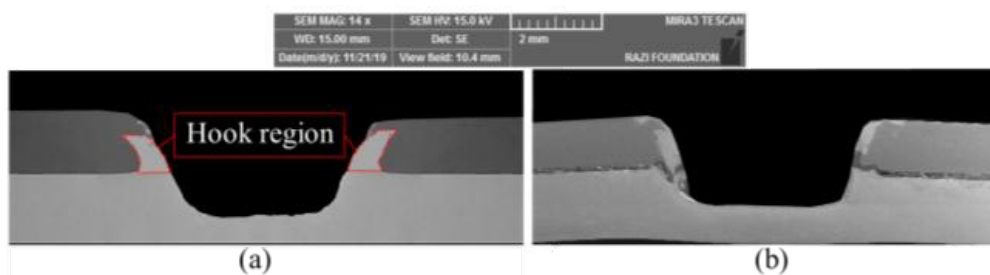


Fig. 3. Comparison of FE-SEM photograph of the joint cross-section for (a) I-SiC effects and (b) no effect.

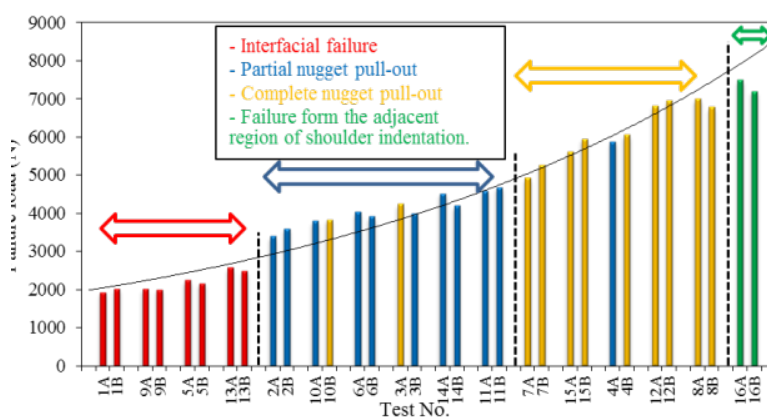


Fig. 4. Failure mode changes with increasing failure load

3- 3- Microstructure

According to the statistical results, adding the nanoparticles increased the average failure load and relative output power by 10 and 12%, respectively. The increase in the joint strength, as well as the force exerted on the tool, is due to the formation of the nanocomposite. Also, the experiments in the case of applying current density resulted in an increase of about 17% in the failure load and a 30% decrease in the relative output power, respectively. This dramatic reduction greatly affects tool wear and increases tool life. The athermal effect of electroplasticity increased the tool life with the occurrence of early recrystallization at low speeds; thus making it possible to achieve the desired strength. Furthermore, Figure 3 compares the simultaneous effect of electroplastic effect and nanoparticle addition (I-SiC) on the cross-section of the joint.

As is observed, in the case of simultaneous application of electrical current and nanoparticles, the improvement of plasticity and materials flow due to the electroplastic effect had led to the formation of a more continuous and complete hook area.

3- 4- Failure mode

Four failure modes were observed during the tensile shear testing of the FSSWed joints. Fig. 4 shows the failure load changes and modes. As depicted, the strongest joint of test

number 16 failed with a fracture from the adjacent region of shoulder indentation. This experiment was performed at high levels of all parameters (Table 1).

This failure mode has never been reported in the FSSW of Al/St sheets [8, 9]. In this failure mechanism, the applied force overcomes the shear strength of aluminum in the region adjacent to the shoulder indentation; thus causes single-sided tensile failure. This mechanism confirms the creating of very strong joint by achievement of failure loads above 7 kN. In fact, in this experiment (No. 16), at a rotational speed and dwell time lower than other sources [10], suitable conditions in terms of grain size, diffusion and geometry of the hook area were created with the help of interaction effect of electroplasticity and nanoparticles addition.

4- Conclusions

The results showed that adding the SiC particles to the weld nugget can lead to the diffusion of the particles in the grain boundaries and the formation of the nanocomposite which reduced the tool life in addition to raising the failure load. The athermal effect of the electroplasticity accelerated the occurrence of recovery and recrystallization. Therefore, a fine-grained coaxial microstructure was observed in the stirring zone. Additionally, simultaneous application of electrical current and nanoparticles caused a significant

increase of about 27% in the average failure load and a decrease of 13 % in the relative output power. As a result, it can be concluded that the electroplastic effect is complementary to the influence of the reinforcing nanoparticles which their positive effects are intensified on the joint strength. Besides, the strongest joints failed at the upper bound of the parameters with a failure load above 7 kN.

References

- [1] A. Barimani-Varandi, The non-isothermal hot deep drawing of AA5083 aluminum alloy, *Mechanics & Industry*, 21(1) (2020) 112.
- [2] A. Barimani-Varandi, A.J. Aghchai, Electrically-assisted mechanical clinching of AA6061-T6 aluminum to galvanized DP590 steel: effect of geometrical features on material flow and mechanical strength, *Mechanics & Industry*, 21(5) (2020) 529.
- [3] A. Automation, Mazda develops world's first steel and aluminium joining technology using friction heat, (2005).
- [4] O. Troitskii, V. Likhtman, The anisotropy of the action of electron and gamma radiation on the deformation of zinc single crystals in the brittle state, in: *Soviet Physics Doklady*, 1963, pp. 91.
- [5] H. Conrad, Electroplasticity in metals and ceramics, *Materials Science and Engineering: A*, 287(2) (2000) 276-287.
- [6] B.J. Ruzkiewicz, T. Grimm, I. Ragai, L. Mears, J.T. Roth, A review of electrically-assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(11) (2017).
- [7] M. Molotskii, V. Fleurov, Magnetic effects in electroplasticity of metals, *Physical review B*, 52(22) (1995) 15829.
- [8] T. Pan, A. Joaquin, D.E. Wilkosz, L. Reatherford, J.M. Nicholson, Z. Feng, M.L. Santella, Spot friction welding for sheet aluminum joining, in: *Proceedings of the 5th international symposium of friction stir welding*, Metz, France, 2004.
- [9] A. Sakhaei, M. Kazemi Nasrabadi, A. Jalali Aghchai, A. Barimani-Varandi, Optimization of friction stir spot welding process parameters to achieve maximum failure load, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 5(1) (2018) 13-27 (in Persian).
- [10] K. Chen, X. Liu, J. Ni, Keyhole refilled friction stir spot welding of aluminum alloy to advanced high strength steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 249 (2017) 452-462.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Barimani-Varandi, A. Jalali Aghchai, . Electroplastic friction stir spot welding for joining AA6061-T6 aluminum to galvanized DP590 steel, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(6)(2021) 885-888.

DOI: [10.22060/mej.2020.18678.6876](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18678.6876)





جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی الکتروپلاستیک برای اتصال دهی آلومینیوم T۶-۶۰۶۱ به فولاد گالوانیزه دو فازی ۵۹۰

ابوذر بریمانی ورندی، عبدالحسین جلالی آقچای*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۵
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۱۷
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۹/۰۶

کلمات کلیدی:

اتصال دهی
اثر الکتروپلاستیک
اتصال آلومینیوم-فولاد
نیروی شکست
حالت شکست.

خلاصه: جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی توانایی بالایی در اتصال دهی آلومینیوم‌های کم‌شکل‌پذیر به فولادهای مستحکم نشان داده‌است. در این فرآیند تحقیقات گسترده‌ای جهت دستیابی به استحکام بالا و همچنین افزایش عمر ابزار در دهه اخیر انجام شد. اثر الکتروپلاستیک در انواع فرآیندها با ماهیت دوستدار محیط زیست و راندمان بالا، سبب کاهش تنش سیلان و سایش ابزار، بهبود رفتار پلاستیسیته و جریان مواد شده‌است. از طرفی افزودن نانوذرات بر ناحیه اتصال، علی‌رغم بهبود استحکام، سبب افزایش سایش ابزار شد. در این مقاله استحکام اتصال و توان خروجی اسپیندل در جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی الکتروپلاستیک برای اتصال دهی آلومینیوم T۶-۶۰۶۱ با ضخامت ۱ mm به فولاد دو فازی ۵۹۰ ورق ۱/۵ mm بررسی شد. برای تحلیل آماری از طرح 2^k با لحاظ چهار پارامتر سرعت دورانی (۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ rpm)، زمان ماند (۲ و ۴ s)، جریان الکتریکی (۲۵۰ و ۵۰۰ A) و افزودن نانوذرات تقویتی کاربرد سیلیسیم استفاده گردید. مطالعه کمی چگالی جریان توسط کد اجزای محدود با کوپل حرارتی-الکتریکی انجام شد. نتایج نشان داد که اثر الکتروپلاستیک با تسریع در وقوع بازیابی و تبلور مجدد، تأثیری همسو با نانوذرات بر بهبود استحکام داشته و اثر منفی نانوذرات بر عمر ابزار را خنثی کرده و اتصال‌هایی با نیروی شکست بیش از ۷ kN ایجاد کرد.

۱- مقدمه

روش جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی^۲ با ماهیت جوشکاری حالت جامد برای نخستین بار در اتصال آلومینیوم-فولاد در درب عقب مزدا ام ایکس-۵^۳ مورد استفاده قرار گرفت. در این اتصال ابزار دوار تنها در ورق بالایی نفوذ کرد [۳]. این فرآیند برگرفته از فرآیند جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی است. در اتصال آلومینیوم-فولاد به کمک فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی، با توجه به نفوذ و یا عدم نفوذ پین به درون ورق پائینی، شرایط استحکامی متفاوتی ایجاد می‌شود. عدم نفوذ پین به درون ورق فولادی تنها به ایجاد پیوند متالورژیکی می‌انجامد. درحالی‌که نفوذ پین به درون ورق پائینی، با ایجاد ناحیه قلاب، پیوندهای مکانیکی را نیز به همراه خواهد داشت. در شکل ۱ مراحل مختلف فرآیند، سطح مقطع ایجاد شده و نواحی شکل‌گرفته برای ابزار دوار نافذ به درون ورق پائینی نشان داده شده‌است. اتصالات ایجاد شده در فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی

از دو دهه گذشته جایگزینی قطعات فولادی خودرو با قطعات چندجنسی، مورد توجه زیادی قرار گرفته‌است. استفاده ترکیبی آلیاژهای آلومینیومی و فولادهای استحکام بالا، به یک راه‌حل اجتناب‌ناپذیر جهت کاهش وزن خودرو تبدیل شده‌است. لزوم به‌کارگیری مجموعه‌های سبک وزن ساخته شده از آلیاژهای آلومینیوم-فولاد^۱، نیازمند بهره‌گیری از روش‌های نوین اتصال دهی است. فرآیند اتصال دهی جوشکاری مقاومتی با ماهیتی ذوبی، به عنوان پرکاربردترین روش اتصال دهی نقطه‌ای در صنعت خودرو نقشی کلید ایفا می‌کند. در کاربرد این فرآیند برای اتصال آلومینیوم-فولاد، مشکلات زیادی شامل اعوجاج شدید حرارتی، رفتار حرارتی و الکتریکی متفاوت، وقوع لایه‌های اکسیدی آلومینیوم، شکل‌گیری ترکیبات بین فلزی ترد در سطح تماس، ایجاد ترک و تخلخل گزارش شده‌است [۱، ۲]. برای غلبه بر مشکلات ذکر شده، در سال ۲۰۰۳

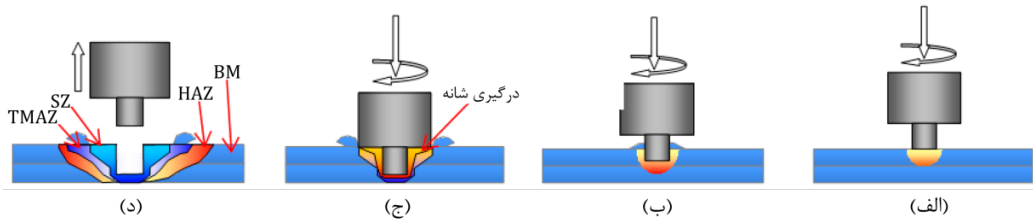
2 Friction stir spot welding (FSSW)

3 MX-5

1 Al/St

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: jalali@kntu.ac.ir





شکل ۱. مراحل مختلف فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی (الف) نفوذ پین در ورق بالایی، (ب) اغتشاش و غوطه‌وری پین، (ج) درگیری شانه و نفوذ ابزار به ورق پایینی و (د) توقف در انتهای عمق نفوذ و برگشت ابزار.

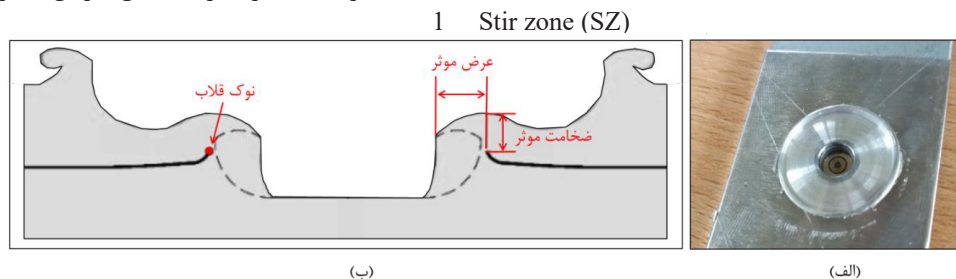
Fig. 1. Various stages of the FSSW process (a) pin penetration in the upper sheet, (b) stirring and plunge of the pin, (c) shoulder touch and tool penetration in the lower sheet, and (d) stop at the end of the penetration depth and return of the tool

نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی ورق‌های آلومینیوم، با تغییر عمق نفوذ سه حالت شکست بین‌سطحی^۵، محیطی^۶ و جدایش دکمه جوش را مشاهده کردند [۴]. در برخی منابع از عناوین دیگری همچون شکست از ناحیه تورفتگی شانه، شکست از ناحیه مجاور تورفتگی شانه و جدایش ناقص دکمه جوش در ورق بالایی گزارش شده‌است. در تحقیق مرزوق و همکاران بیان شد که حالت شکست در جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی توسط ضخامت ورق‌ها، قطر جوش و استحکام موضعی اتصال قابل پیش‌بینی است [۵].

برای انجام فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی در اتصال‌های آلومینیوم-فولاد، در اثر حرارت اصطکاکی ایجاد شده و تغییر شکل مومسان شدید در مرحله نفوذ ابزار به درون ورق فولادی، نیروی فروری و تنش بزرگی به ابزار وارد می‌شوند. لذا سایش شدید ابزار و همچنین چسبندگی مواد به سطح شانه سبب کاهش چشمگیر عمر ابزار می‌گردد. جهت کاهش نیروهای وارد بر ابزار روش‌های کمکی گوناگونی همچون بکارگیری لیزر [۶]، آلتراسونیک [۷]، حرارت‌دهی القایی [۸] و جریان الکتریکی [۹، ۱۰] در فرآیندهای اغتشاشی اصطکاکی و همچنین شکل‌دهی [۱۱] استفاده شدند. مزایای بسیاری برای اعمال جریان الکتریکی نسبت به سایر روش‌های

به چهار ناحیه مجزا شامل ناحیه اغتشاش^۱، ناحیه متأثر از حرارت-کار مکانیکی^۲، ناحیه متأثر از حرارت^۳ و فلز پایه^۴ طبقه‌بندی می‌شود. در ناحیه اغتشاش اغلب با وقوع بازیابی و تبلور مجدد، دانه‌ها در ابعاد بسیار کوچک و هم محور ایجاد می‌شوند. در منطقه متأثر از حرارت-کار مکانیکی مواد تحت تغییر شکل پلاستیک قرار گرفته، اما به دلیل عدم وجود حرارت کافی تبلور مجدد در دانه‌ها رخ نمی‌دهد. در ناحیه متأثر از حرارت مواد تحت تأثیر حرارت ناشی از اصطکاک و جریان مواد قرار گرفته که نتیجه آن رشد دانه‌ها و کاهش خواص مکانیکی مواد است.

برای اتصال‌های جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی با پین نافذ به ورق پایینی، با ایجاد ناحیه قلاب ترکیبی از پیوندهای متالورژیکی و مکانیکی ایجاد می‌شود. ناحیه قلاب با نفوذ پین به ورق پایینی و جریان رو به بالای مواد زیر پین ایجاد شده و سبب ایجاد درون قفل مکانیکی می‌شود. در واقع قلاب ناحیه‌ای است که ورق بالایی را از پایینی جدا می‌کند. نوک قلاب نیز محل شکل‌گیری ترک و شکست است. هندسه ناحیه قلاب و مقادیر عرض و ضخامت موثر، تأثیر بسزایی در آغاز ترک و گسترش آن دارد (شکل ۲). پین و همکاران در اتصال‌دهی جوشکاری



شکل ۲. (الف) اتصال ایجاد شده توسط فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی و (ب) طرح‌واره مقطع عرضی اتصال

Fig. 2. (a) FSSWed joint and (b) schema of the joint cross section

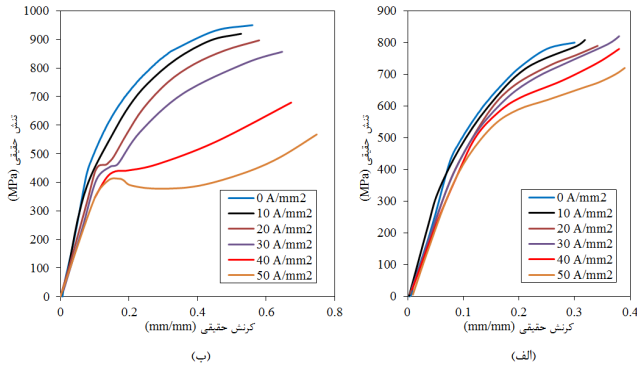
5 Interfacial
6 circumferential

2 Thermo-mechanically affected zone (TMAZ)
3 Heat affected zone (HAZ)
4 Base metal (BM)

جدول ۱. ترکیب شیمیایی مواد ورق‌ها

Table 1. Chemical composition of sheets material

Ti	Zn	Cr	Mg	Mn	Cu	C	Si	P	S	Fe	Ni	Al	N	Sn	ورق
۰/۱۱	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۹۳	۰/۰۹	۰/۲۰	-	۰/۷۲	-	-	۰/۵۸	-	پایه	-	-	آلومینیوم ۶۰۶۱-T6
-	-	۰/۰۲	-	۱/۰۱	۰/۰۲ >	۰/۰۹	۰/۲۸	۰/۰۱	۰/۰۱	پایه	۰/۰۲ >	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۱	فولاد دو فازی ۵۹۰



شکل ۳. منحنی تنش-کرنش با اعمال چگالی جریان (الف) آلومینیوم DP ۵۹۰ و (ب) فولاد ۶T-۶۰۶۱

Fig. 3. Stress-strain diagram with applying current density for (a) AA6061-T6 and (b) DP590 steel

و سایش ابزار را گزارش کردند [۱۷]. کای چن و همکاران [۱۰] جریان مواد و ترکیبات بین فلزی را در فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی به کمک جریان الکتریکی بررسی کردند. قابل ذکر است که در فرایندهای جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی با اعمال نانوذرات کاربید سیلیسیم، علی‌رغم گزارش افزایش چشمگیر استحکام، سختی ذاتی پودر سبب افزایش نیرو فروروی می‌شود [۱۸-۲۰].

طبق مطالعه پیشینه پژوهش، کاهش نیروی فروروی ابزار برای فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی در حین ایجاد نانو کامپوزیت نیازمند بررسی است. همچنین بررسی تاثیر غیرحرارتی اثر الکتروپلاستیک بر نیروی وارد بر ابزار، نیرو و حالت شکست و اعمال نانوذرات در فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی نیازمند مطالعه است. در این مقاله فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی الکتروپلاستیک^۷ با اعمال نانوذرات کاربید سیلیسیم^۸ برای اتصال دهی آلومینیوم ۶T-۶۰۶۱ به فولاد گالوانیزه دو فازی ۵۹۰^۹ بررسی می‌شود. هدف اصلی این مقاله دستیابی همزمان به استحکام

کمکی شامل سهولت اجرا، کیفیت نهایی مناسب، مقرون به صرفه بودن، صرفه در مصرف انرژی، دوستی محیط زیست و بهره‌وری اقتصادی بالا گزارش شده است [۱۲]. در فرآیندهایی که به کمک جریان الکتریکی انجام می‌شوند، تاثیر جریان الکتروپلاستیک بر رفتار مکانیکی مواد فلزی در حین فرآیند با عنوان اثر الکتروپلاستیک^۱ ذکر می‌شود. این اثر اولین بار توسط تروپلاستکی و لیختمن [۱۳] در سال ۱۹۶۳ میلادی بررسی و گزارش شد. برای سنجش مقدار جریان الکتریکی عبوری از سطح مقطع، از چگالی جریان با واحد A/mm² استفاده می‌شود. در چگالی جریان با مقادیر بیشتر از مقدار آستانه، تغییرات چشمگیری بر رفتار مواد ایجاد خواهد شد. نظریه‌های مرتبط با اثر الکتروپلاستیک به دو گروه حرارتی^۲ و غیر حرارتی^۳ تقسیم می‌شوند. مطالعات تاثیر حرارتی طبق نظریه ژول، نرم‌شدگی حرارتی را بررسی می‌کنند. در اثر غیرحرارتی نیز نظریه‌هایی شامل وزش الکترون^۴، فروپلاستیسیت^۵ و انحلال پیوندهای فلزی بررسی می‌شود [۱۱]. از آنجایی که اغلب فرآیندهای الکتروپلاستیک در دماهای پایین انجام می‌شوند، لذا اثر غیرحرارتی الکتروپلاستیک بسیار پررنگ‌تر خواهد بود. اصغر و ردی [۱۴] آلیاژ تیتانیوم را که در دماهای بیشتر از ۸۰۰ °C معمولاً شکل‌دهی می‌شوند، به کمک اثر غیرحرارتی الکتروپلاستیک در دمای ۴۷ °C با موفقیت شکل‌دهی تدریجی کردند. وانگ [۱۵] نشان داد که تبلور مجدد برای آلیاژ منیزیمی ای زد ۳۱^۶ در دماهای بسیار کمتر (۲۰۰ °C) از کشش داغ سنتی (۳۵۰ °C) حادث شد. از طرفی اثر غیرحرارتی الکتروپلاستیک معایبی رایج در شکل‌دهی داغ همچون تنش حرارتی، تابیدگی، اکسایش و عدم کنترل را نیز مرتفع می‌سازد [۱۶]. تحقیقات زیادی نیز در فرآیندهای جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی به کمک جریان برق، کاهش نیروی فروروی

- 1 Electroplasticity
- 2 Thermal
- 3 Athermal
- 4 Electron wind
- 5 Magnetoplasticity
- 6 AZ31

7 Electroplastic Friction Stir Spot Welding (EPFSSW)

8 SiC

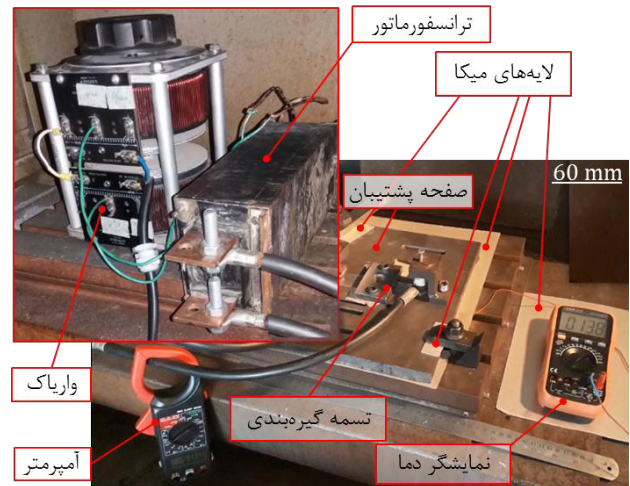
9 Dual-phase 590 (DP590)

(ریز ابعاد^۲) توسط پرس مدل اس تی ام-۵۰ با قابلیت ثبت تغییرات نیرو بر حسب جابجایی، در سرعت ثابت ۱ mm/s و تا چگالی جریان 50 A/mm^2 انجام شد. منحنی تنش- کرنش مهندسی ورق‌ها در شکل ۳ برای مقادیر مختلف چگالی جریان نشان داده شده است. طبق شکل ۳ در چگالی جریان 40 A/mm^2 ، تغییرات محسوسی در رفتار مکانیکی فولاد دو فازی ۵۹۰ حادث می‌شود. در نتیجه چگالی آستانه برای ورق فولادی در محدوده چگالی $30-40 \text{ A/mm}^2$ قرار دارد. درحالیکه این تغییرات برای رفتار آلومینیوم با افزایش چگالی تا مقدار 50 A/mm^2 تقریباً ناچیز و یکنواخت است.

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

در این پژوهش ابزار کاربرد تنگستن^۴ با ۱۰٪ کبالت و سختی ۹۰ HRA، با پین استوانه‌ای شکل ساده به قطر بین ۴۶ mm و قطر شانه ۱۶ mm به کمک فرآیند سنگ‌زنی ساخته شد. نفوذ پین به درون زمینه فولادی همراه با سایش شدید ابزار و چسبندگی مواد به ابزار خواهد شد. در این پژوهش همانطور که ذکر شد اعمال جریان الکتریکی سبب کاهش نیروهای وارد شده به ابزار و تسهیل جریان مواد می‌شود. لذا جهت دستیابی به اتصالی مستحکم، از پینی به طول ۱۶ mm با عمق نفوذ ۰٫۷ mm به درون ورق فولادی استفاده گردید. طبق پیشینه پژوهش گزارش شده، ایجاد تقعر در شانه ابزار سبب تسهیل جریان مواد و گسترش ناحیه اغتشاش شده و به ایجاد اتصالی مستحکم می‌انجامد [۲۱]. قابل ذکر است که پس از انجام حداکثر هر ۵ آزمایش، ابزار به صورت دستی و در حین دوران، سنباده و پولیش شد تا سایش ابزار خللی در نتایج آزمایش وارد نکند.

برای پیاده‌سازی دقیق فرآیند از دستگاه فرز مجهز به کنترل عددی کامپیوتری^۵ مدل سری وی دی دلبیو ۴۰^۶ با کنترلر فانوک^۷ سری اُ آی-ام سی^۸ استفاده شد. تنظیمات دقیق پارامترها شامل سرعت پیشروی، سرعت دورانی، زمان مکث ابزار در انتهای عمق نفوذ (زمان ماند) و عمق نفوذ پین توسط یک استراتژی در نرم‌افزار پاورمیل^۹ ایجاد



شکل ۴. تجهیزات اعمال جریان الکتریکی
Fig. 4. Electrically-assisted equipment

بالا و افزایش عمر ابزار به کمک فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی الکتروپلاستیک است. بدین منظور طرح عاملی 2^k با لحاظ چهار پارامتر شامل سرعت دورانی، زمان ماند، جریان الکتریکی و افزودن نانوذرات تقویتی جهت تحلیل آماری فرآیند و مدل‌سازی استفاده می‌شود. کد اجزای محدود با کوپل حرارتی-الکتریکی نیز جهت ارزیابی چگالی جریان ایجاد می‌شود. اثر الکتروپلاستیک نیز بر نیرو و حالت شکست، ریزساختار و توان خروجی اسپیندل به صورت تجربی بررسی می‌شود.

۲- روش تحقیق

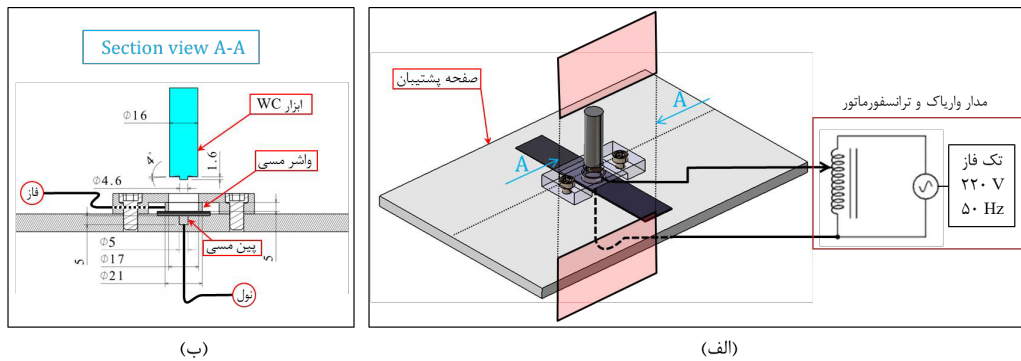
۲-۱- مواد استفاده شده

جهت انجام آزمایش‌های جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی ورق‌های آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-T۶ با ضخامت ۱ mm به فولاد دو فاز ۵۹۰ به ضخامت ورق معادل ۱٫۵ mm اتصال دهی شدند. برای تمامی آزمایش‌ها ورق آلومینیومی در بالا و ورق فولادی در پائین قرار گرفت. عملیات حرارتی ۶T شامل انحلال و کوئینچ در آب و پیرسازی مصنوعی است. ورق‌های فولادی دو فاز دارای پوشش گالوانیزه به جرم معادل 275 g/m^2 می‌باشند. همچنین جهت انجام فرآیند با اعمال پودر نانو، از نانوذرات کاربرد سیلیسیم با ابعاد قطری ۴۵-۶۵ nm استفاده شد. ترکیب شیمیایی مواد در جدول ۱ ارائه شده است.

آزمایش‌های کشش تک‌محوری طبق استاندارد ای اس تی ام ای^۱

1 ASTM E8

2 Subsize
3 STM-50
4 WC
5 Computer numerical control (CNC)
6 VDW40
7 Fanuc
8 Oi-MC
9 PowerMill



شکل ۵. (الف) طرح‌واره فیکسچر جهت اعمال جریان الکتریکی و (ب) برش مقطع طولی با نمایش ابعاد (mm)

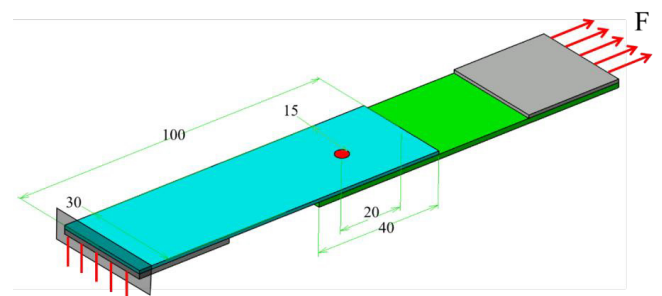
Fig. 5. (a) Schema of the electrically-assisted fixture and (b) longitudinal section by showing the dimensions (mm).

۱۰ قطع شد. در شکل ۴ عملیات اعمال جریان A ۵۰۰ برای ثانیه پنجم، با نمایش دمای پائین ورق فولادی قابل مشاهده است. جریان الکتریکی متناوب توسط دو کابل جریان یافت. یک کابل به واشر مسی در تماس با سطح بالای ورق آلومینیوم متصل شد. این واشر مسی به کمک یک تسمه عملیات گیره‌بندی را نیز انجام می‌دهد. کابل دیگر نیز به پین مسی زیر ورق فولادی اتصال یافت. جریان الکتریکی توسط واریاک متصل به ترانسفورماتور به صورت دستی قابل تنظیم است. واریاک با ایجاد حرکت آزادانه یکی از سرهای ثانویه ترانسفورماتور، تعداد دور سیم‌ها را جابه‌جا می‌کند. در نتیجه متناسب با تغییرات دستی، تغییرات الکتریکی در جریان خروجی ایجاد می‌شود. از یک آمپر متر گیره‌ای جهت نمایش لحظه‌ای جریان استفاده شد تا نسبت به تنظیم دقیق جریان اطمینان حاصل شود. لایه‌های میکا نیز برای عایق‌بندی تمامی تجهیزات نسبت به میز فرز استفاده شدند. تجهیزات الکتریکی نیز قادر به ایجاد جریان الکتریکی متناوب تا مقدار $\pm 5 A$ در ۵۰۰ در ولتاژ معادل ۳ V است. در شکل ۵ طرح‌واره تجهیزات اعمال جریان الکتریکی نشان داده شده است.

برای انجام آزمایش در حالت اعمال پودر، سوراخی به قطر ۲ mm در مرکز ناحیه همپوشانی در ورق آلومینیومی ایجاد شد. پودرهای نانوذرات پیش از انجام آزمایش در داخل سوراخ افزوده شدند تا بتوان طی فرآیند جوشکاری، ترکیب سطحی نانو کامپوزیتی را ایجاد کرد. به منظور مطالعه ریزساختار، نمونه‌هایی از نواحی مختلف از جمله فلز پایه و مقاطع جوش به صورت عرضی توسط دستگاه وایرکات برش خورده و به صورت مانت سرد آماده سازی شدند. پس از سنباذه‌زنی و پرداخت‌کاری با خمیر الماس، ورق آلومینیوم با محلول کلر اصلاح‌شده به مدت ۲ دقیقه و ورق فولادی با استفاده از محلول

شده و سپس جهت اجرا به کنترلر ماشین فرز انتقال داده شد. شایان ذکر است که نمونه‌ها پیش از انجام آزمایش جهت حذف لایه‌های اکسیدی در سطح اتصال، سمباده‌زنی و توسط استون چربی‌زدایی شدند. سپس جوشکاری دو ورق در ناحیه همپوشانی $30 \text{ mm} \times 40$ انجام شد. برای اعمال جریان الکتریکی پیوسته در حین فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی، از یک فیکسچر به همراه تجهیزات الکتریکی طبق شکل ۴ استفاده شده است.

طبق شکل ۴ شیار ماشینکاری شده در بالای صفحه پشتیبان، سبب موقعیت‌دهی ورق‌ها در حین فرآیند می‌شود. به منظور دستیابی به حداکثر چگالی جریان، ورق‌ها توسط لایه‌های نازک میکا نسبت به اجزای فیکسچر عایق‌بندی شدند. قابل ذکر است که ابزار جوشکاری نیز توسط واشر سرامیکی درون فشنگی فنری کولت، نسبت به اسپیندل و ماشین فرز عایق شد. جهت راستی‌آزمایی مدل عددی، تغییرات دما در حین اعمال جریان الکتریکی و در حالت بدون نفوذ سنبله، توسط دو ترموکوپل نوع K برای نقاط بالای آلومینیوم و پائین ورق فولادی در مرکز ناحیه همپوشانی اندازه‌گیری شدند. اعمال جریان با آغاز تماس ابزار با ورق آلومینیومی شروع شده و پس از s



شکل ۶. طرح‌واره آزمایش کششی برشی به همراه ابعاد نمونه‌ها

Fig. 6. Schema of the tensile shear testing with specimen dimensions.

مسی و پتانسیل الکتریکی صفر به پین مسی اعمال شد. همچنین دمای اولیه تمامی قطعات، معادل دمای محیط (۲۵ °C) لحاظ شد. برای المان بندی قطعات از المان خطی با ۸ گره و درجات آزادی دما و الکتریسیته^۸ استفاده شد. اعمال جریان الکتریکی در انجام آزمایش‌های جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی، از آغاز تماس ابزار با سطح آلومینیوم آغاز و تا انتهای عمق نفوذ (پیش از آغاز زمان ماند) ادامه یافت. شایان ذکر است که به محض رسیدن ابزار به عمق نهایی، جریان قطع شد. زمان اعمال جریان در مدل عددی برابر با زمان لازم جهت نفوذ ابزار به انتهای عمق نفوذ لحاظ شد.

۴-۲- طراحی آزمایش

برای انجام اغلب فرآیندها تعداد بسیاری متغیر ورودی شناسایی می‌شوند که انجام تمامی حالات ممکن و تحلیل آن، علاوه بر هزینه‌های گزاف آزمایشگاهی، بسیار زمان‌بر می‌باشند. یکی از روش‌های بسیار پرکاربرد به‌ویژه در صنعت، روش طراحی آزمایش‌ها^۹ بوده که بر پایه روش‌های آماری^{۱۰} است. این تکنیک روشی آماری و یک ابزار مهندسی برای کنترل و بهبود کیفیت بوده که در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ به عنوان یک تکنیک رقابتی در کشورهای غربی و ژاپن مطرح شد. این روش‌ها شرایط بهینه‌ای را برای دستیابی به بهترین پاسخ از میان تعداد کمی از آزمایش‌ها ارائه می‌کنند. در میان روش‌های مختلفی که در تکنیک طراحی آزمایش‌ها استفاده می‌شود، استفاده از طرح عاملی^{۱۱} دو سطحی (۲^k) در مراحل اولیه آزمایش و زمانی که تاثیر چندین پارامتر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، می‌تواند بسیار مفید باشد. به کمک این نوع طرح می‌توان با کمترین تعداد آزمایش، تاثیر K پارامتر ورودی را در قالب یک طرح عاملی کامل بررسی کرد. از آنجایی که هر عامل دارای دو سطح است لذا فرض می‌شود که پاسخ در دامنه‌ی انتخاب‌شده تقریباً خطی است. اگرچه این فرض همراه با ساده‌سازی خواهد بود ولی جهت انجام آزمایش‌های غربالی بسیار پرکاربرد است [۲۵].

در این تحقیق هدف از طراحی آزمایش توسط طرح عاملی ۲^k، تحلیل آماری و مدل‌سازی فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی برای بررسی استحکام بیشینه در کمترین توان خروجی است. کاهش

نایتال ۲% به مدت ۸ الی ۱۰ ثانیه حکاکی شد. در نهایت نمونه‌های آماده‌سازی شده توسط میکروسکوپ نوری^۱ مدل تکنو میچی آی ام ۲۷۰۰ و میکروسکوپ الکترونی روبشی- نشر میدانی^۲ مدل تسکن میرا ۳^۴ بررسی شدند. همچنین از طیف‌سنجی پراکندگی انرژی اشعه ایکس^۵ برای شناسایی عناصر شیمیایی استفاده شد. برای سنجش استحکام مکانیکی اتصال‌ها، آزمایش‌های کششی برشی طبق استاندارد ایزو ۱۲۹۹۶ و در سرعت ۲ mm/min انجام گرفت. جهت جلوگیری از ایجاد گشتاور در حین انجام آزمایش، طبق شکل ۶ از دو ورق در دو سمت استفاده شد. قابل ذکر است که راستای کشش در موازات جهت نورد ورق‌ها بود.

توان اسمی اسپیندل ماشین فرز ۶۷ kW است. توان لحظه‌ای حاصل از دوران و گشتاور، به‌صورت درصدی از توان اسمی در نمایشگر کنترلر به‌صورت آنالین نمایش داده می‌شود. طبق تنظیمات پیش‌فرض، در صورت تجاوز از ۸۰% توان اسمی، اسپیندل به‌صورت خودکار خاموش شده و خطایی در نمایشگر گزارش می‌شود. بیشینه درصد توان خروجی که در انتهای عمق نفوذ حاصل شده و با گشتاور اسپیندل رابطه مستقیم دارد، در هر یک از آزمایش‌ها به خروجی دوم در نظر گرفته شده‌است.

۲-۳- مدل‌سازی اجزای محدود

برای بررسی کمی چگالی جریان ایجادشده در اثر اعمال جریان الکتریکی، از کد اجزای محدود نرم‌افزار اباکوس ۶-۱۶^۶ استفاده شده‌است. به دلیل وجود دو میدان حرارتی و الکتریکی، تحلیل کوپل حرارتی- الکتریکی^۷ با حلگر استاندارد اعمال شد [۲۲، ۲۳]. جهت افزایش دقت و صحت تحلیل، مدل‌سازی سه‌بعدی انجام شد. رفتار مکانیکی ورق‌ها طبق نتایج آزمایش‌های کشش تک‌محوری لحاظ شد. سایر رفتار ورق‌های آلومینیومی، فولادی و الکترودهای مسی شامل رفتار حرارتی (رسانایی و گرمای ویژه)، الکتریکی (رسانایی)، ضرایب رسانایی الکتریکی و حرارتی در سطوح تماسی، از مقاله وانگ و همکاران [۲۴] در نظر گرفته شد. جریان الکتریکی پیوسته به‌واشر

- 1 Optical microscope (OM)
- 2 TECHNO MEIJI IM2700
- 3 Field emission scanning electron microscope (FE-SEM)
- 4 TESCAN MIRA3
- 5 Energy dispersive X-ray spectrometry (EDAX)
- 6 ABAQUS 6.16
- 7 Coupled thermal-electric

8 DC3D8E

9 Design of experiment (DOE)

10 Statistical methods

11 Factorial

و ۱- کدبندی شدند. دو مقدار سرعت دورانی ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ rpm و همچنین دو زمان ماند ۲ و ۴ s به عنوان سطوح بالا و پایین در آزمایش‌ها اعمال شد. در سرعت‌های دورانی کمتر از این محدوده، به دلیل عدم قابلیت کافی برای جریان و اختلاط مواد خمیری در ناحیه اغتشاش، اتصال مستحکمی صورت نگرفت. به نحوی که اتصال‌های ایجادشده حتی با نیروی دست نیز شکستند. برای سرعت‌های بیشتر نیز با توجه به استفاده از ماشین فرز کنترل عددی کامپیوتری که اغلب دارای توان موتور اسپیندل کمتری نسبت به فرزهای منوال^۳ است، توان بسیار زیادی بر اسپیندل وارد شد. طوری که گاهی با گزارش خطا و هشدار، دوران اسپیندل متوقف شد. با توجه به اینکه تاثیر محسوسی برای سرعت پیشروی پین بر میزان اختلاط و عرض ناحیه پیوند خورده گزارش نشده [۲۶]، سرعت پیشروی ابزار برای تمام آزمایش‌ها مقدار ۱۰ mm/min اعمال شد. در جدول ۲ شماره آزمایش‌ها با معرفی مقدار هر پارامتر ارائه شده‌است. قابل ذکر است که جهت حذف اثرات نویز و کاهش خطاهای تجربی، آزمایش‌ها جهت استخراج دو خروجی مذکور با دو تکرار و در حالت تصادفی (بدون توجه به شماره آزمایش) انجام شدند. ایجاد طرح، مطالعه آماری و تحلیل واریانس^۴ به کمک نرم‌افزار آماری مینی تب ۱۹^۵ انجام گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل آماری طراحی آزمایش‌ها

در این بخش نتایج آماری برای نیروی شکست و توان خروجی اسپیندل گزارش می‌شود. سپس نتایج تحلیل واریانس ارائه و معادله رگرسیون برازش می‌گردد. برای هر خروجی نیز تحلیل‌های آماری با بیان تاثیر پارامترها و دقت مدل تشریح می‌شود.

۳-۱-۱- نیروی شکست

جهت بررسی آماری فرآیند، اهمیت پارامترها و برازش معادله رگرسیون از تحلیل واریانس استفاده شد. در تحلیل واریانس جهت تعیین اهمیت مدل و پارامترهای آن از آزمایش فیشر^۶ استفاده شد. در آزمایش فیشر به منظور تعیین اهمیت ضرایب رگرسیون از مقدار P استاندارد استفاده می‌شود. مقدار بالای F و پایین P، نشان‌دهنده

جدول ۲. طرح عاملی ۲^k ایجاد شده برای ۴ پارامتر ورودی

Table 2. 2^k factorial design for 4 input parameters

شماره	A: سرعت دورانی (rpm)	B: زمان ماند (s)	C: جریان الکتریکی (آمپر)	D: پودر
۱	۱۰۰۰	۲	-	-
۲	۲۰۰۰	۲	-	-
۳	۱۰۰۰	۴	-	-
۴	۲۰۰۰	۴	-	-
۵	۱۰۰۰	۲	۵۰۰	-
۶	۲۰۰۰	۲	۵۰۰	-
۷	۱۰۰۰	۴	۵۰۰	-
۸	۲۰۰۰	۴	۵۰۰	-
۹	۱۰۰۰	۲	-	SiC
۱۰	۲۰۰۰	۲	-	SiC
۱۱	۱۰۰۰	۴	-	SiC
۱۲	۲۰۰۰	۴	-	SiC
۱۳	۱۰۰۰	۲	۵۰۰	SiC
۱۴	۲۰۰۰	۲	۵۰۰	SiC
۱۵	۱۰۰۰	۴	۵۰۰	SiC
۱۶	۲۰۰۰	۴	۵۰۰	SiC

توان اسپیندل در فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی ورق‌های آلومینیوم-فولاد، کاهش نیروی وارد بر ابزار، سایش و در نتیجه افزایش عمر ابزار و امکان استفاده از ابزارهای ارزان‌تر را میسر می‌سازد. بدین منظور سه پارامتر سرعت دورانی (A)، زمان ماند (B) و جریان الکتریکی (C) به عنوان متغیرهای پیوسته^۱ و اعمال پودر نانو کاربید سیلیسیم (D) به عنوان متغیر موضوعی^۲ انتخاب شدند. اعمال جریان ۵۰۰ A نیز به عنوان سطح بالای پارامتر C در نظر گرفته شد. عدم اعمال پودر به عنوان سطح پایین و افزودن پودر کاربید سیلیسیم نیز سطح بالا لحاظ گردید. سطوح بالا و پایین با مقادیر ۱+

3 Manual

4 Analysis of variance (ANOVA)

5 MINITAB 19

6 Fisher's F-test

1 Continuous

2 Categorical

جدول ۴. مقادیر نیروی شکست (N) طبق شماره آزمایش

Table 4. Failure load values (N) according to test number

شماره	تکرار اول	تکرار دوم	مقدار پیش‌بینی شده
۱	۱۹۱۸/۰۳	۲۰۱۲/۸۴	۱۹۴۷/۰۲
۲	۳۲۹۰/۲۲	۳۵۹۳/۶۳	۳۵۱۰/۸۸
۳	۴۲۴۷/۶۴	۳۹۹۲/۷۸	۴۱۳۹/۱۷
۴	۵۸۷۶/۳۳	۶۰۵۲/۶۲	۵۹۴۵/۵۲
۵	۲۲۴۴/۱۰	۲۱۵۴/۳۳	۲۱۷۷/۷۷
۶	۴۰۳۴/۳۶	۳۹۱۳/۳۳	۳۹۹۵/۲۹
۷	۴۹۲۷/۲۶	۵۲۷۲/۱۷	۵۱۲۱/۱۶
۸	۶۹۹۲/۸۳	۶۷۸۳/۰۵	۷۱۸۱/۱۷
۹	۲۰۱۳/۹۳	۱۹۹۳/۷۹	۱۹۲۰/۶۰
۱۰	۳۷۹۷/۰۵	۳۸۳۵/۰۲	۳۸۹۹/۳۰
۱۱	۴۵۸۷/۴۵	۴۶۷۹/۲۰	۴۷۱۶/۵۹
۱۲	۶۸۱۶/۵۴	۶۹۵۲/۸۷	۶۹۳۷/۷۷
۱۳	۲۵۷۰/۱۶	۲۴۹۳/۰۶	۲۴۵۵/۲۸
۱۴	۴۵۰۸/۹۹	۴۱۹۳/۳۶	۴۲۲۷/۵۱
۱۵	۵۶۰۶/۸۸	۵۹۴۳/۳۰	۵۶۵۱/۴۲
۱۶	۷۴۹۲/۳۲	۷۱۹۲/۶۳	۷۴۶۶/۱۴

دورانی، جریان الکتریکی و پودر بیشترین تاثیر را بر نیروی شکست دارند که در شکل ۷ نیز قابل مشاهده است. معادله رگرسیون خطی برای نیروی شکست متعلق به واحدهای گذشته، طبق تحلیل واریانس اصلاح شده به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
 \text{نیروی شکست} = & -4468.3 + 927.2A + 1426.6B + 341.2C + \\
 & 216D + 60.6A \times B - 19.1A \times C + 21.2A \times D + \\
 & 118.9B \times C + 82.1B \times D - 25.4C \times D - 82.5A \times \\
 & C \times D - 68.9B \times C \times D
 \end{aligned} \quad (1)$$

حداقل مقدار ۸۰٪ حاصل می‌شود. مدل ارزیابی شده در این پژوهش می‌تواند با R^2 و R^2_{adj} حدود ۹۹٪ پاسخ را با درجه‌ی اطمینان ۹۵٪ به خوبی تشریح کند. همچنین R^2_{pred} نشان می‌دهد که این مدل

جدول ۳. تحلیل واریانس مدل اصلاح شده برای نیروی شکست

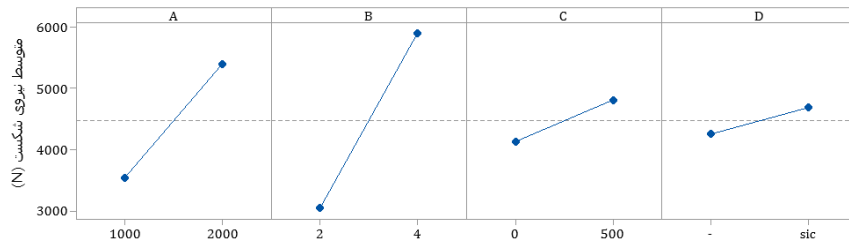
Table 3. Analysis of variance for the modified model of failure load

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F مقدار	P مقدار
مدل	۱۲	۹۹۰۵۳۰۸۶	۸۲۵۴۴۲۴	۲۳۷/۷۸	۰/۰۰۰
متغیرهای اصلی	۴	۹۷۸۵۰۸۸۳	۲۴۴۶۲۷۲۱	۷۰۴/۶۹	۰/۰۰۰
A	۱	۲۵۵۰۸۰۹۷	۲۵۵۰۸۰۹۷	۷۹۲/۴۱	۰/۰۰۰
B	۱	۶۵۱۲۴۳۱۵	۶۵۱۲۴۳۱۵	۱۸۷۶/۰۰	۰/۰۰۰
C	۱	۳۷۲۴۹۴۰	۳۷۲۴۹۴۰	۱۰۷/۳۰	۰/۰۰۰
D	۱	۱۴۹۳۵۳۰	۱۴۹۳۵۳۰	۴۳/۰۲	۰/۰۰۰
تعامل‌های دوتایی	۶	۸۳۲۴۶۷	۱۳۸۷۴۴	۴/۰۰	۰/۰۰۹
A×B	۱	۱۱۷۵۹۹	۱۱۷۵۹۹	۳/۳۹	۰/۰۸۱
A×C	۱	۱۱۶۷۴	۱۱۶۷۴	۰/۳۴	۰/۵۶۹
A×D	۱	۱۴۳۷۳	۱۴۳۷۳	۰/۴۱	۰/۵۲۸
B×C	۱	۴۵۲۵۸۳	۴۵۲۵۸۳	۱۳/۰۴	۰/۰۰۲
B×D	۱	۲۱۵۵۶۱	۲۱۵۵۶۱	۶/۲۱	۰/۰۲۲
C×D	۱	۲۰۶۷۶	۲۰۶۷۶	۰/۶۰	۰/۴۵۰
تعامل‌های سه‌تایی	۲	۳۶۷۹۳۶	۱۸۴۸۶۸	۵/۳۳	۰/۰۰۵
A×C×D	۱	۲۱۷۸۸۴	۲۱۷۸۸۴	۶/۲۸	۰/۰۲۱
B×C×D	۱	۱۵۱۸۵۲	۱۵۱۸۵۲	۴/۳۷	۰/۰۵۰
خطا	۱۹	۶۵۹۵۷۳	۳۴۷۱۴		
عدم برازش	۳	۱۸۴۳۶۹	۶۱۴۵۶	۲/۰۷	۰/۱۴۵
خطای خالص	۱۶	۴۷۵۲۰۴	۲۹۷۰۰		
مجموع	۳۱	۹۹۷۱۲۶۵۹			
		$R^2_{pred} = 98.12\%$	$R^2_{adj} = 98.92\%$	$R^2 = 99.34\%$	

اهمیت بیشتر ضرایب جملات است. مقدار کمتر از ۰٫۱ برای P نشان می‌دهد که آن پارامتر از لحاظ آماری اهمیت^۱ دارد. بر این اساس مقادیر بیش از ۰٫۱ جملات غیرمهم^۲ را معرفی می‌کنند [۲۵]. پس از ارزیابی اهمیت همه پارامترها، مدل می‌تواند با حذف جملات غیرمهم ایجاد شود. پس از تحلیل آماری اولیه در خروجی نیروی شکست، متغیرهای غیرمهم به غیر از تعامل‌های دوتایی AC، AD و CD حذف شدند. این متغیرها به علت برهم‌زدن سلسله مراتب^۳ مدل، حفظ شدند. طبق ویژگی این نوع مدل، سطح‌های پایین‌تر تحت سلسله مراتب واحدهای متوالی سطح بالا طبقه‌بندی می‌شوند. داده‌ها در یک یا چند سطح به خوشه‌ها طبقه‌بندی شده و تأثیر خوشه‌ها روی نقاط داده موجود در آن‌ها، در هر تحلیل آماری مورد محاسبه قرار می‌گیرند. این ویژگی سبب افزایش توانایی تحلیل به ویژه برای اثرات تصادفی و ترکیبی متغیرهای پیوسته و موضوعی می‌شود [۲۷]. تحلیل مدل اصلاح شده در جدول ۳ ارائه شده است.

طبق بررسی مقدار F، به ترتیب پارامترهای اصلی زمان ماند، سرعت

- 1 Significant
- 2 Insignificant
- 3 Hierarchical



شکل ۷. تاثیر پارامترهای اصلی بر نیروی شکست

Fig. 7. Effect of main parameters on failure load

پیش‌بینی شده با بیشینه خطای حدود ۷٪ می‌تواند دقت معادله برازش شده را تایید کند.

۳-۱-۲- توان خروجی اسپیندل

پس از تحلیل اولیه، متغیرهای غیرمهم به غیر از متغیر اصلی زمان ماند (B) و تعامل دوتایی BC حذف شدند. متغیر اصلی زمان ماند جهت حفظ نسب و تعامل دوتایی به علت برهم‌زدن سلسله مراتب^۱ مدل، حفظ شدند. منظور از حفظ نسب برای متغیر B، بااهمیت بودن حداقل یک تعامل با مشارکت B (مثل تعامل‌های AB، BD و ABD) است. تحلیل مدل اصلاح شده در جدول ۵ ارائه شده است.

طبق بررسی مقدار F و P، به ترتیب پارامترهای اصلی سرعت دورانی، جریان الکتریکی و پودر بیشترین تاثیر را بر توان خروجی دارند. زمان ماند نیز تاثیری بر این خروجی ندارد. میزان تاثیر کمی هر پارامتر در شکل ۸ نشان داده شده است. معادله رگرسیون خطی برای توان خروجی نسبی متعلق به واحدهای گذشته، طبق تحلیل واریانس اصلاح شده به صورت زیر است:

مدل ارزیابی شده با مقادیر R^2 و R^2_{adj} حدود ۹۸٪، پاسخ را با درجه اطمینان ۹۵٪ به خوبی بیان می‌کند. همچنین مدل می‌تواند

$$\begin{aligned} \text{توان خروجی نسبی} = & 51.094 + 9.094A - 0.219B - 6.719C + \\ & 2.906D + 1.031A \times B - 0.844A \times C + 0.781A \times \\ & D - 0.031B \times C - 0.781B \times D + 1.219C \times D - \\ & 0.656A \times B \times D - 0.531B \times C \times D \end{aligned} \quad (2)$$

حدود ۹۷٪ تغییرپذیری را برای داده‌های جدید پیش‌بینی کند. در جدول ۶ مقدار واقعی توان خروجی نسبی برای دو تکرار و همچنین مقدار پیش‌بینی شده توسط معادله ۲ محاسبه شده است.

جدول ۵. تحلیل واریانس مدل اصلاح شده برای توان خروجی نسبی

Table 5. Analysis of variance for the modified model of relative output power

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	۱۲	۵۸۲۸/۸۷	۳۷۷/۴۱	۱۳۳/۱۸	۰/۰۰۰
متغیرهای اصلی	۴	۴۳۶۲/۶۳	۱۰۹۰/۱۶۶	۳۸۴/۸۶	۰/۰۰۰
A	۱	۲۶۴۶/۲۸	۲۶۴۶/۲۸	۹۳۳/۸۰	۰/۰۰۰
B	۱	۱/۵۳	۱/۵۳	-۰/۵۴	۰/۴۷۱
C	۱	۱۴۴۴/۵۳	۱۴۴۴/۵۳	۵۰۹/۷۴	۰/۰۰۰
D	۱	۲۷۰/۲۸	۲۷۰/۲۸	۹۵/۳۷	۰/۰۰۰
تعامل‌های دوتایی	۶	۱۴۳/۴۴	۲۳/۹۱	۸/۴۴	۰/۰۰۰
A×B	۱	۳۴/۰۳	۳۴/۰۳	۱۲/۰۱	۰/۰۰۳
A×C	۱	۲۲/۷۸	۲۲/۷۸	۸/۰۷	۰/۰۱۱
A×D	۱	۱۹/۵۳	۱۹/۵۳	۶/۸۹	۰/۰۱۷
B×C	۱	-۰/۰۳	-۰/۰۳	-۰/۰۱	۰/۹۱۷
B×D	۱	۱۹/۵۳	۱۹/۵۳	۶/۸۹	۰/۰۱۷
C×D	۱	۴۷/۵۳	۴۷/۵۳	۱۶/۷۷	۰/۰۰۱
تعامل‌های سه‌تایی	۲	۲۲/۸۱	۱۱/۴۱	۴/۰۲	۰/۰۳۵
A×B×D	۱	۱۳/۷۸	۱۳/۷۸	۴/۸۶	۰/۰۴۰
B×C×D	۱	۹/۰۳	۹/۰۳	۳/۱۹	۰/۰۹۰
خطا	۱۹	۵۳/۸۴	۲/۸۳		
عدم برازش	۳	۱۴/۳۴	۴/۷۸	۱/۹۴	۰/۱۶۴
خطای خالص	۱۶	۳۹/۵۰	۲/۴۷		
مجموع	۳۱	۴۵۸۲/۷۲			
		$R^2 = ۰.۹۸۸۳$	$R^2_{adj} = ۰.۹۸۰۸$	$R^2_{pred} = ۰.۹۶۶۷$	

می‌تواند حدود ۹۸٪ تغییرپذیری در داده‌های جدید را پیش‌بینی کند. در جدول ۴ مقدار واقعی خروجی نیروی شکست برای دو تکرار و همچنین مقدار پیش‌بینی شده توسط معادله ۱ گزارش شده است. قابل ذکر است که برخی از آزمایش‌های کشش به علل مختلفی مثل عیوب ذاتی ورق‌ها، تغییر ناخواسته در مقادیر اسمی پارامترهای جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی و تنظیمات اشتباه پیش از انجام آزمایش کشش، در نیروهای بسیار کمی گسیخته شدند. لذا نتایج آن موارد با تکرارهای جدید جایگزین شدند. مقادیر

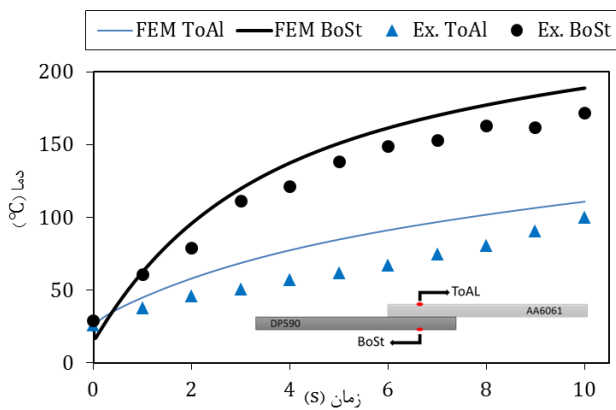
جدول ۶. مقادیر توان خروجی نسبی (%) طبق شماره آزمایش
Table 6. Relative output power values (N) according to test number

شماره	تکرار اول	تکرار دوم	مقدار پیش‌بینی شده
۱	۴۷	۴۶	۴۷٫۵
۲	۶۵	۶۲	۶۲٫۵
۳	۴۵	۴۸	۴۶٫۴
۴	۶۷	۶۹	۶۸٫۱
۵	۳۵	۳۶	۳۴٫۵
۶	۴۵	۴۵	۴۶
۷	۳۲	۳۰	۳۱٫۱
۸	۴۹	۵۰	۴۹٫۴
۹	۵۰	۵۳	۵۰٫۶
۱۰	۶۹	۷۲	۷۱٫۳
۱۱	۴۸	۴۶	۴۶٫۹
۱۲	۷۱	۶۷	۶۹٫۱
۱۳	۴۰	۳۹	۴۰٫۳
۱۴	۵۸	۵۹	۵۷٫۶
۱۵	۳۹	۳۸	۳۸٫۶
۱۶	۵۹	۵۶	۵۷٫۴

پیش‌بینی شده با بیشینه خطای حدود ۶٪ قابل اطمینان خواهد بود.

۳-۲- توزیع چگالی جریان

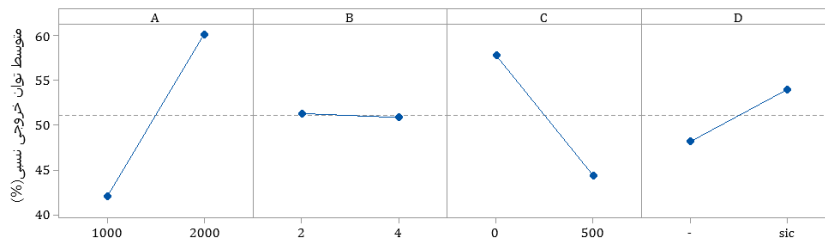
به منظور بررسی نتایج عددی ایجاد شده توسط مدل اجزای محدود، باید نسبت به دقت مدل اطمینان حاصل کرد. برای راستی‌آزمایی مدل عددی، توزیع دمای اندازه‌گیری شده در حالت بدون نفوذ ابزار



شکل ۹. (الف) کانتور توزیع دما برای لحظه آخر و (ب) مقایسه توزیع دمای تجربی (Ex.) و عددی (FEM) در حین اعمال جریان ۵۰۰ A
Fig. 9. (a) Contour of temperature distribution for end moment and (b) comparison of experimental temperature distribution (Ex.) with numerical results (FEM) during applying electrical current 500 A

برای نقاط بالای آلومینیوم^۱ و پایین ورق فولادی^۲ در مرکز ناحیه همپوشانی طبق شکل ۹ مقایسه شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده میانگین سه تکرار است.

مقدار دمای ایجاد شده در سمت ورق فولادی با نرخ بیشتری نسبت به ورق آلومینیومی افزایش می‌یابد که ناشی از مقاومت بیشتر فولاد است. مقادیر عددی دما برای نقاط بالای آلومینیوم و پایین فولاد با بیشینه انحراف ۹٪ نسبت به مقادیر تجربی دست بالا پیش‌بینی شدند. از دلایل آن می‌توان به اتلاف حرارت ناشی از نقص در عایق‌بندی و همچنین انتقال حرارت همرفت با محیط اشاره کرد. قابل ذکر است که علاوه بر خطای نه چندان زیاد، روند تغییرات دما نیز به خوبی پیش‌بینی شده به نحوی که دقت مدل عددی را تأیید می‌کند. پس از راستی‌آزمایی مدل عددی، چگالی جریان برای دو جریان A ۲۵۰ و ۵۰۰ طبق شکل ۱۰ پیش‌بینی شدند.



شکل ۸. تاثیر پارامترهای اصلی بر توان خروجی نسبی
Fig. 8. Effect of main parameters on relative output power

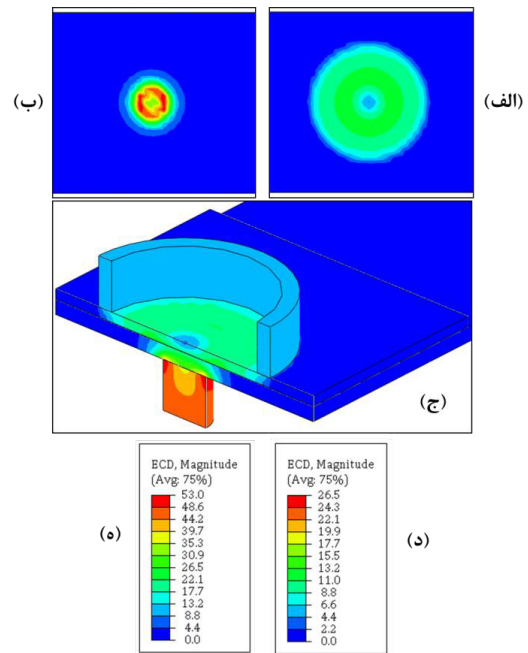
- 1 Top of aluminum (ToAl)
- 2 Bottom of steel (BoSt)

سبب ایجاد اثر الکتروپلاستیک بزرگ‌تری شود. برای ورق فولادی مقدار بیشینه چگالی جریان در جریان $A 500$ ، معادل $45 A/mm^2$ می‌باشد که با توجه به رفتار مکانیکی فولاد دو فاز 590 ، بیشتر از چگالی آستانه است. قابل ذکر است که با توجه به افزایش نه چندان زیاد دما در ورق فولادی (نسبت به نقطه ذوب)، اثر حرارتی ژول نامحسوس خواهد بود. افزایش زمان اعمال جریان سبب افزایش دمای بیشینه و نرم‌شدگی ناشی از اثر حرارتی ژول می‌شود. درحالی‌که پیشتر نشان داده شده که تاثیر غیرحرارتی چگالی جریان آستانه، نقشی محسوس در بهبود رفتار مکانیکی ایجاد می‌کند. طوریکه افزایش زمان اعمال جریان تنها سبب افزایش مصرف انرژی و کاهش راندمان خواهد شد و تاثیر محسوسی بر نتایج نخواهد داشت [۳۰، ۳۱]. با توجه به چگالی ایجادشده در جریان $A 500$ که بیش از مقدار آستانه است، تاثیر غیرحرارتی اثر الکتروپلاستیک نویددهنده نتایج مطلوبی همچون کاهش نیروی فروری و افزایش استحکام ناشی از بهبود دانه‌بندی می‌باشد. در نتیجه برای انجام فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی الکتروپلاستیک از جریان معادل $A 500$ استفاده شد.

۳-۳- ریزساختار

برای بررسی امکان ایجاد ساختار نانوکامپوزیت در ناحیه اغتشاش، همانطور که بیان شد نانو پودرهای کاربرد سیلیسیم پیش از آغاز فرآیند به سوراخ مرکز آلومینیوم اضافه شدند. در صورت رسوب پودرهای تقویتی سیلیسیم در شبکه آلومینیوم- فولاد، رفتار مکانیکی اتصال بهبود می‌بخشد. طبق نتایج آماری (رجوع به شکل ۷ و شکل ۸)، آزمایش‌ها در حالت اعمال نانو ذرات به ترتیب سبب افزایش ۱۰ و ۱۲٪ در نیروی شکست و توان خروجی نسبی شدند. با توجه به افزایش استحکام اتصال و همچنین نیروی وارد بر ابزار، فرض شکل‌گیری نانو کامپوزیت محتمل می‌شود. جهت راستی‌آزمایی این فرض در شکل ۱۱ ریزساختار برای ناحیه اغتشاش زیر ابزار بررسی شده‌است.

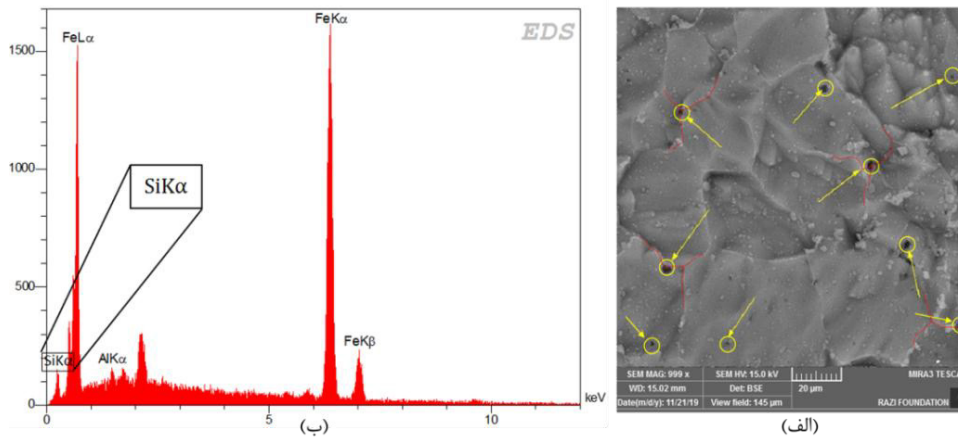
نتایج شکل ۱۱ تغییرات ایجادشده در نیروی شکست و توان را تایید کرده که این موارد با توجه به سختی ذاتی پودر کاربرد سیلیسیم و اثر قفل‌شدگی زنی قابل توجیه است. این ذرات اغلب با نفوذ در مرزخانه‌ها (خطوط قرمز شکل ۱۱ الف) سبب قفل‌شدن حرکت نابجایی‌ها شده



شکل ۱۰. (الف) کانتور توزیع جریان برای نمای بالای ورق آلومینیومی، (ب) نمای پایین ورق فولادی، (ج) مقطع عرضی مدل، (د) مقدار توزیع چگالی جریان در جریان $A 250$ و (ه) جریان $A 500$.

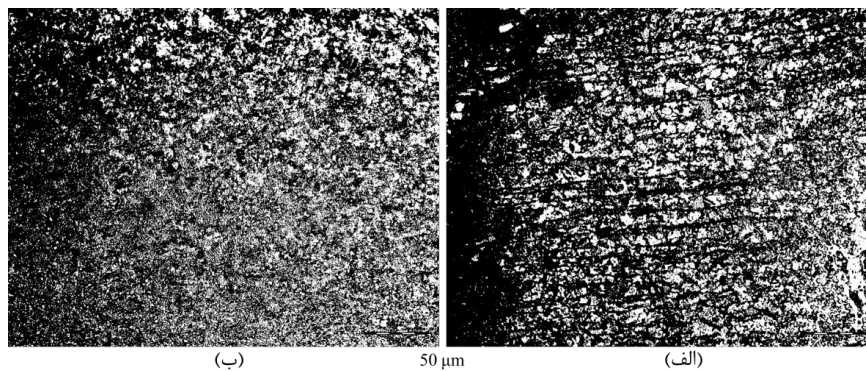
Fig. 10. (a) Contour of current distribution for top view of the aluminum sheet, (b) bottom view of the steel sheet, (c) cross section of the model, (d) distribution values of current density at 250 A and (e) 500 A

با افزایش جریان از مقدار $A 250$ به $A 500$ ، مقدار چگالی بیشینه جریان در ورق بالا و پائین، ۱۰۰٪ افزایش می‌یابد. این افزایش خطی حاکی از رابطه مستقیم جریان و چگالی برای مقطع یکسان است. قابل ذکر است با توجه به اینکه چگالی جریان متاثر از مقدار جریان الکتریکی و سطح مقطع عرضی است، لذا مقادیر پیش‌بینی‌شده تغییر محسوسی نسبت به مقادیر واقعی ایجادشده در فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی الکتروپلاستیک (با جریان و مقطع یکسان) نخواهد داشت [۱۰]. چگالی جریان برای ورق سمت آلومینیوم گرچه کمتر از ورق فولادی است، اما طبق نظریه مگنتوپلاستیته، عبور جریان الکتریکی می‌تواند با ایجاد یک میدان مغناطیسی سبب تسهیل حرکت نابجایی‌ها، کاهش تنش سیلان و در نتیجه بهبود جریان مواد شود [۲۹]. بهبود جریان آلومینیوم در فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی برای ورق‌های آلومینیوم- فولاد می‌تواند سبب گسترش ناحیه اغتشاش و استحکام اتصال گردد. از طرفی انتظار می‌رود که مقاومت بیشتر فولاد



شکل ۱۱. ذرات نانو SiC در ناحیه اغتشاش برای آزمایش شماره ۱۰ (الف) تصویر FE-SEM و (ب) الگوی EDAX.

Fig. 11. SiC nanoparticles in stirring zone for test number 10 (a) FE-SEM photograph and (b) EDAX pattern



شکل ۱۲. مقایسه ریزساختار OM در ناحیه اغتشاش آلومینیوم برای آزمایش شماره ۲ (الف) و ۱۰ (ب).

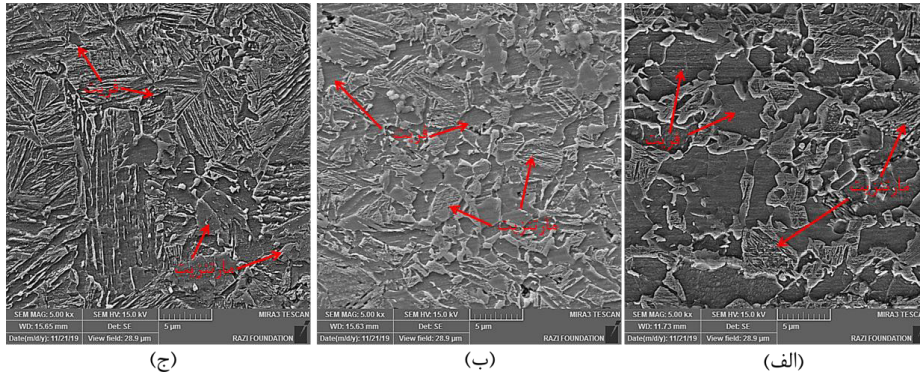
Fig. 12. Comparison of OM microstructure in stirring zone of aluminum for test number (a) 2 and (b) 10

قابل ذکر است که وجود نانوذرات در ساختار اتصال آلومینیوم- فولاد سبب ایجاد اختلال در رسانایی حرارتی ورق‌ها می‌شود. در نتیجه ایجاد حرارت کمتری در حین فرآیند نسبت به حالت بدون اعمال پودر، فرض منطقی خواهد بود. در نتیجه با توجه به کاهش حرارت ایجادشده، رشد دانه نیز نسبت به حالت بدون پودر کاهش می‌یابد. از دیگر دلایل افزایش استحکام می‌توان به عدم تطابق رفتار حرارتی ذرات تقویتی و شبکه نانو کامپوزیت اشاره کرد.

طبق اثر پارامترهای اصلی در نتایج آماری، آزمایش‌ها در حالت اعمال چگالی جریان به ترتیب افزایش حدود ۱۷٪ در نیروی شکست و کاهش ۳۰٪ در توان خروجی نسبی را در پی داشتند. از علل کاهش توان در آزمایش‌های جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی الکتروپلاستیک می‌شود به کاهش تنش سیلان (شکل ۳)، مدول الاستیک، کاهش مقاومت به تغییر شکل و کاهش سختی [۱۱] اشاره کرد. این کاهش چشمگیر، سایش ابزار را شدیداً تحت تاثیر قرار داده و

که افزایش سختی و استحکام اتصال را در پی خواهند داشت. این افزایش سختی پیشتر نیز توسط تبیینی و دهقانی گزارش شده است [۱۸]. سختی بیشتر ناحیه جوش سبب افزایش نیروی فروری شده که در نهایت توان خروجی بیشتری ایجاد می‌کند. این امر می‌تواند سبب افزایش نرخ سایش ابزار شود. لذا علی‌رغم افزایش نیروی شکست، ایجاد نانو کامپوزیت سبب کاهش عمر ابزار برای اتصال آلومینیوم- فولاد توسط فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی شده است. یکی دیگر از اثرات قفل شدن مرزدانه‌ها، جلوگیری از رشد دانه‌ها می‌باشد. از نتایج آن می‌توان به ایجاد دانه‌بندی ریزتر برای ناحیه اغتشاش اشاره کرد (شکل ۱۲).

طبق شکل ۱۲، اندازه میانگین دانه‌بندی در حالت اعمال نانوذرات (آزمایش ۱۰) با ۶۰٪ کاهش به مقدار حدود ۲ μm رسید. بهبود دانه‌بندی برای ناحیه اغتشاش با اعمال نانوذرات به‌طور عمده متاثر از قفل شدن مرزدانه‌ها، عدم مهاجرت آن‌ها و جلوگیری از رشد دانه است.



شکل ۱۳. مقایسه تصویر FE-SEM ریزساختار در ناحیه اغتشاش فولاد برای (الف) فلز پایه، (ب) آزمایش شماره ۳ و (ج) آزمایش شماره ۷.
Fig. 13. Comparison of FE-SEM photograph for microstructure in stirring zone of steel (a) base metal, (b) test number 3, and (c) test number 7

رشد دانه‌های فرعی^۲ و بهبود باز آرایش نابجایی‌ها حادث می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت که انتظار دانه‌بندی یکنواخت‌تری در آزمایش شماره ۷ وجود دارد. وقوع تبلور مجدد در دماهای پایین از مزایای بسیار مهم فرآیندهای الکتروپلاستیک بوده که پلاستیسیته و جریان مواد را نیز بهبود می‌بخشد [۳۴-۳۶]. این ویژگی می‌تواند کاهش مصرف انرژی و زمان را برای بسیاری از فرآیندهای صنعتی و به ویژه جوشکاری‌های اغتشاشی اصطکاکی ایجاد کند. اثر غیرحرارتی الکتروپلاستیک می‌تواند با وقوع تبلور مجدد زود هنگام در سرعت کم، عمر ابزار را افزایش داده و امکان دستیابی به استحکام مطلوب را ایجاد کند. جهت بررسی همزمان پارامترهای جریان الکتریکی و پودر، اثر پارامتر تعاملی آن‌ها طبق شکل ۱۴ نمایش داده شده است.

افزایش چشمگیر میانگین نیروی شکست در حالت استفاده توامان جریان الکتریکی و اعمال پودر حاکی از اثرپذیری بالای این پارامتر تعاملی است. این پارامتر تعاملی سبب افزایش حدود ۲۷٪ در نیروی شکست شده است. در شکل ۱۵، تاثیر اثر الکتروپلاستیک و اعمال نانو ذرات بر مقطع عرضی اتصال مورد مقایسه قرار گرفته است.

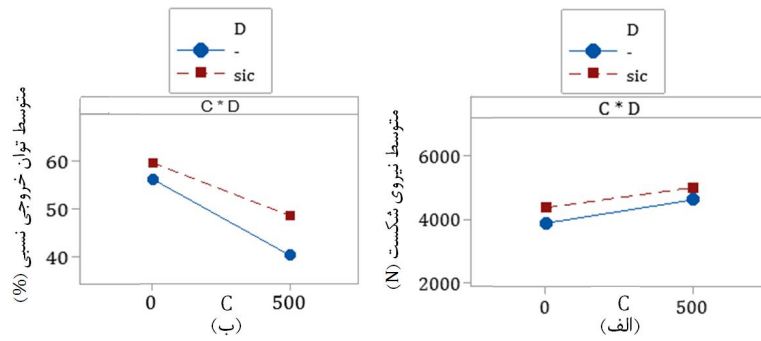
همانطور که نشان داده شده در حالت اعمال همزمان جریان و پودر نسبت به آزمایش شماره ۳، بهبود پلاستیسیته و جریان مواد ناشی از اثر الکتروپلاستیک سبب شکل‌گیری ناحیه فلاپ پیوسته و کامل‌تری شده است. همچنین باید اشاره کرد طبق اثر مهاجرت الکترونی^۳، افزایش قابلیت نفوذ سبب شکل‌گیری اختلاط یکنواخت‌تری نیز در آزمایش شماره ۱۵ می‌گردد. طبق این اثر انتقال انرژی جنبشی بین

سبب افزایش عمر ابزار می‌شود. در نتیجه می‌توان به جای بهره‌گیری از ابزارهای کاربیدی گران قیمت، فولادهای آلیاژی سختکاری شده را جایگزین نمود. جهت بررسی تاثیر چگالی جریان بر ریزساختار، در شکل ۱۳ ناحیه اغتشاش برای حالت اعمال چگالی جریان مورد مقایسه قرار گرفته است.

در شکل ۱۳(الف) ریزساختار فولاد فلز پایه با حضور زمینه غالب فریت به همراه فازمارتنزیت در مرزدانه‌های آن مشخص است. در ناحیه اغتشاش شکل ۱۳(ب) دانه‌بندی ایجاد شده نامنظم و نسبتاً درشت بوده که حاکی از عدم وقوع تبلور مجدد است. این اتفاق به علت ایجاد حرارت ناکافی بوده که متاثر از سرعت دورانی کم است. در حالیکه طبق شکل ۱۳(ج)، ناحیه اغتشاش با ساختار بسیار ریزدانه و هم‌محور شامل فازهای فریت فوق ریزدانه با فازهای ریز مارتنزیت در مرزدانه‌های آن، وقوع بازیابی و تبلور مجدد را نشان می‌دهد. هر چه اندازه دانه‌ها ریزتر باشد، کسر حجمی مرزدانه‌ها بزرگتر و لذا موانعی بیشتری در حرکت نابجایی‌ها ایجاد شده که طبق رابطه هال-پچ^۱ سبب افزایش استحکام می‌شود. در توجیه تغییرات ریزساختاری برای شکل ۱۳(ج) می‌توان اشاره کرد که افزایش دمای ناشی از اثر حرارتی جریان (شکل ۹) ناچیز بوده و نمی‌تواند تاثیر چندانی در وقوع احتمالی بازیابی و تبلور مجدد داشته باشد. لذا علت را می‌توان مربوط به اثر غیرحرارتی الکتروپلاستیک دانست. طبق این اثر، اعمال چگالی جریان کافی سبب تسریع در نرخ بازیابی و تبلور مجدد می‌گردد [۳۲، ۳۳]. این وقوع زود هنگام ناشی از اثر غیرحرارتی الکتروپلاستیک بوده که با افزایش چشمگیر سرعت حرکت نابجایی‌ها، ازدیاد نرخ

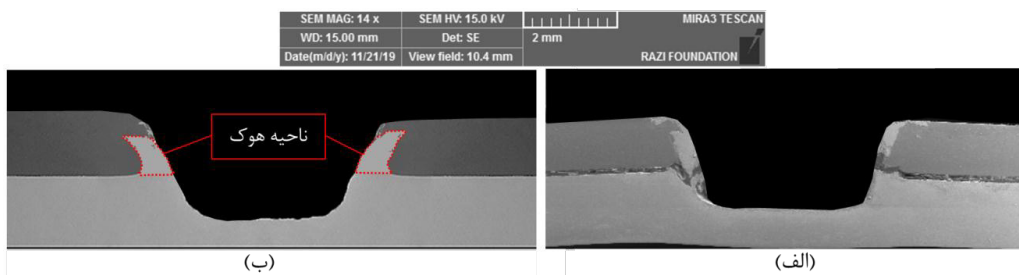
2 Subgrains
 3 Electromigration

1 Hall-Petch



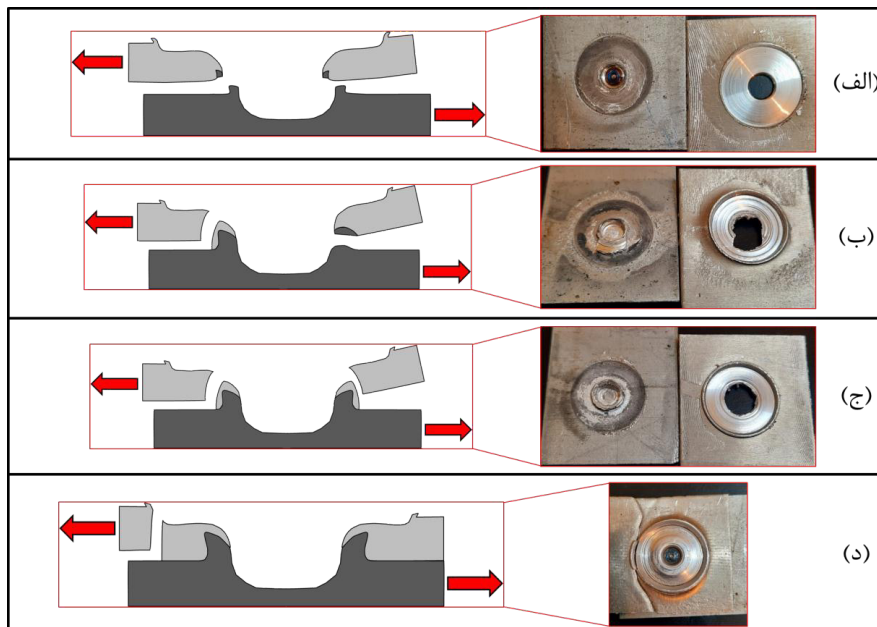
شکل ۱۴. تاثیر پارامتر تعاملی جریان الکتریکی × پودر بر (الف) نیروی شکست و (ب) توان خروجی نسبی.

Fig. 14. Effect of interaction parameter of electrical current × powder on (a) failure load and (b) relative output number



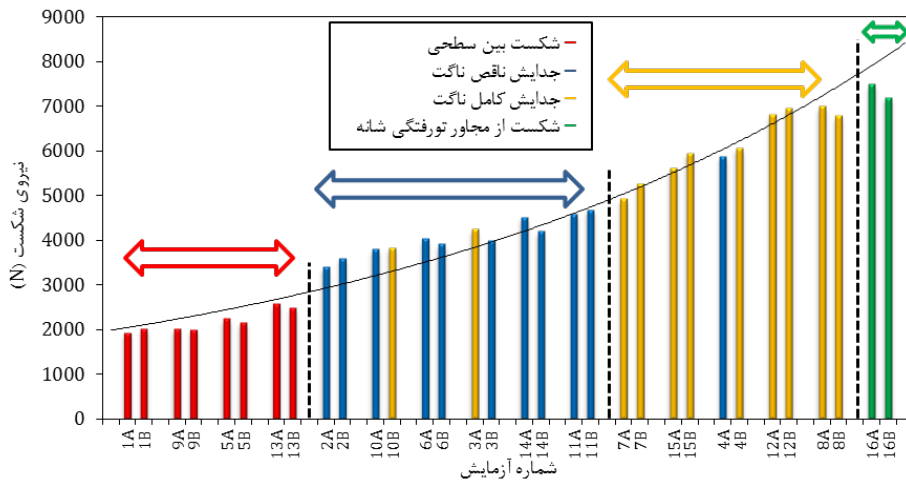
شکل ۱۵. مقایسه تصویر FE-SEM مقطع عرضی اتصال برای آزمایش شماره (الف) ۳ و (ب) ۱۵.

Fig. 15. Comparison of FE-SEM photograph of the joint cross section for test number (a) 3 and (b) 15



شکل ۱۶. حالت‌های شکست نمونه‌های FSSW در بارگذاری کششی برشی (الف) شکست بین‌سطحی، (ب) جدایش ناقص دکمه جوش، (ج) جدایش کامل دکمه جوش و (د) شکست از ناحیه مجاور تورفتگی شانه.

Fig. 16. Failure modes of FSSWed joints in tensile shear loading (a) interfacial failure, (b) partial nugget pull-out, (c) complete nugget pull-out, and (d) failure from the adjacent region of shoulder indentation



شکل ۱۷. تغییرات حالت شکست بر حسب افزایش نیروهای شکست

Fig. 17. Failure mode changes with increasing failure load

۱-۱- حالت شکست

در این تحقیق پس از آزمایش‌های کششی برشی چهار حالت شکست در اتصال‌ها طبق شکل ۱۶ مشاهده شدند.

طبق شکل ۱۶ (الف)، شکست بین‌سطحی به موازات سطح تماس بین دو ورق ایجاد می‌شود. در این حالت ترک در ناحیه قلاب ایجاد شده و با رشد عرضی سطح شکست نسبتاً تدریجاً ایجاد می‌شود. عدم اختلاط کافی و نفوذ کم که به شکل‌گیری ناحیه قلاب ناقصی انجامید، استحکام زیادی را ایجاد نمی‌کند. در این حالت اتصال‌ها بدون تغییر شکل زیادی به حالت برشی شکسته شدند. درحالی‌که حرارت بیشتر و اختلاط مناسب سبب جریان مواد به سمت بیرون حفره پین می‌شود. لذا منطقه اغتشاش گسترش یافته و ناحیه قلابی پیوسته و کامل‌تری شکل می‌گیرد. طبق شکل ۱۶ (ب) ترک ابتدا در راستای عرضی و سپس در راستای ضخامت گسترش می‌یابد. این حالت شکست ترکیبی از شکست برشی در ناحیه قلاب برای ورق پایینی و شکست کششی در ورق بالا است. در این حالت جدایش ناقص دکمه جوش^۲ با ماهیت کششی برشی حادث می‌شود که پیشتر توسط نیرومند و کاشانی مشاهده شد [۳۹]. برای شکل ۱۶ (ج) نیز گسترش ترک در راستای ضخامت سبب شده تا اتصال‌ها نیروی بیشتری را قبل از جدایش کامل دکمه جوش متحمل شوند. این حالت شکست با ماهیت کششی سبب جدایش کامل دکمه جوش می‌شود. برای جدایش ناقص و کامل دکمه جوش، پس از شکست بخشی از ورق بالایی در ورق

الکترون‌های سیلانی و یون‌های حاضر در مواد، سبب انتقال اتم‌ها می‌شود [۳۷]. قابل ذکر است که دیگر اثر غیرحرارتی الکتروپلاستیک تحت عنوان وزش الکترون نیز به انتقال تکانه کمک می‌کند. طبق این اثر سرعت رانش^۱ الکترون‌های جاری در جریان الکتریکی که وابسته به مقدار اختلاف پتانسیل بین الکترودها، جریان الکتریکی و رفتار مواد ورق‌ها هستند، سبب انتقال تکانه می‌شوند [۳۸]. همچنین چیدمانی که برای الکترودها در دو سمت مرکز همپوشانی اتصال در نظر گرفته شده به نحوی است که سبب تسریع حرکت اتم‌ها و لذا افزایش قابلیت نفوذ و همچنین بهبود حرکت الکترون‌ها در ناحیه جوش می‌شود.

کاهش ۱۳٪ در توان خروجی نسبی برای اثر پارامتر تعاملی در شکل ۱۴ حاکی از آن است که کاهش توان ناشی از اثر الکتروپلاستیک توانسته بر افزایش سختی ذاتی پودر کاربرد سیلیسیم و اثر قفل‌شدگی زنگ غلبه کند. در نتیجه می‌توان اثر منفی افزودن پودر بر عمر ابزار را به کمک اثر الکتروپلاستیک ارتقا داد. با توجه به بررسی تاثیر همزمان اعمال جریان و پودر می‌توان نتیجه گرفت که اثر الکتروپلاستیک بر ریزساختار، مکملی بر تاثیر نانوذرات می‌باشد. به نحوی که اثرات همسوی مثبت پارامترهای جریان و پودر بر نیروی شکست جمع‌شده، از طرفی تاثیر منفی اعمال پودر بر توان خروجی نیز با اثر غیرحرارتی الکتروپلاستیک مثبت می‌گردد.

2 Partial nugget pull-out

1 Drift velocity

به کمک طرح عاملی K^2 و لحاظ سه پارامتر پیوسته شامل سرعت دورانی، زمان ماند، جریان الکتریکی و یک پارامتر موضوعی (افزودن نانو ذرات) انجام شدند. اثر این پارامترها بر استحکام اتصال‌ها و توان خارجی اسپیندل مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مهم این مقاله بصورت زیر خلاصه شده‌است:

۱. طبق نتایج تحلیل آماری، پارامترهای زمان ماند، سرعت دورانی، جریان الکتریکی و نانو ذرات به ترتیب بیشترین تاثیر را بر نیروی شکست دارند. همچنین برای توان خروجی نسبی نیز پارامترهای سرعت دورانی، جریان الکتریکی و پودر بیشترین تاثیر را نشان دادند. قابل ذکر است که زمان ماند نیز تاثیر بر این خروجی نداشت.
۲. روند تغییرات دما در حین اعمال جریان الکتریکی، با دقت مناسبی توسط روش اجزای محدود مدل‌سازی شد. با اعمال جریان الکتریکی معادل $A = 500$ ، مقدار عددی چگالی جریان بیشینه در ورق فولادی بیشتر از چگالی آستانه و در حدود $A/45 \text{ mm}^2$ پیش‌بینی شد.
۳. اعمال ذرات کاربرد سیلیسیم به ناحیه اتصال منجر به نفوذ ذرات در مرزخانه‌ها و ایجاد نانو کامپوزیت شد. مواردی همچون سختی ذاتی نانو ذرات، قفل شدن حرکت نابجایی‌ها و به تبع آن جلوگیری از رشد دانه‌ها سبب افزایش ۱۰٪ در نیروی شکست و ۱۲٪ در توان خروجی نسبی شد. در نتیجه افزایش نیروی شکست ناشی از ایجاد نانو کامپوزیت، با کاهش عمر ابزار همراه خواهد بود.
۴. اثر غیرحرارتی الکتروپلاستیک سبب تسریع در وقوع بازیابی و تبلور مجدد گردید. در نتیجه دانه‌بندی بسیار ریزدانه و هم‌محور، در ریز ساختار ناحیه اغتشاش ایجاد شد. افزایش حدود ۱۷٪ در نیروی شکست و کاهش ۳۰٪ در توان خروجی نسبی، از نتایج اعمال جریان الکتریکی $A = 500$ است. کاهش چشمگیر توان خروجی نسبی را می‌توان ناشی از کاهش تنش سیلان، مدول الاستیک، کاهش مقاومت به تغییر شکل و کاهش سختی لحاظ کرد.
۵. اعمال همزمان جریان الکتریکی و افزودن نانو ذرات، سبب افزایش چشمگیری در حدود ۲۷٪ در میانگین نیروی شکست و کاهش ۱۳٪ در توان خروجی نسبی شدند. در نتیجه می‌توان

پایینی باقی می‌ماند. برای حالت چهارم شکست، ترک ایجاد شده در ناحیه هوک توانایی حرکت در مسیر عرض جوش و یا ضخامت ورق بالایی را ندارد (شکل ۱۶ د). در این حالت افزایش نفوذ و بهبود دانه‌بندی سبب تقویت ناحیه جوش و ایجاد پیوند در سطح وسیعی شده‌است. طوریکه انرژی زیادی جهت گسترش ترک از ناحیه قلاب مورد نیاز است. در واقع پیش از تامین نیروی کافی برای گسترش ترک از نوک قلاب، نیروی وارد شده بر استحکام برشی آلومینیوم در ناحیه مجاور تورفتگی شانه غلبه کرده و سبب شکست کششی یک طرفه می‌گردد. این حالت شکست شبیه به شکست رایج در آزمایش کشش تک‌محوره است. در شکل ۱۷ تغییرات نیروی شکست برای حالت‌های مختلف شکست نشان داده شده‌است.

طبق شکل ۱۷ نکته قابل توجه وقوع شکست بین‌سطحی برای آزمایش‌هایی در سطوح پایین پارامترها است. جایی که سرعت دورانی و زمان ماند کم بوده و در نتیجه حرارت و جریان کافی ایجاد نشده‌است. شرایطی مشابهی پیشتر نیز گزارش شده‌است [۴۰]. از طرفی مستحکم‌ترین اتصال که در آزمایش شماره ۱۶ و با اعمال همزمان سطوح بالای پارامترها انجام شد، با حالت شکست از ناحیه مجاور تورفتگی شانه گسیخت. این حالت شکست تا به حال در اتصال ورق‌های ناهمنام آلومینیوم-فولاد گزارش نشده‌است [۴۱، ۴]. این امر تاییدی بر دستیابی به اتصال‌هایی بسیار مستحکم با ایجاد نیروهای شکست بیش از ۷ kN است. اگرچه استحکام‌های بیش از این مقدار برای فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی در اتصال آلومینیوم-فولاد گزارش شده، اما در اغلب موارد سرعت دورانی و زمان‌های ماند بزرگ، عوامل متعاقبی همچون افزایش مصرف انرژی، سایش شدید ابزار و افزایش عیوب ریزساختاری به ویژه در سمت آلومینیوم را در پی داشته است [۴۲]. در واقع در این آزمایش (شماره ۱۶)، در سرعت دورانی و زمان نه چندان زیاد نسبت به سایر مراجع، شرایطی مناسب از جنبه دانه‌بندی، نفوذ و هندسه ناحیه قلاب به کمک اثر الکتروپلاستیک و اعمال نانو ذرات ایجاد شد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله فرآیند جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی اصطکاکی الکتروپلاستیک برای اتصال‌دهی آلومینیوم T6-۶۰۶۱ به فولاد گالوانیزه دو فازی ۵۹۰ با اعمال نانو ذرات بررسی شد. آزمایش‌ها

friction-stir welding (i-FSW): A novel hybrid process for joining of thermoplastics, *Journal of Manufacturing Processes*, 20 (2015) 234-244.

- [9] X. Long, S.K. Khanna, Modelling of electrically enhanced friction stir welding process using finite element method, *Science and Technology of Welding and Joining*, 10(4) (2005) 482-487.
- [10] K. Chen, X. Liu, J. Ni, Electrically Assisted Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloy to Advanced High Strength Steel, in: *ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2017.
- [11] B.J. Ruskiewicz, T. Grimm, I. Ragai, L. Mears, J.T. Roth, A review of electrically-assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(11) (2017).
- [12] M. Jafari Vardanjani, A. Araee, Shunting Effect in Resistance Spot Welded Joints of Aluminum Alloys, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50(3) (2018) 561-576 (in Persian).
- [13] O. Troitskii, V. Likhtman, The anisotropy of the action of electron and gamma radiation on the deformation of zinc single crystals in the brittle state, in: *Soviet Physics Doklady*, 1963, pp. 91.
- [14] J. Asghar, N.V. Reddy, Importance of tool configuration in incremental sheet metal forming of difficult to form materials using electro-plasticity, (2013).
- [15] S. Wang, Effect of electric pulses on drawability and corrosion property of AZ31 magnesium alloy, *Tsinghua University, Beijing*, (2009).
- [16] H.-D. Nguyen-Tran, H.-S. Oh, S.-T. Hong, H.N. Han, J. Cao, S.-H. Ahn, D.-M. Chun, A review of electrically-assisted manufacturing, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2(4) (2015) 365-376.
- [17] P. Santos, J. Oliveira, P.L. INÁCIO, Y. Chen, P. VILAÇA, R. Miranda, T.G. Santos, Recent developments in FSW assisted by electrical current hybrid process, in: *International Conference on Scientific and Technical Advances on Friction Stir Welding and Processing*, 2017.
- [18] S. Tebyani, K. Dehghani, Effects of SiC nanopowders on the mechanical properties and microstructure of interstitial free steel joined via friction stir spot welding, *Materials & Design*, 90 (2016) 660-668.
- [19] M. Paidar, M.L. Sarab, Friction stir spot welding of 2024-T3 aluminum alloy with SiC nanoparticles, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(1) (2016) 365-370.
- [20] M. Asadollahi, A. Khalkhali, Optimization of mechanical

نتیجه گرفت که اثر الکتروپلاستیک مکملی بر تاثیر نانوذرات است. طوری که اثرات مثبت این دو در استحکام اتصال تشدید شده و از طرفی اثر منفی اعمال پودر بر توان خروجی، مثبت می‌گردد.

۶. وقوع حالت‌های شکست به ترتیب با حالت‌های بین سطحی، جدایش ناقص دکمه جوش، جدایش کامل و شکست از ناحیه مجاور تورفتگی شانه سبب افزایش نیروی شکست شدند. مستحکم‌ترین اتصالات در سطوح بالای پارامترها و با حالت شکست کششی یک طرفه از ناحیه مجاور تورفتگی شانه گسیختند. این حالت شکست منجر به ایجاد نیروهای شکست بیش از ۷ kN شد.

۵- مراجع

- [1] A. Barimani-Varandi, A.J. Aghchai, Electrically-assisted mechanical clinching of AA6061-T6 aluminum to galvanized DP590 steel: effect of geometrical features on material flow and mechanical strength, *Mechanics & Industry*, 21(5) (2020) 529.
- [2] A. Barimani-Varandi, S. Jamal Hosseinipour, Investigation of process parameters in production of cylindrical parts by gradient warm deep drawing, *Modares Mechanical Engineering*, 14(10) (2015) 187-194 (in Persian).
- [3] A. Automation, Mazda develops world's first steel and aluminium joining technology using friction heat, (2005).
- [4] T. Pan, A. Joaquin, D.E. Wilkosz, L. Reatherford, J.M. Nicholson, Z. Feng, M.L. Santella, Spot friction welding for sheet aluminum joining, in: *Proceedings of the 5th international symposium of friction stir welding*, Metz, France, 2004.
- [5] M. Merzoug, M. Mazari, L. Berrahal, A. Imad, Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys, *Materials & Design*, 31(6) (2010) 3023-3028.
- [6] Y. Sun, Y. Konishi, M. Kamai, H. Fujii, Microstructure and mechanical properties of S45C steel prepared by laser-assisted friction stir welding, *Materials & Design*, 47 (2013) 842-849.
- [7] M. Ahmadnia, A. Seidanloo, R. Teimouri, Y. Rostamiyan, K.G. Titrashi, Determining influence of ultrasonic-assisted friction stir welding parameters on mechanical and tribological properties of AA6061 joints, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(9-12) (2015) 2009-2024.
- [8] B. Vijendra, A. Sharma, Induction heated tool assisted

- texture evolution of the cold-rolled AZ91 magnesium alloy strip under electropulsing treatment, *Journal of alloys and compounds*, 509(11) (2011) 4308-4313.
- [33] Z.S. Xu, Y.X. Chen, Effect of electric current on the recrystallization behavior of cold worked α -Ti, *Scripta Metallurgica*, 22(2) (1988) 187-190.
- [34] Z. Xu, G. Tang, S. Tian, F. Ding, H. Tian, Research of electroplastic rolling of AZ31 Mg alloy strip, *Journal of materials processing technology*, 182(1-3) (2007) 128-133.
- [35] H.-y. Tian, G.-y. Tang, F. Ding, Z.-H. Xu, Y.-B. Jiang, Research on electroplastic drawing of Mg-alloy wire, *NONFERROUS METALS-BEIJING-*, 59(2) (2007) 10.
- [36] L. Guan, G. Tang, P.K. Chu, Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals, *Journal of materials research*, 25(7) (2010) 1215-1224.
- [37] R. Pan, Q. Wang, D. Sun, P. He, Effects of electric field on interfacial microstructure and shear strength of diffusion bonded α -Al₂O₃/Ti joints, *Journal of the European Ceramic Society*, 35(1) (2015) 219-226.
- [38] H. Conrad, *Electroplasticity in metals and ceramics*, *Materials Science and Engineering: A*, 287(2) (2000) 276-287.
- [39] A. Niroumand-Jadidi, S. Kashani-Bozorg, Failure mechanisms of friction stir spot welds of AA6061-T6/DP590 steel during tensile-shear testing, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 42(10) (2019) 2247-2261.
- [40] Y. Bozkurt, M.K. Bilici, Application of Taguchi approach to optimize of FSSW parameters on joint properties of dissimilar AA2024-T3 and AA5754-H22 aluminum alloys, *Materials & Design*, 51 (2013) 513-521.
- [41] A. Sakhaei, M. Kazemi Nasrabadi, A. Jalali Aghchai, A. Barimani-Varandi, Optimization of friction stir spot welding process parameters to achieve maximum failure load, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 5(1) (2018) 13-27 (in Persian).
- [42] K. Chen, X. Liu, J. Ni, Keyhole refilled friction stir spot welding of aluminum alloy to advanced high strength steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 249 (2017) 452-462.
- and microstructural properties of friction stir spot welded AA 6061-T6 reinforced with SiC nanoparticles, *Materials Research Express*, 5(11) (2018) 116517.
- [21] H. Badarinarayan, Y. Shi, X. Li, K. Okamoto, Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(11) (2009) 814-823.
- [22] A. Barimani-Varandi, The non-isothermal hot deep drawing of AA5083 aluminum alloy, *Mechanics & Industry*, 21(1) (2020) 112.
- [23] A. Barimani-Varandi, S.J. Hosseini-pour, Numerical and experimental study on the effect of forming speed in gradient warm deep drawing process, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 8(2) (2018) 51-66 (in Persian).
- [24] J. Wang, H.-P. Wang, F. Lu, B.E. Carlson, D.R. Sigler, Analysis of Al-steel resistance spot welding process by developing a fully coupled multi-physics simulation model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89 (2015) 1061-1072.
- [25] D.C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, John Wiley & sons, 2017.
- [26] X. Song, L. Ke, L. Xing, F. Liu, C. Huang, Effect of plunge speeds on hook geometries and mechanical properties in friction stir spot welding of A6061-T6 sheets, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(9-12) (2014) 2003-2010.
- [27] R. Stephen, B. Anthony, *Hierarchical linear models*, Sage Publications, Thousand Oaks, CA, 2002.
- [28] A. Joglekar, A. May, Product excellence through design of experiments, *Cereal foods world*, 32(12) (1987) 857-868.
- [29] M. Molotskii, V. Fleurov, Magnetic effects in electroplasticity of metals, *Physical review B*, 52(22) (1995) 15829.
- [30] X. Liu, S. Lan, J. Ni, Experimental study of electroplastic effect on advanced high strength steels, *Materials Science and Engineering: A*, 582 (2013) 211-218.
- [31] T.A. Perkins, T.J. Kronenberger, J.T. Roth, Metallic forging using electrical flow as an alternative to warm/hot working, (2007).
- [32] Y. Jiang, G. Tang, C. Shek, W. Liu, Microstructure and

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

A. Barimani-Varandi, A. Jalali Aghchai . *Electroplastic friction stir spot welding for joining AA6061-T6 aluminum to galvanized DP590 steel* ,*Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(6) (2021) 3733- 3750.

DOI: [10.22060/mej.2020.18678.6876](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18678.6876)

