Journal of Industrial Innovations 2(2) (2024) 180 – 193

Industrial Innovations

https://jii.araku.ac.ir

ISSN: 2980-8847

Quality Improvement of Resistance Spot Welding of a Pressure Vessel by Taguchi Method

Ashkan Nouri [a*], Amir Mohammad Golmohammadi [b]

[a] Department of materials science and engineering, Faculty of Engineering, Arak university, Arak, Iran.
[b] Department of Industrial engineering, Faculty of Engineering, Arak university, Arak, Iran.

Original Article

Use your device to scan and read the article online

Citation: Nouri A, Golmohammadi A M. Quality Improvement of Resistance Spot Welding of a Pressure Vessel by Taguchi Method. Industrial Innovations. 2024;2(2):180-193.

https://doi.org/10.61186/jii.2.2.180

KEYWORDS

Quality improvement;
Process adjustment;
Experiment design;
Taguchi method.

ABSTRACT

Today, the progress of industries depends on quality optimization, and improving production processes through setting controllable parameters of the process can greatly help this. The present research shows the practical experience gained in the development of the resistance welding quality of a pressure vessel, in which the well-known Taguchi method is used in the design of experiments to minimize the effect of uncontrollable factors on the target value. In this research, the pressure between the electrodes, the size and shape of the electrodes and the working surface (smoothness and cleanliness) were considered as the most important controlled variables. By conducting the designed test in 5 repetitions, the quality of the resistance welding improved significantly. It was observed that among the parameters affecting the quality of spot welding, the welding time has the greatest effect on the strength of the weld. The investigation of the current intensity showed that the increase of this factor as well as the welding time decreases the hardness of the welding center.

Extended Abstract

1. Introduction

Spot resistance welding is one of the oldest welding methods that is used to connect parts in many industries including automobile, aerospace, electronics and electrical industries. In this method, welding is created by the combination of heat, pressure and time. One of the advantages of spot welding compared to other methods is its high speed and compatibility with automatic production lines. Time control is very important. If the time parameter is too long, the main metal will melt too much in the welding position and may even boil. This can cause some problems such as gas porosity and even cause the melt to flow out of the welding position. Spot welding consists of one or more cycles of applying current, each of which consists of several cycles separated by a predetermined off time. This timing may be used for welding in different ways.

In this article, an attempt has been made to examine the hardness of the center of the weld button (the middle of the weld button) and to compare the parameters affecting it with the parameters affecting the hardness of the weld surface. Also, establishing the time of electric current in the form of pulses and its effect on the strength of spot welding have been less studied by other researchers. In this article, the effect of the number of pulses and other parameters on the physical properties of welding has been studied. For this purpose, by using the powerful method of designing tests from the important parameters of spot welding (sheet thickness, current intensity, time, pressure and number of pulses) as the input of the tests, and from the criteria indicating the physical properties of the weld, such as the hardness of the weld surface, we will use the hardness of

* Corresponding author,
E-mail address: a-nouri@araku.ac.ir
DOI: https://doi.org/10.61186/jii.2.2.180
Received: February 8, 2025; Received in revised form: February 21, 2025; Accepted: February 24, 2025.
Article type: Research Paper
©Author

the center of the weld button and the strength of the weld as the answer of the tests. By using the design of the experiments, it is possible to obtain the main effects of the parameters and more importantly the interaction of their effects with the minimum number of experiments.

2. **Experimental procedure**

The experiments were designed in two groups and all the main and mutual effects of the input parameters on the response of the experiments (hardness of the weld surface, hardness of the weld center and weld strength) were studied. For welding, the electrode of chromium-plated copper alloys with a diameter of 6 mm is used. The equipment used includes a spot welding machine with the ability to program to apply different parameters.

To evaluate the tensile strength of the samples made by the universal tensile machine with an accuracy of 0.1kN, it was used. In the conducted tests, the force application rate was 0.5 kN/s and the maximum force endured by the weld before tearing or failure was considered as the strength of the weld.

The investigated variables have simultaneous effects, and a change in one of them causes a change in other variables and finally the weld strength. In order to obtain the analytical model, the physical properties of the weld by changing the variables, in which the mutual and simultaneous effects of the parameters are also considered, the matrix of specially designed experiments was used. By using this method, by performing fewer tests, more accurate results can be obtained. Sometimes, it is not possible to perform some tests at the same time, such as the destructive tensile test and the hardness measurement of the weld center on one sample, because the weld is cross-cut and the hardness is measured in the middle of the weld button. Therefore, the experiments were designed and performed in two separate groups.

3. **Results and Discussion**

The internal structure of the weld affects the strength and hardness of the weld, and by measuring the hardness of the weld, the structure, strength and efficiency of the weld can be evaluated indirectly. Hence, first the Vickers hardness of the weld surface was measured, then by cutting the weld cross-section, the hardness of the center of the weld button (the middle of the weld) was measured. In the hardness of the weld surface, the thickness-current factor has the greatest effect on the response of the tests (hardness of the weld surface). As shown in Figure 1, as the thickness of the sheet decreases, the hardness of the welding surface increases, which is more obvious in the high intensity current. The heat in the region of the welding button is increased and transferred to other parts of the sheet and electrodes.

As shown in Figure 2, increasing the current at low or high pressure leads to an increase in the hardness of the weld surface. Increasing the pressure first increases the hardness of the weld surface up to a certain level and then decreases the hardness. Increasing the pressure causes better heat transfer of the welding button through the electrodes, which will cause the weld to cool down faster and increase the hardness, but this increase in heat transfer is up to a certain limit, and after that, increasing the pressure will probably lead to compression. Too much, two sheets come into contact with each other and the resistance decreases. This leads to a decrease in the heat generated and as a result, a decrease in the structure change and welding hardness.

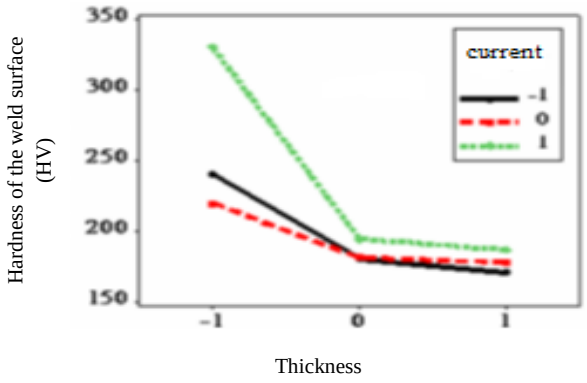


Figure 1 The effect of thickness and current at different levels on the surface hardness of the spot weld.

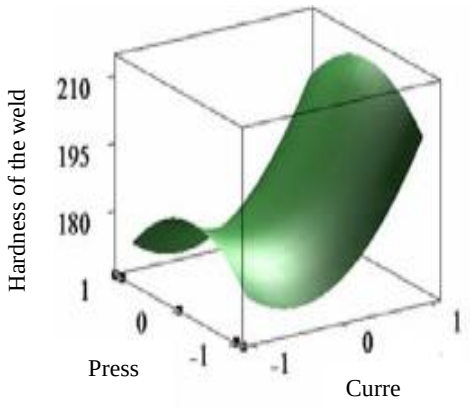


Figure 2 The relationship between pressure and current with the hardness of the weld surface

4. conclusion

After examining the effective parameters on spot welding in low carbon steel sheets, in general, the results of the tests can be summarized as follows:

1- Among the effective parameters in spot welding, the welding time has the greatest effect on the strength of spot welding.
2- Increasing the number of pulses causes a slight increase in the strength of the spot weld, but using the number of two pulses is more appropriate.
3- The interaction effect of current intensity-thickness has the greatest effect on the hardness of the weld surface.
4- Increasing the pressure factor first increases the hardness of the weld surface, and if the pressure exceeds a certain limit, it will lead to a decrease in the hardness of the weld surface.
5- Increasing the intensity of the current and welding time causes a decrease in the hardness of the weld.

نوآوری‌های صنعتی

شاپا: ۸۸۴۷-۲۹۸۰

بهبود کیفیت جوش مقاومتی نقطه‌ای یک مخزن تحت فشار به روش تاگوچی

اشکان نوری[الف*]، امیرمحمد گل‌محمدی [ب]

[الف] گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

[ب] گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

واژگان کلیدی

بهبود کیفیت؛
تنظیم فرآیند؛
طراحی آزمایش؛
روش تاگوچی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۴

چکیده

امروزه پیشرفت صنایع کوچک و بزرگ در گرو بهینه‌سازی کیفیت قرار دارد و بهبود فرآیندهای تولید از طریق تنظیم پارامترهای قابل کنترل فرآیند می‌تواند، به این امر کمک فراوان کند. تحقیق حاضر بیانگر تجربیات کاربردی حاصل در توسعه کیفیت جوش مقاومتی یک مخزن تحت فشار است که در آن از روش شناخته شده تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است تا تأثیر عوامل غیرقابل کنترل بر مقدار هدف کمینه شود. در تحقیق حاضر فشار بین الکترودها، اندازه و فرم الکترودها و چگونگی سطح کار (صافی و تمیزی) به عنوان مهمترین متغیرهای کنترل شونده در نظر گرفته شد. با انجام آزمایش طراحی شده در ۵ تکرار، کیفیت جوش مقاومتی به میزان قابل توجهی بهبود یافت. مشاهده شد در بین پارامترهای مؤثر بر کیفیت جوش نقطه‌ای، زمان جوشکاری بیشترین تأثیر را بر استحکام جوش دارد. بررسی شدت جریان نشان داد که افزایش این فاکتور و همچنین زمان جوشکاری، باعث کاهش سختی مرکز جوش می‌گردد.

۱- مقدمه

جوش مقاومتی نقطه‌ای یکی از قدیمی‌ترین روش‌های جوشکاری می‌باشد که برای اتصال قطعات در بسیاری از صنایع از جمله خودرو، هوافضا، الکترونیک و صنایع الکتریکی استفاده می‌شود. در این روش، جوش به‌وسیله ترکیب گرما، فشار و زمان ایجاد می‌شود. همان‌طور که از نام این روش پیداست، در هنگام عبور جریان، مقاومت الکتریکی موضع اتصال قطعاتی که به‌یکدیگر جوش داده می‌شوند باعث ایجاد گرما در موضع اتصال شده و هم زمان فشار نیز توسط الکترودها اعمال می‌شود. زمانی نیز برای برقراری جریان اتصال دو قطعه به یکدیگر در نظر گرفته می‌شود. بعد از سرد شدن فلز مذاب، نقطه جوش ایجاد می‌شود. یکی از مزایای جوش نقطه‌ای نسبت به سایرروش‌ها، سرعت بالای آن و قابلیت تطبیق آن با خطوط تولید اتوماتیک می‌باشد. پارامترهای مؤثر بر جوش نقطه‌ای عبارتند از:

جریان: طبق قانون اهم، هنگامی که جریان الکتریکی ازیک مقاومت عبور کند گرما تولید می‌شود. هر چند این جریان، حرارت لازم برای ذوب منطقه بین دو ورق را فراهم می‌سازد، اما به علت کوتاه بودن زمان برقراری جریان و مسیر کوتاه عبور جریان، شدت جریان زیادی برای ایجاد گرمای ذوب لازم است.

زمان: کنترل زمان بسیار مهم است. اگر پارامتر زمان خیلی طولانی باشد، فلز اصلی در موضع جوش بیش از حد ذوب شده و

* نویسنده مسئول؛
آدرس پست الکترونیک: a-nouri@araku.ac.ir

ممکن است حتی به حالت جوش درآید. این امر می‌تواند باعث بروز برخی از مشکلات نظیر تخلخل گازی شده و حتی موجب جریان یافتن مذاب به بیرون ازموضع جوش شود.

تعداد پالس‌های جریان: جوش نقطه‌ای شامل یک، یا چند چرخه اعمال جریان است که هر یک شامل چند سیکل بوده که با یک زمان خاموشی از پیش تعیین شده تفکیک شده‌اند. این زمان‌بندی ممکن است به صور مختلف برای جوشکاری به کار رود. در بعضی موارد، از یک سری پالس‌های جریان با اندازه‌های مشابه و زمان‌های نیم سیکل یا بیشتر استفاده می‌شود تا گرمای لازم را به آرامی ایجاد نمایند. به این نوع جوشکاری، جوشکاری پالسی (ضربه‌ای) گفته می‌شود.

فشار: نخستین هدف ایجاد فشار، نگه داشتن دو قطعه در کنار هم می‌باشد. دو الکترود جوشکاری با اعمال نیرو، باعث فشرده شدن دو ورق به هم می‌شوند. جوش نقطه‌ای در اواخر قرن نوزده میلادی شناخته شد و استفاده از آن برای اتصال ورق‌ها از سال ۱۹۲۰ مرسوم گشت [۱]. جوش نقطه‌ای در صنعت خودرو کاربرد زیادی دارد. ورق‌های مورد استفاده در بدنه خودرو قابلیت خوبی برای اتصال به یکدیگر با استفاده از جوش نقطه‌ای دارند. جوش نقطه‌ای از سال ۱۹۵۰ در صنعت خودرو به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفت، به طوری که امروزه در بدنه یک خودروی مدرن، بین دوهزار تا پنج هزار جوش نقطه‌ای وجود دارد [۲]. بیوسفی و همکارانش به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر خصوصیات اتصالات جوش نقطه‌ای پرداختند و نتیجه گرفتند که نیروی الکترود نسبت به دو پارامتر دیگر تأثیر بیشتری بر سختی و استحکام جوش داشته و کاهش نیروی اعمالی الکترود، منجر به کاهش سختی جوش می‌شود [۳]. در سایر منابع اشاره شده که کوتاه شدن زمان انجام جوشکاری می‌تواند انتقال گرما از فلز اصلی و اعوجاج اجزای جوش را کاهش داده و طول منطقه متأثر از حرارت را نیز کمتر سازد، همچنین برای بالا بردن کیفیت جوش نقطه‌ای از جوشکاری پالسی استفاده شده است [۴].

در مطالعات دیگران، بیشتر به سختی سطح جوش و استحکام جوش نقطه‌ای پرداخته شده است [۷- ۵]. بنابراین دراین مقاله سعی شده است سختی مرکز دکمه جوش (وسط دکمه جوش) مورد بررسی قرار گیرد و پارامترهای تأثیرگذار بر آن با پارامترهای مؤثر بر سختی سطح جوش مقایسه شوند. همچنین برقراری زمان جریان الکتریکی به صورت پالسی و تأثیر آن بر استحکام جوش نقطه‌ای که کمتر توسط دیگر محققان مطالعه شده است، بررسی شود. در مقاله حاضر به مطالعه اثر تعداد پالس‌ها و دیگر پارامترها بر خصوصیات فیزیکی جوش پرداخته شده است. برای این منظور با استفاده از روش توانمند طراحی آزمایش‌ها از پارامترهای مهم جوش نقطه‌ای (ضخامت ورق، شدت جریان، زمان، فشار و تعداد پالس) به عنوان ورودی آزمایش‌ها، و از معیارهای نشان‌دهنده خصوصیات فیزیکی جوش مانند سختی سطح جوش، سختی مرکز دکمه جوش و استحکام جوش به عنوان پاسخ آزمایش‌ها استفاده خواهیم کرد. با استفاده از طراحی آزمایش‌ها می‌توان با حداقل تعداد آزمایش، اثرات اصلی پارامترها و مهم‌تر از آن تعامل اثر آنها را بدست آورد. آزمایش‌ها دردو گروه طراحی شد و تمامی اثرات اصلی و متقابل پارامترهای ورودی بر پاسخ آزمایش‌ها (سختی سطح جوش، سختی مرکز جوش و استحکام جوش) مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- روش پژوهش

برای جوشکاری از الکترود آلیاژهای مس کروم دار با قطر ۶ میلی‌متر استفاده شد. ماده مورد جوشکاری فولاد کم کربن بود. تجهیزات مورد استفاده شامل یک دستگاه جوش نقطه‌ای با قابلیت برنامه‌ریزی جهت اعمال پارامترهای مختلف است. در انجام آزمایش‌ها از ورق با ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شده است. برای ارزیابی استحکام کششی نمونه‌های ساخته شده از دستگاه کشش یونیورسال با دقت ۰/۱ kN استفاده شد. آزمایش در دمای اتاق و با نرخ اعمال نیروی ۰/۵ kN/s انجام شد و حداکثر نیروی تحمل شده توسط جوش قبل از پارگی و یا شکست به عنوان استحکام جوش در نظر گرفته شد. سختی جوش‌ها به روش ویکرز با استفاده از فرورونده الماسه هرمی با زاویه رأس ۱۳۶ درجه و بار ۵۰ کیلوگرم اندازه‌گیری شد. برای ثبت عدد سختی هر نمونه، آزمایش پنج بار تکرار و میانگین این پنج اندازه‌گیری، به عنوان سختی نمونه ثبت شد.

متغیرهای مورد بررسی دارای اثرات هم زمان بوده و تغییر در یکی، باعث تغییر در سایر متغیرها و نهایتاً استحکام جوش می‌شود. لذا، بررسی تأثیر هر یک ازمتغیرها بر روی خروجی به تنهایی صحیح نمی‌باشد. برای بدست آوردن مدل تحلیلی،

خصوصیات فیزیکی جوش با تغییر متغیرها که در آنها اثرات متقابل و هم زمان پارامترها نیز در نظر گرفته شده باشد، از ماتریس آزمایش‌های طراحی شده خاص استفاده شد. با استفاده از این روش، با انجام تعداد آزمایش‌های کمتر، می‌توان به نتایج دقیق‌تری دست یافت. بعضاً امکان انجام هم‌زمان بعضی از آزمایش‌ها نظیرآزمون مخرب کشش و سختی‌سنجی مرکز جوش بر روی یک نمونه وجود ندارد؛ زیرا جوش، برش عرضی خورده و وسط دکمه جوش، سختی‌سنجی می‌شود. از این رو، آزمایش‌ها در دو گروه مجزا طراحی و انجام شده است. مشخصات کلی گروه‌ها در جدول ۱ آمده است. در گروه یک، با توجه به قابل کنترل بودن پارامترهای ضخامت، جریان، زمان جوشکاری و فشار، این پارامترها به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند. سختی سطح و مرکز جوش به عنوان پاسخ آزمایش‌ها انتخاب شد. سه مقداراز هر پارامتر برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شد، که این مقادیر در جدول ۲ آمده است. هدف از انجام آزمایش‌های گروه دو، بررسی تأثیرپارامترهای قابل کنترل دستگاه جوش بر استحکام جوش می‌باشد. بنابراین در این گروه، چهار پارامتر جریان، زمان جوشکاری، فشار و تعداد پالس‌ها به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. جریان، زمان جوشکاری و فشار، هر کدام در دو مقدار، و تعداد پالس‌ها در سه مقدار مجزا مطابق با جدول ۳ انتخاب شدند.

جدول ۱ گروه‌بندی آزمایش‌های انجام شده

گروه	پاسخ آزمایش‌ها	ورودی آزمایش‌ها	تعداد آزمایش‌ها
یک	سختی جوش	ضخامت، جریان، فشار، زمان	۲۷
دو	استحکام جوش	جریان، فشار، زمان، تعداد پالس	۲۴

جدول ۲ مقادیر پارامترهای مورد آزمایش در گروه یک

سطح آزمایش	-۱	۰	۱
ضخامت ورق (میلی‌متر)	۱	۱/۵	۲
جریان (کیلو آمپر)	۱۵	۲۰	۲۵
فشار (کیلو نیوتن)	۱۵۰	۲۵۰	۳۵۰
زمان (سیکل)	۱۵	۲۰	۲۵

جدول ۳ مقادیر پارامترهای مورد آزمایش در گروه دو

سطح آزمایش	۱	۲	۳
جریان (کیلو آمپر)	۸	۹	*
فشار (کیلو نیوتن)	۳۰۰	۳۵۰	*
زمان (سیکل)	۱۲	۱۸	*
تعداد پالس‌ها	۱	۲	۳

۳- نتایج و بحث

ساختار داخلی جوش، بر استحکام و سختی جوش تأثیرگذار بوده و با اندازه‌گیری سختی جوش، می‌توان به طورغیرمستقیم؛ ساختار، استحکام و کارآیی جوش را ارزیابی نمود [۸]. از این رو، ابتدا سختی سطح جوش اندازه‌گیری شده، سپس با برش مقطع جوش، سختی مرکز دکمه جوش اندازه‌گیری شد. آزمایش‌های گروه یک با در نظر گرفتن سختی سطح جوش و سختی مرکز جوش، به عنوان پاسخ آزمایش‌ها در نرم افزار MINITAB تحلیل شد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴ تأثیر پارامترهای جوش نقطه‌ای بر سختی سطح جوش

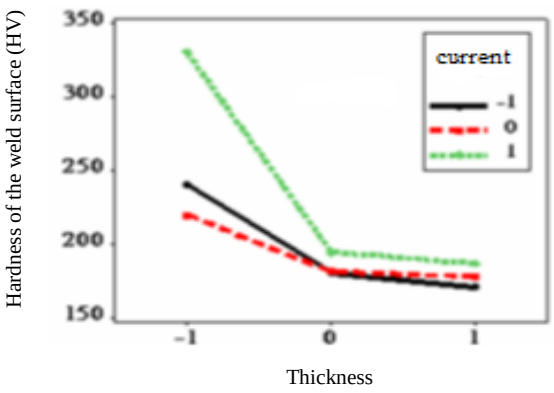
منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار (F)	مقدار (p)
فرمول بندی	۱۴	۲۱۹۷۱/۵	۱۵۶۹/۴	۵/۶۴	۰/۱۶۱
اثرات خطی	۴	۱۳۹۷۹/۳	۸۵۴/۶	۳/۰۷	۰/۲۶

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار(F)	مقدار ((p
اثرات غیرخطی	۴	۲۵۶۶	۷۲۹/۸	۲/۶۲	۰/۲۹۵
تعاملی	۶	۵۲۲۶/۱	۹۰۴/۴	۳/۲۵	۰/۲۵۴
خطای باقی مانده	۲	۵۵۶/۴	۲۷۸/۲	-	-
عدم تطبیق	۱	۳۶۴.۹	۳۶۴/۹	۱/۹۱	۰/۳۹۹
خطای ثابت	۱	۱۹۱.۵	۱۹۱/۵	-	-
مجموع	۱۶	۲۲۵۲۷/۹	-	-	-
منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار ((F	مقدار ((p
فرمول بندی	۱۴	۲۱۹۷۱/۵	۱۵۶۹/۴	۵/۶۴	۰/۱۶۱
اثرات خطی	۴	۱۳۹۷۹/۳	۸۵۴/۶	۳/۰۷	۰/۲۶
منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار ((F	مقدار ((p
اثرات غیرخطی	۴	۲۵۶۶	۷۲۹/۸	۲/۶۲	۰/۲۹۵
تعاملی	۶	۵۴۲۶/۱	۹۰۴/۴	۳/۲۵	۰/۲۵۴
خطای باقی مانده	۲	۵۵۶/۴	۲۷۸/۲	-	-
عدم تطبیق	۱	۳۶۴/۹	۳۶۴/۹	۱/۹۱	۰/۳۹۹
خطای ثابت	۱	۱۹۱/۵	۱۹۱/۵	-	-
مجموع	۱۶	۲۲۵۲۷/۹	-	-	-

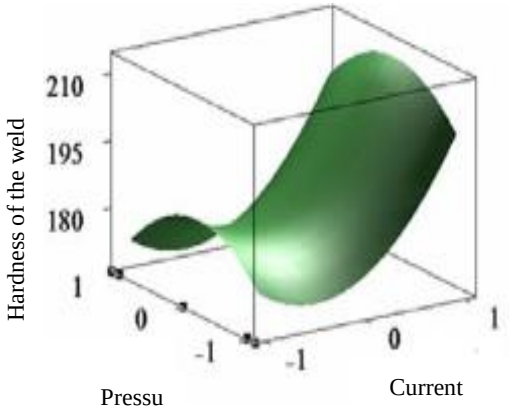
در سختی سطح جوش عامل ضخامت - جریان بیشترین تأثیر را بر پاسخ آزمایش‌ها (سختی سطح جوش) دارد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، با کاهش ضخامت ورق، سختی سطح جوش افزایش می‌یابد که در جریان با شدت بالا این امر واضح‌تر است. حرارت در منطقه ایجاد دکمه جوش، افزایش یافته و به دیگر قسمت‌های ورق و الکترودها منتقل می‌شود. در ضخامت‌های کم، این انتقال حرارت بیشتر بوده و باعث تغییر ساختار سطح جوش و افزایش سختی می‌گردد. درجریان‌های بالاتر تولید گرما افزایش یافته این اثر بیشترمشهود است [۹].

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، افزایش جریان در فشار کم یا زیاد، منجر به افزایش سختی سطح جوش می‌شود. افزایش فشار، ابتدا باعث افزایش سختی سطح جوش تا سطح معینی شده و پس از آن باعث کاهش سختی می‌گردد. افزایش فشار، باعث انتقال حرارت بهتر دکمه جوش از طریق الکترودها می‌شود که این مسئله، باعث خنک شدن سریع‌تر جوش و افزایش سختی خواهد شد. با این حال این افزایش انتقال حرارت تا حدمشخصی بوده و بعد از آن افزایش فشار، احتمالاً منجر به فشرده شدن بیشتر دو ورق به یکدیگر و کاهش مقاومت تماسی می‌گردد [۱۰]. این امر منجر به کاهش حرارت تولید شده و در نتیجه کاهش تغییر ساختار و سختی جوش می‌شود. تأثیر عوامل اصلی نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. هر چند تأثیر عوامل اصلی کمتر از اثرات متقابل می‌باشد ولی ضخامت ورق، بیشترین تأثیر را بر سختی سطح جوش دارد که این به علت پدیده انتقال حرارت از سطح می‌باشد.

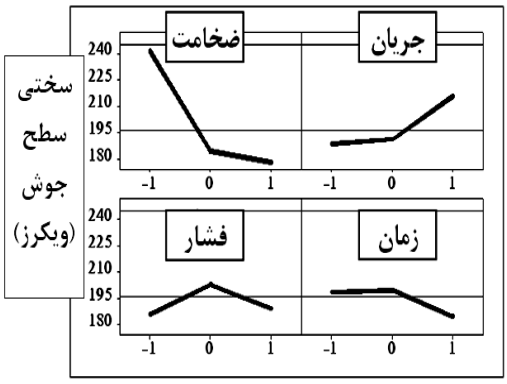
بررسی تأثیر عامل زمان نشان می‌دهد که با افزایش زمان جوشکاری، سختی سطح جوش کاهش می‌یابد. علت آن کاهش مقاومت الکتریکی تماسی بین دو ورق است به طوری که با افزایش زمان و گرم شدن محل تماس دو ورق، مقاومت الکتریکی کاهش یافته و تولید گرما نیز کاهش می‌یابد و همچنین گرمای بیشتری از طریق سطح الکترودهای مسی از ورق خارج می‌گردد [۱۱]. همانطور که درشکل ۴ نشان داده شده است این امر در ضخامت‌های بالاتر، مشخص‌تر می‌باشد. در مورد سختی مرکز جوش، عامل متقابل ضخامت - جریان و بعد از آن به ترتیب عوامل اصلی زمان، فشار و ضخامت بیشترین تأثیر را دارند (جدول ۵).



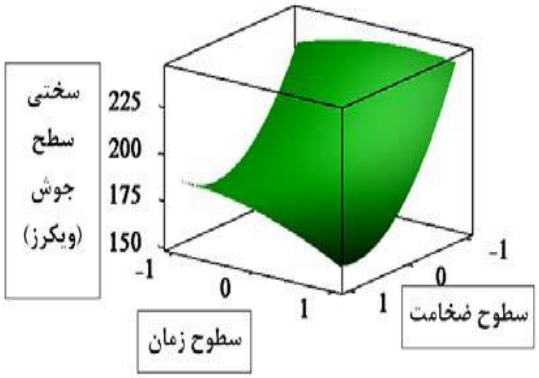
شکل ۱ تأثیر ضخامت و جریان در سطوح مختلف بر سختی سطح جوش نقطه‌ای



شکل ۲ رابطه فشار و جریان با سختی سطح جوش



شکل ۳ تأثیر عوامل اصلی بر سختی سطح جوش



شکل ۴ تأثیر عامل متقابل زمان- ضخامت بر سختی سطح جوش

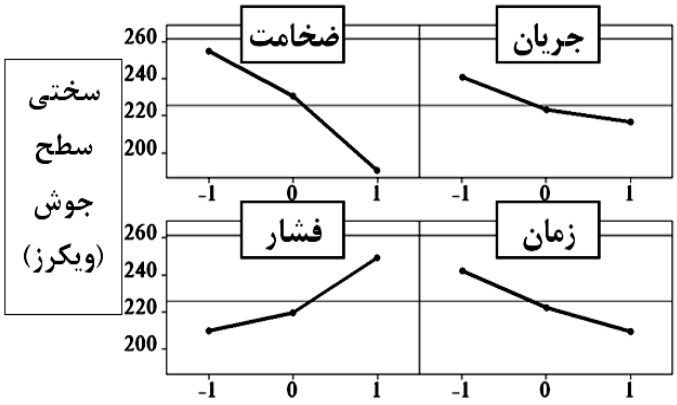
تأثیر عوامل اصلی در شکل ۵ نشان داده شده است. تأثیر عامل جریان الکتریکی و زمان جوشکاری مشابه یکدیگر است. به طوری‌که با افزایش هر دو عامل، سختی مرکز جوش کاهش می‌یابد. هر چند تأثیر زمان جوشکاری، بیشتر از مقدار جریان می‌باشد. با افزایش زمان جوشکاری، مدت زمان لازم جهت تغییر ریزساختار جوش و دانه درشت‌تر شدن ریزساختار فراهم می‌شود ولی افزایش شدت جریان، تنها باعث افزایش مقدار فلز ذوب شده و تولید گرما می‌گردد (سختی سطح جوش افزایش می‌یابد) و بر سختی مرکز دکمه جوش کمتر تأثیر می‌گذارد [۱۲]. تأثیر عامل متقابل ضخامت - جریان در شکل۶ نشان داده شده است. افزایش شدت جریان در ورق‌های ضخیم، سختی مرکز جوش را کاهش می‌دهد ولی افزایش شدت جریان در ضخامت‌های کم موجب افزایش سختی وسط جوش می‌شود. انتقال حرارت از مرکز دکمه جوش، در ضخامت کم، بیشتر از ضخامت‌های زیاد است که این امر به افزایش سختی مرکز دکمه جوش کمک می‌کند.

افزایش عامل اصلی فشار، سختی مرکز جوش را افزایش می‌دهد (شکل ۵) با زیاد شدن فشار الکترود بر موضع جوش، رشد دانه‌ها کاهش یافته و مرکز جوش ساختار ظریف‌تری پیدا می‌کند [۱۳]. بنابراین، سختی مرکز جوش افزایش می‌یابد. تأثیر فشار الکترود بر سختی وسط جوش تقریباً همانند تأثیر زمان می‌باشد. بنابراین می‌توان برای کاهش زمان تولید و افزایش بهره وری به جای افزایش زمان جوشکاری، فشار الکترودها را بر موضع جوش افزایش داد. تأثیر عامل متقابل فشار - جریان بر سختی مرکز دکمه جوش در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در هر سطح جریان، افزایش فشار الکترودها باعث افزایش سختی مرکز دکمه جوش می‌شود.

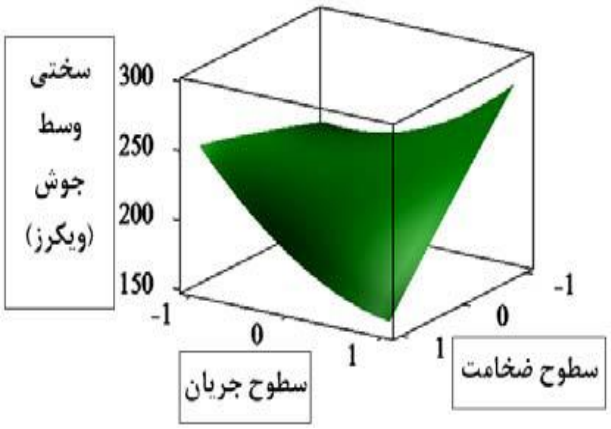
جدول ۵ تأثیر پارامترهای جوش نقطه‌ای بر سختی وسط جوش نقطه‌ای

	ضریب تخمین	ضریب خطای استاندارد	آزمون (T)	مقدار (P)
ثابت	۱۰/۵۰۳	۲۱۱/۰۹۵	۰/۰۹۸	۰/۰۰۲
ضخامت	۷/۴۲۷	-۲۴/۲۲۴	-۳/۲۶۲	۰/۰۸۳
جریان	۷/۴۲۷	-۶/۰۶۲	-۰/۸۱۶	۰/۵۰۰
فشار	۶/۴۳۲	۳۲/۰۶۴	۴/۹۸۵	۰/۰۳۸
ضریب تخمین	ضریب خطای استاندارد	آزمون T	مقدار P	ضریب تخمین
زمان	۶/۴۳۲	-۳۱/۴۰۰	-۴/۸۸۲	۰/۰۳۹
ضخامت*ضخامت	۱۲/۳۱۶	-۷/۲۵۹	-۰/۵۸۹	۰/۶۱۵
جریان*جریان	۹/۸۲۵	۱۲/۶۶۵	۱/۲۸۹	۰/۳۲۶
فشار*فشار	۱۲/۳۱۶	۱۷/۴۲۵	۱/۴۱۵	۰/۲۹۳
زمان*زمان	۱۲/۳۱۶	۴/۵۷۸	۰/۳۲۷	۰/۷۴۷
ضخامت*جریان	۱۲/۸۶۴	-۳۸/۵۸۷	-۳	۰/۰۹۵
ضخامت*فشار	۷/۴۲۷	-۳/۱۴۵	-۰/۴۲۳	۰/۷۱۳
ضخامت*زمان	۲۴/۳۵۱	-۳/۸۶۲	-۰/۱۵۹	۰/۸۸۹

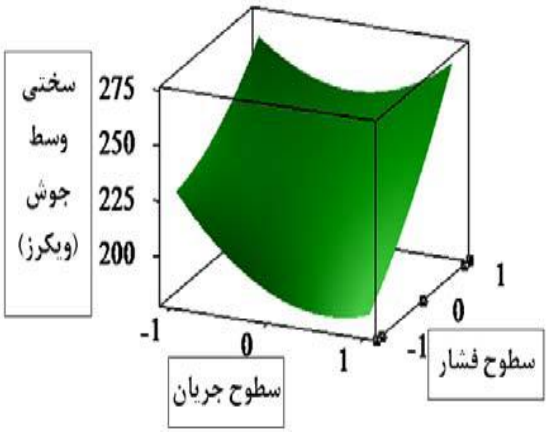
جریان*فشار	۱۲/۳۱۶	۱۲/۹۶۰	۱/۰۵۲	۰/۴۰۳
جریان*زمان	۷/۴۲۷	-۶/۰۶۲	-۰/۸۱۶	۰/۵۰۰
فشار*زمان	۱۹/۶۵۰	۰/۵۵۲	۰/۰۲۸	۰/۹۸۰



شکل ۵ تأثیر عوامل اصلی بر سختی مرکز جوش



شکل ۶ تأثیر عامل متقابل جریان- ضخامت بر سختی مرکز دکمه جوش نقطه‌ای



شکل ۷ تأثیر عامل متقابل جریان- ضخامت بر سختی مرکز دکمه جوش نقطه‌ای

برای تعیین استحکام جوش نقطه‌ای معمولاً از آزمون کشش - برش استفاده می‌شود. در تحلیل انجام شده، نیروی کششی لازم برای جدا کردن دو ورق از یکدیگربه عنوان پاسخ آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. نتایج آزمایش کشش جوش در جدول ۶ آمده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد، عوامل اصلی زمان و مقدارجریان، بیشترین تأثیر را بر استحکام جوش نقطه‌ای دارند (شکل ۸). بعد از عامل فوق، فاکتور متقابل جریان - زمان قرار دارد. (شکل‌های ۹ و ۱۰). استفاده از زمان و جریان بالاتر، منجر به افزایش استحکام جوش می‌گردد، به طوری که در جریان‌های کم، تأثیر افزایش زمان بر استحکام جوش، بیشتر از جریان‌های بالا است. تأثیر جریان و زمان قابل پیش‌بینی است؛ زیرا افزایش جریان و زمان، باعث افزایش مقدار گرما و ذوب شدن مقدار بیشتری از ماده در موضع جوش می‌شود. از این رو، عرض و قطر دکمه جوش افزایش می‌یابد و لذا، برای جدا کردن دو ورق از یکدیگر یا گسیختن دکمه جوش، نیروی بیشتری نیاز است [۱۴]. افزایش فشار الکترودها نیز استحکام جوش نقطه‌ای را بهبود می‌بخشد و باعث افزایش قطر دکمه جوش می‌شود [۱۵]. همچنین براساس شکل ۱۱، استفاده از دو پالس در مقایسه با حالت‌های تک پالسی و سه پالسی باعث افزایش جزئی استکام جوش می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

پس از بررسی پارامترهای مؤثر بر جوش نقطه‌ای در ورق‌های فولادی کم کربن، نتایج را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

۱) در بین پارامترهای مؤثر بر جوش نقطه‌ای، زمان جوشکاری بیشترین تأثیر را بر استحکام جوش دارد.

۲) افزایش تعداد پالس‌ها باعث افزایش جزیی در استحکام جوش نقطه‌ای می‌شود ولی در هرصورت استفاده از تعداد دو پالس مناسب‌تر می‌باشد.

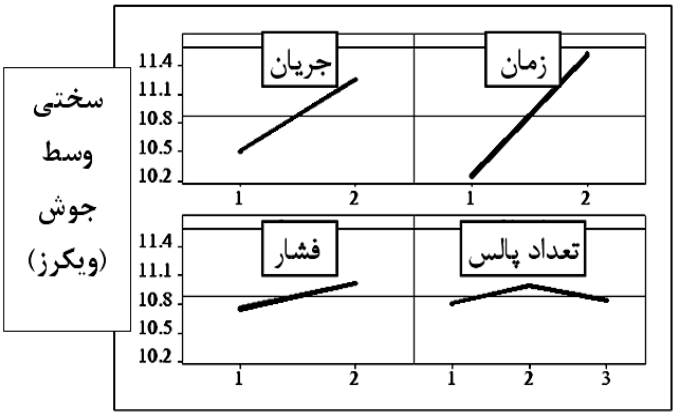
۳) فاکتور متقابل شدت جریان - ضخامت، بیشترین تأثیر را بر سختی سطح جوش دارد.

۴) افزایش فشار، در ابتدا سختی سطح جوش را افزایش داده ولی در ادامه چنانچه از حد معینی بیشتر شود، منجر به کاهش سختی سطح جوش خواهد شد.

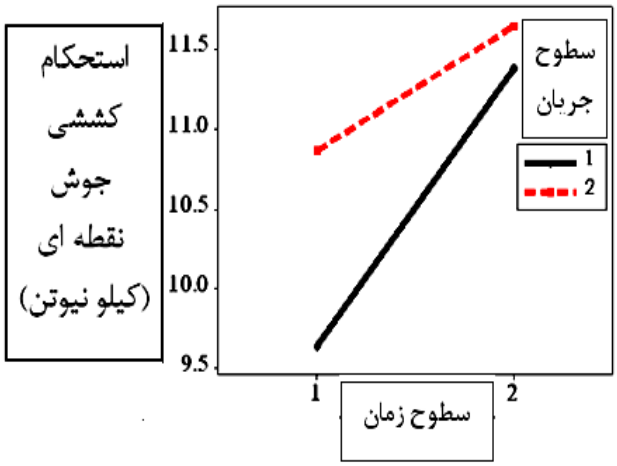
۵) افزایش شدت جریان و زمان جوشکاری، باعث کاهش سختی مرکز جوش می‌گردد.

جدول ۶ تأثیر پارامترهای جوش نقطه‌ای بر استحکام کششی- برشی جوش نقطه‌ای

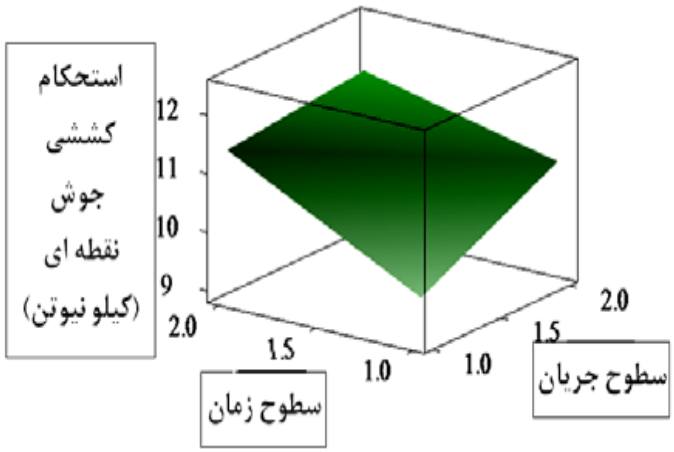
منبع تغییرات	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار (F)	مقدار(P)
جریان	۳/۳۷۵	۳/۳۷۵	۲۲/۴۴	۰/۰۴۲
زمان	۹/۶۲۶۷	۹/۶۲۶۷	۶۴	۰/۰۱۵
فشار	۰/۴۲۶۷	۰/۴۲۶۷	۶۴	۰.۲۳۴
تعداد پالس	۰/۱۶۵۸	۰/۰۸۲۹	۰/۵۵۰	۰/۶۴۵
جریان*زمان	۱/۴۰۱۷	۱/۴۰۱۷	۹/۳۲	۰/۰۹۳
جریان*فشار	۰/۲۰۱۷	۰/۲۰۱۷	۱/۳۴	۰/۳۶۶
جریان*تعداد پالس	۰/۰۳۲۵	۰/۰۱۶۲	۰/۱۱	۰/۹۰۳
زمان*فشار	۰/۶۶۶۷	۰/۶۶۶۷	۴/۴۳	۰/۱۷۰
زمان*تعداد پالس	۱/۰۵۰۸	۰/۵۲۵۴	۳/۴۹	۰/۲۲۳
فشار*تعداد پالس	۰/۱۷۵۸	۰/۰۸۷۹	۰/۵۸	۰/۶۳۱
جریان*زمان*فشار	۰/۲۸۱۷	۰/۲۸۱۷	۱/۸۷	۰.۳۰۵
جریان*زمان*تعداد پالس	۰/۸۳۰۸	۰/۴۱۵۴	۲/۷۱	۰/۲۶۶
جریان*فشار*تعداد پالس	۰/۹۱۵۸	۰/۴۵۷۹	۳/۰۴	۰/۲۴۷
زمان*فشار*تعداد پالس	۰/۱۴۰۸	۰/۰۷۰۴	۰/۴۷	۰/۶۸۱
خطا	۰/۳۰۰۸	۰/۱۵۰۴		
مجموع	۱۹/۵۹۳۳			



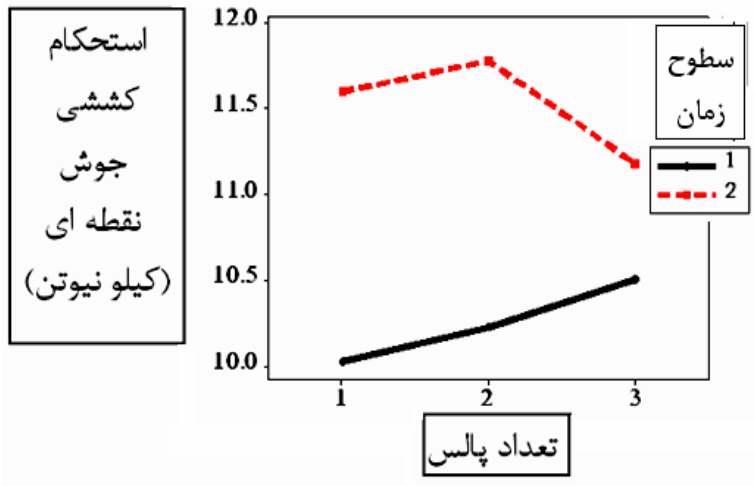
شکل ۸ تأثیر عوامل اصلی بر استحکام جوش نقطه‌ای



شکل ۹ تأثیر عوامل متقابل جریان-زمان بر استحکام جوش نقطه‌ای



شکل ۱۰ تأثیر جریان و زمان جوشکاری بر استحکام جوش نقطه‌ای



شکل ۱۱ تأثیر تعداد پالس و زمان برقراری جریان بر استحکام جوش نقطه‌ای

۵- منابع

[1] Aslanlar S, The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry. Mater. Des. 2006; 27: 125-131.

[2] Hou Z, Kimb S, Wang Y, Li C, Chena C. Finite element analysis for the mechanical features of resistance spot welding process. J. Mater. Proc. Technol. 2007; 185: 160–165.

[3] Bouyousfi B, Sahraoui T, Guessasma S, Chaoch, K. Effect of process parameters on the physical characteristics of spot weld joint. Mater. Des. 2007; 28: 414-419.

[4] Yuce C. Multi-objective optimisation for indentation rate, nugget diameter and tensile load in resistance spot welding using Taguchi-based grey relational analysis. Int. J. Mater. Product Technol. 2021; 63:321-338.

[5] Amol S, Shantisagar K. A review of the effects of resistance spot welding on metallurgical and mechanical characteristics. Welding Int. 2025; 39: 52-65.

[6] Wang X C, Lui M Y. An arbitrary waveform control system for a precise spot- welding power source. J. Mater. Proc. Technol. 2002; 122: 185–188.

[7] Eisazadeh H, Hamedi M, Halvaee A. New Parametric Study of nugget size in resistance spot welding process, using finite element method. Mater. Des. 2010; 31: 149–157.

[8] Yi L, Jinhe L, Huibin X, Chengzhi X, Lin L. Regression modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheet. Mater. Des. 2009; 30: 2547–2555.

[9] Aslanlar S, Ogur A, Ozsarac U, Ilan E. Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding. Mater. Des. 2008; 29: 1427-1431.

[10] Zhou K, Wang G, Ren B, Yu W, Ivanov M. Process optimization of aluminum/steel resistance spot welding based on dynamic resistance analysis. J. Mater. Sci. 2023; 58: 17908-17929.

[11] Martín O, Tiedra P D, López M. Artificial neural networks for pitting potential prediction of resistance spot welding joints of AISI 304 austenitic stainless steel. Corrosion Sci. 2010; 52: 2397-2402.

[12] Ren S, Huang W, Watanabe G, Zhang Z, Deng W. Numerical modeling from process to residual stress induced in resistance spot welding of DP980 steel. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2023; 125: 3563-3576.

[13] Yang H G, Zhang Y S, Lai X M, Chen G. An experimental investigation on critical specimen sizes of high strength steels DP600 in resistance spot welding. Mater. Des. 2008; 29: 1679-1686.

[14] Ghatei A, DiGiovani C, Razmoosh. M, Goodwin F, Zhou N. The role of internal oxides on the liquid metal embrittlement cracking during resistance spot welding of the dual phase steel. Metall. Mater. Trans. A. 2020; 51: 2180-2191.

[15] Wan X, Wang Y, Zhang P. Modelling the effect of welding current on resistance spot welding of DP600 steel. J. Mater. Proc. Technol. 2014; 214: 2723-2729.