



پوشش دهی اصطکاکی آلیاژ آلومینیوم AA7075-T6 بر روی AA2024-T351: مدل سازی آماری به روش رویه پاسخ

امیر مصطفی پور¹، حامد کمالی²، محمود مرادی^{3*}

1- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانش آموز خسته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه مراغه، مراغه

3- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

* صندوق پستی 65719-95863، moradi@malayeru.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 27 اردیبهشت 1396
پذیرش: 08 تیر 1396
ارائه در سایت: 18 مرداد 1396

کلید واژگان:

پوشش دهی اصطکاکی
آلیاژ آلومینیوم
خواص مکانیکی
میکروسخت
طراحی آزمایشها

چکیده

در این تحقیق رسوب دهی میله مصرفی از جنس AA7075-T6 بر روی صفحه از جنس AA2024-T351 صورت پذیرفت. برای بررسی تأثیر پارامترهای فرایند بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار، آزمایشها بر اساس طراحی آزمایش به روش رویه پاسخ (RSM) انجام شد. سرعت دورانی (1200 rpm تا 1600 rpm)، نیروی عمودی (320 kg تا 640 kg) و نرخ پیشروی (100 mm/min تا 300 mm/min) به عنوان پارامترهای ورودی و پارامترهای عرض پوشش (w)، ضخامت پوشش (t) و سختی پوشش (HC) به عنوان پاسخهای فرایند مطرح شدند. نتایج حاکی از آن است که اتصال این دو ماده بدون هیچ گونه تخلخل در فصل مشترک یا محل اتصال دو ماده انجام شد. سختی پوشش به طور میانگین نسبت به میله مصرفی حدود 30 درصد کمتر شد. با افزایش سرعت دورانی، نرخ پیشروی و نیروی عمودی ضخامت رسوب کاهش یافت. اگر نیروی عمودی بیش از حد زیاد شود باعث به وجود آمدن یک قوس به سمت صفحه در سرتاسر طول رسوب می شود. میکروساختار رسوب در مقایسه با صفحه و میله به صورت ساختاری کاملاً همگن و ریز دانه شد.

Friction surfacing of AA7075-T6 deposition on AA2024-T351; Statistical modeling using response surface methodology

Amir Mostafapour¹, Hamed Kamali², Mahmoud Moradi^{3*}

1- Faculty of Mechanical Engineering University of Tabriz, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Maragheh, Iran

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran 3-

*Corresponding author. E-mail address: moradi@malayeru.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 May 2017
Accepted 29 June 2017
Available Online 09 August 2017

Keywords:

Friction Surfacing
Aluminum alloy
Mechanical Properties
Micro hardness
Design of Experiments

ABSTRACT

In this research, deposition of AA7075-T6 coatings on AA2024-T351 substrates was studied. In order to investigate the influence of process parameters on the mechanical properties and microstructure, the experiments were performed based on design of experiments using Response Surface Methodology (RSM). Rotational speed (1200-1600 rpm), axial force (320-640 kg) and feed rate (100-300 mm/min) were considered as input parameters, while coating width (w), coating thickness (t) and hardness of coating (HC), were raised as process outputs. The results reveal that joining of these two materials was done without any porosity at the interface. Hardness of coating showed a 30% decrease compared to the consumable rod on average. Thickness of deposition is decreased by increasing rotational speed, feed rate and axial force. Excessive increase in axial force results in development of an arc toward the plate along deposition. Microstructure of deposition turned into a totally fine-grained homogeneous structure in comparison with rod and plate microstructure.

1- مقدمه

مواد پلاستیکی شده و بستر می گردد. پارامترهای فرایند شامل نیروی عمودی، سرعت دورانی، سرعت پیشروی و قطر میله مصرفی می باشد. تنها منابع حرارتی در پوشش دهی اصطکاکی، اصطکاک سطحی و تغییر شکل پلاستیک می باشد، که امکان پردازش مواد زیر نقطه ذوب را فراهم می سازد. در مرحله اول میله دوار بدون حرکت جانبی بر روی بستر فشرده می شود و از طریق اصطکاک سطحی تولید حرارت می کند و مقداری تغییر شکل اولیه نیز در میله رخ می دهد. در پایان مرحله تغییر شکل اولیه، منبع اصلی حرارت از

مفهوم اصلی پوشش دهی اصطکاکی که برای اولین بار توسط کلپستاک و نیلندز در سال 1941 میلادی اختراع شد [1]، یک فرایند حالت جامد براساس تغییر شکل پلاستیک میله مصرفی فلزی می باشد. میله مصرفی چرخان تحت بار محوری اعمال شده به بستر فشار داده می شود و حرارت اصطکاکی یک لایه ویسکوپلاستیک در نوک میله تولید می کند و شرایط دما و فشار منجر به یک فرایند نفوذ میانی و در نتیجه ایجاد یک پیوند فلزی میان

Please cite this article using:

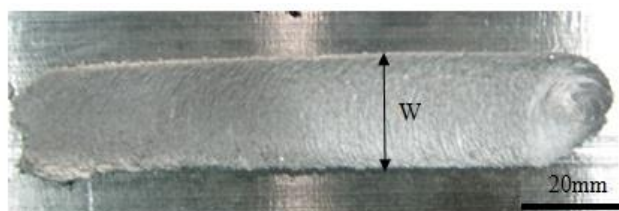
A. Mostafapour, H. Kamali, M. Moradi, Friction surfacing of AA7075-T6 deposition on AA2024-T351; Statistical modeling using response surface methodology, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 224-230, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مؤثر بر خواص مکانیکی و ساختاری نمونه سیم آلومینیومی تولید شده به روش اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی را بررسی کردند. با افزایش سرعت دورانی مقادیر سختی و تنش تسلیم نمونه‌ها کاهش چشم‌گیری پیدا کرد و افزایش نیروی اکستروژن تا یک حد مشخص نیز باعث افزایش در استحکام تسلیم ماده شد. مرتضی شمعیان و همکارانش [15] ریزساختار آلیاژ آلومینیوم 7075 که به روش GTA جوشکاری شده را با فرایند اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار دادند. مرتضی شمعیان و همکارانش [16] با انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر روی آلیاژ AL-12%Si دریافتند که ریزساختار به علت حذف تخلخل بهبود می‌یابد و همچنین اثر سرعت دوران ابزار را روی خواص مورد بررسی قرار دادند. مرتضی شمعیان و همکارانش [17] اثر فرایند اصطکاکی اغتشاشی را از طریق EBSD روی مرزدانه و ریزساختار و ریز بافت آلیاژ ریخته‌گری آلومینیوم A413 مورد بررسی قرار دادند.

در این تحقیق، تأثیر سه پارامتر سرعت دورانی و پیشروی و نیروی عمودی بر روی ابعاد و خواص مکانیکی و ریز ساختار پوشش، در پوشش دهی AA7075-T6 بر روی صفحه AA2024-T351 به روش اصطکاکی و با استفاده از طراحی آزمایش به شیوه رویه پاسخ مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای ورودی، سرعت دورانی، نیروی عمودی و پیشروی در نظر گرفته شدند و عرض پوشش (W)، ضخامت پوشش (t) و سختی پوشش (Hc) به عنوان خروجی‌های فرایند شناخته شدند. اتصال این دو ماده بدون هیچ گونه تخلخل در فصل مشترک یا محل اتصال دو ماده انجام پذیرفت. هر سه پارامتر ورودی باعث کاهش ضخامت پوشش شدند. مقدار سختی پوشش به طور میانگین نسبت به مقدار سختی میله مصرفی کاهش حدود 30 درصد داشت. شکل 1 شکل ظاهری نمونه پوشش داده شده و اندازه‌های مربوط به پوشش، نظیر (a) عرض و (b) ضخامت پوشش را نشان می‌دهد.

2- طراحی آزمایش و روش تحقیق



(a)



(b)

Fig. 1 Appearance of the coated specimen and dimensions a) width (w), b) thickness (t)

شکل 1 شکل ظاهری نمونه پوشش داده شده به همراه ابعاد (a) عرض (w) و (b) ضخامت (t)

اصطکاک سطحی به تغییر شکل پلاستیکی تغییر می‌کند. در هر دو مرحله اولیه و رسوب دهی (پوشش دهی) نیرو / فشار یا نرخ پیشروی میله می‌تواند کنترل شود.

برای بدست آوردن اتصال با کیفیتی بالا و انجام بهتر فرایند باید پارامترهای ورودی به درستی انتخاب شوند. انجام آزمایشات به روش آمون و خطا، زمان بر بوده و باعث ایجاد خطاهای بزرگ می‌شود. ضمن اینکه تعامل اثر پارامترها را بررسی نمی‌کند. اخیراً استفاده از طراحی آزمایش‌ها در کاربردهای مختلف رواج پیدا کرده است [2,3]. از مزایای رویه پاسخ که یکی از روش‌های طراحی آزمایش‌ها به حساب می‌آید می‌توان به کاهش درست تعداد آزمایشات و توجه به تغییرات همه پارامترها و تعامل اثرها و استفاده از معادلات ریاضی برای دستیابی به روابط منطقی بین پارامترهای ورودی و خروجی، اشاره نمود.

ویتانو و همکارانش [4]، برای بررسی تأثیر نرخ پیشروی و سرعت دورانی میله مصرفی بر روی پارامترهای خروجی نظیر استحکام و میانگین ضخامت و نظم و ترتیب پوشش از روش رویه پاسخ و تکنیک آماری طراحی آزمایشات استفاده کردند. سوگاندی و راویشانکار [5]، پارامترهای فرایند پوشش دهی اصطکاکی را برای پوشش دهی آلیاژ آلومینیوم 1100 بر روی صفحه‌ای از جنس فولاد کم کربن با استفاده از روش رویه پاسخ بهینه سازی کردند. ساکیهما و همکارانش [6] رسوب آلیاژ آلومینیوم¹ را روی صفحه‌هایی از همین جنس بررسی کردند. ماکزیم دما در عملیات پوشش دهی را 527 درجه سانتی‌گراد گزارش کردند. ساختار رسوب از ساختار صفحه و میله مصرفی ریزتر بود. پوشش دهی AA5052 با میله مصرفی AA2017 توسط توکیسو و همکارانش انجام گرفت [7]. آنها مشاهده کردند که اتصال با پدیده نفوذ انجام گرفته است و هیچگونه اثری از اختلاط مواد وجود ندارد. نمونه‌های پوشش داده شده دارای مقاومت کششی تا 267 مگاپاسکال بودند که نشان از کاهش نسبت به میله مصرفی با استحکام کششی 414 مگاپاسکال و افزایش نسبت به بستر AA5052 با استحکام 256 مگاپاسکال بود. گاندرا و همکارانش [8] تحقیقات بیشتری در مورد پوشش دهی AA6082 بر روی AA2024 انجام دادند. آنها دریافتند که اندازه متوسط دانه‌ها 4.2 ± 1.8 میکرومتر می‌باشد که 33 درصد کاهش اندازه دانه را نسبت به حالت اولیه در میله مصرفی، نشان می‌دهد. رافی و همکارانش [9] در فرایند پوشش دهی اصطکاکی میله فولادی² بر روی صفحه فولاد نرم، چگونگی ایجاد تحول مارتنزیتی که منجر به ایجاد میکرو ساختارهای ریز مارتنزیتی می‌گردد را مورد بررسی قرار دادند. ناکاما [10]، فرایند پوشش دهی میله‌های ریخته‌گری شده AZ91، به عنوان میله مصرفی، را بر روی صفحات منبزم AZ31 مورد بررسی قرار داد. گاندرا و همکارانش [11] در پوشش دهی فولاد نرم به وسیله فولاد نرم اثر نیروی محوری بر بهبود پهنای اتصال را مورد بررسی قرار دادند. رافی و همکارانش [12] با انجام فرایند پوشش دهی اصطکاکی فولاد H13 بر روی فولاد نرم دریافتند که سرعت‌های دورانی بالا با توجه به اثر بهتر نیروی فورج، پوشش‌هایی صاف‌تر و منظم‌تری تولید می‌نماید. رافی و همکارانش [13] با انجام فرایند پوشش دهی اصطکاکی فولاد ضدزنگ آستنیتی³ بر روی فولاد نرم تأثیر سرعت حرکت میله مصرفی را بر روی ضخامت و پوشش بررسی کردند. سرعت‌های حرکتی بالا منجر به کاهش هر دو مقدار ضخامت و پهنای پوشش می‌گردد. کامین طهماسبی و همکارانش [14] پارامترهای

¹ AA5052-PH34

² AISI H13

³ AISI310

جدول 1 متغیرهای ورودی فرایند و سطوح طرح مورد استفاده

Table 1 Process input variables and levels of the used design

متغیر	علامت	واحد	-1	0	1
نیرو	F	kg	320	480	640
دوران	N	rpm	1200	1800	2000
پیشروی	F	mm/min	100	200	300

3- تحقیقات آزمایشگاهی

در این تحقیق، صفحه آلومینیومی 2024-T351 به عنوان بستر (قطعه) با ابعاد 50×150 میلی متر و به ضخامت 5 میلی متر، و میلگرد آلومینیومی 7075-T6 به قطر 20 میلی متر و به طول 100 میلی متر به عنوان میله مصرفی (ابزار) تهیه گردید.

انتخاب پوشش AA7075-T6 از بین پوشش های نیکل الکترولس، آنودایز سخت، کانورژن کروماته، فسفاتنه، طلا و نقره از لحاظ میزان چسبندگی، هزینه، سهولت کار، رسانایی، مقاومت به خوردگی و مقاومت به سایش برای پوشش دهی AA2024-T351 بهترین گزینه می باشد.

ترکیب شیمیایی مواد توسط روش اسپکتروسکوپی نشری نوری تعیین گردید (جدول 3). از آنجایی که آلومینیوم به سرعت دچار اکسید سطحی می شود سطح روی صفحات قبل از انجام فرایند فرزکاری شد تا اکسیدهای سطحی تا حدود زیادی از بین بروند و سپس سطوح توسط محلول استون از چربی ها پاک شد. همینطور عملیات تراشکاری بر روی قطر بیرونی و پیشانی میله مصرفی انجام شد و توسط محلول استون شستشو داده شد. صفحه بر روی میز دستگاه فرز بسته شد و میله مصرفی درون کلگی فرز قرار گرفت (شکل 2)، سپس فرایند پوشش دهی اصطکاکی طبق جداول 1 و 2 توسط دستگاه فرز انجام پذیرفت. برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه و ابزار نیز در جدول 4 آورده شده است. چنانچه دیده می شود میله مصرفی سخت تر از صفحه می باشد.

روش طراحی آزمایش رویه پاسخ، شامل یک سری از تکنیک های ریاضی و آمار است و برای تحلیل مسائلی مناسب می باشد که پاسخ آنها تحت تاثیر چندین متغیر قرار گیرد و هدف اصلی آن بهینه سازی این پاسخ می باشد [18]. در اکثر مسائل مربوط به روش رویه پاسخ، رابطه بین پاسخ و متغیرهای مستقل مجهول است. بنابراین برای به کار گیری رویه پاسخ ابتدا باید تقریب مناسبی از ارتباط واقعی موجود بین پاسخ و مجموعه متغیرهای مستقل در نظر گرفت. معمولاً از چند جمله ای های مرتبه پایین در محدوده ای از مقادیر متغیرهای مستقل استفاده می شود. اگر پاسخ توسط یک تابع خطی از متغیرهای مستقل به خوبی مدل شده باشد، آنگاه تابع تقریب کننده برای مدل مرتبه اول بصورت رابطه (1) است [19]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

اگر در سیستم، انحنای وجود داشته باشد، آنگاه باید از چندجمله ای های مرتبه بالاتر، مانند مدل مرتبه دوم استفاده کرد [20].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=0}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{ij} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

تقریباً در تمام مسائل رویه پاسخ از یک یا هردوی این چند جمله ای های تقریب کننده استفاده می شود. مدل های چند جمله ای برای محدوده نسبتاً کوچکی از فضای متغیرهای مستقل معمولاً مناسب می باشد ولی در کل فضای متغیرهای مستقل، تقریبی مناسب و معقولی از ارتباط واقعی بین متغیرها نمی باشد. در تحقیق حاضر از روش های طراحی آزمایش به شیوه رویه پاسخ جهت انجام پوشش دهی اصطکاکی نمونه ها استفاده گردید. سه پارامتر سرعت دورانی (1200 rpm تا 1600 rpm)، نیروی عمودی (320 kg تا 640 kg) و پیشروی (100 mm/min تا 300 mm/min) هر کدام در سه سطح به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شدند (جدول 1). جهت انجام آزمایشات از طرح مرکب مرکزی رویه پاسخ ارائه شده در جدول 2 استفاده گردید.

جدول 2 طرح ماتریسی آزمایش ها و نتایج اندازه گیری شده

Table 2 Matrix design and measured results

شماره تست	نیروی عمودی	دوران	پیشروی	عرض پوشش، W (mm)	ضخامت پوشش، t (mm)	سختی پوشش (HV)
1	-1	-1	1	14	1.8	109.3
2	-1	-1	-1	22	3	99
3	1	0	0	25	0.7	104.1
4	-1	1	-1	21	0.9	103.7
5	1	1	1	21	0.5	109
6	1	-1	-1	24	1.5	109.7
7	0	0	0	21	0.95	112.7
8	0	-1	0	23	1.6	116
9	-1	1	1	20.5	0.9	112
10	0	0	0	21	0.7	103
11	-1	0	0	21.5	1.3	109.3
12	0	0	1	22	0.86	107
13	0	1	0	25	0.6	102.3
14	0	0	-1	21.5	1.4	93.8
15	1	-1	1	24	1.1	102
16	0	0	0	21	0.75	104
17	1	1	-1	20	1	112.3

جدول 3 ترکیب شیمیایی مواد (درصد وزنی)

Table 3 Chemical compositions of materials (wt %).

Al	Zn	Ti	Si	Fe	Mn	Mg	Cu	مواد
باقی مانده	0.25	0.15	0.5	0.5	0.6	2.1	3.4	صفحه AA2024-T351
باقی مانده	5.6	0.15	0.04	0.1	0.08	2.4	1.7	میله AA7075-T6

عرض پوشش، ضخامت پوشش و سختی پوشش به عنوان پارامترهای خروجی فرایند پوشش دهی اصطکاکی بودند که مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج اندازه گیری شده به عنوان پاسخ های طرح طراحی آزمایش ها در جدول 2 ارائه شده اند. در تحلیل های انجام شده، تأثیر تغییر پارامترها، تعامل اثر آنها و چگونگی تغییر هر کدام از پاسخ ها در آزمایشات، به همراه استدلال های فیزیکی مربوطه، بررسی می گردد. از جداول آنالیز واریانس جهت تفسیر نتایج و بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر استفاده شد.

4-1- عرض پوشش (w)

در این تحلیل از چند جمله ای مرتبه دو کامل استفاده گردیده است. جدول 5 آنالیز واریانس اصلاح شده برای عرض پوشش را نشان می دهد. با احتساب $\alpha = 0.05$ ، طبق جدول 5 فقط تعامل اثر $n \times f$ مؤثر می باشد ولی به خاطر مؤثر بودن این پارامتر هر دو پارامتر اصلی نیز باید در معادله رگرسیون آورده شوند.

رابطه (3) معادله رگرسیون عرض پوشش را بر حسب مقادیر واقعی نشان می دهد.

$$W = 21.146 + 0.756n - 1.365f + 1.815n \times f \quad (3)$$

شکل 3 روند تغییرات عرض پوشش را بر اساس دو پارامتر سرعت دورانی و پیشروی میله مصرفی نشان می دهد. با افزایش دوران عرض پوشش افزایش پیدا کرد. علت این امر این است که با افزایش دوران میزان اصطکاک و حرارت ورودی افزایش می یابد و به دنبال آن حجم مواد پلاستیکی شده افزایش پیدا می کند بنابراین مواد با عرض بیشتری بر روی صفحه رسوب می کند. با افزایش پیشروی حرارت در واحد میلی متر کاهش می یابد و به دنبال آن حجم مواد پلاستیکی در واحد میلی متر کاهش می یابد، بنابراین با افزایش مقدار پیشروی پهنای پوشش کم می شود.

شکل 4 توزیع باقی مانده ها را برای عرض پوشش نشان می دهد. مشاهده می گردد که باقی مانده ها در اطراف خط قطری پراکنده شده اند و توزیعی نرمال دارند.

این شکل گویای این مطلب است که فرضیات اولیه استفاده شده در آنالیز واریانس صحیح می باشد. لذا معادله ریاضی حاصل، مدل مناسبی برای پیش بینی و بررسی اثر F و T و استفاده از آزمون پارامترها می باشد.

4-2- ضخامت پوشش (t)

جدول 6 آنالیز واریانس بدست آمده برای ضخامت پوشش را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، با احتساب $\alpha = 0.05$ ، همه پارامترهای اصلی به ترتیب نیرو، دوران و پیشروی مؤثر شناخته شدند و پارامتر مرتبه دو نیرو و

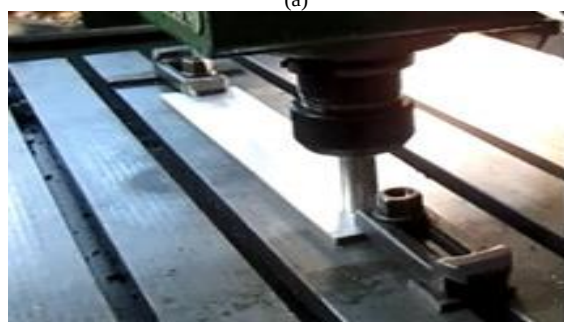
جدول 5 ANOVA اصلاح شده برای عرض پوشش

Table 5 Modified ANOVA for coating width

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجات آزادی	منبع تغییر
0.113	2.43	11.969	35.908	3	رگرسیون
0.242	1.59	7.851	15.701	2	خطی
0.321	1.06	5.267	5.267	1	N
0.105	3.03	15.018	15.018	1	F
0.033	5.68	28.113	28.113	1	$n \times f$
		4.125	16.50	4	خطای باقی مانده
0.432	1.29	5.317	47.857	9	Lack-of-Fit
			100.56	16	مجموع
					$R^2 = \%81$
					$R^2 (adj) = \%21$



(a)



(b)

Fig. 2a) clamping the substrate on the table b) tool fixing inside the vertical head

شکل 2 a) نحوه بستن صفحه بر روی میز b) قرار گرفتن ابزار درون کنگی عمودی

جدول 4 خواص مکانیکی مواد

Table 4 Mechanical properties of materials

مواد	افزایش طول (%)	استحکام نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	سختی (HV)
صفحه AA2024-T351	19%	480	330	120
میله AA7075-T6	11%	570	500	150

پس از انجام فرایند عملیات پولیشکاری توسط دستگاه¹ انجام شد. سپس اچ کردن در محلول گراف-ساز² و کلر³ هر کدام به مدت 5 تا 10 ثانیه صورت گرفت. در نهایت نمونه ها توسط میکروسکوپ نوری انعکاسی⁴ مورد بررسی قرار گرفتند و تصاویر نمونه ها در بزرگ نمایی های مختلف تهیه گردید. به منظور اندازه گیری ریزسختی نواحی مختلف رسوب از دستگاه میکرو سختی سنجی⁵ (میکرو ویکرز³) استفاده گردید. طبق استاندارد IS 6507-1 بار اعمالی در این آزمایش 100 گرم به مدت 15 ثانیه اعمال گردید.

4- بحث در نتایج

¹ TEGRA FORCE-5

² 84mlH₂O, 0.5mlHF(48%), 3grCrO₃, 15.5mlHNO₃

³ 2mlHF, 5mlHNO₃, 3mlHCl, 190mlH₂O

⁴ ICM405

⁵ BUEHLER

بنابراین ضخامت کاهش می یابد.

با افزایش دوران حرارت ورودی افزایش می یابد و مواد پلاستیکی شده سیلان بیشتری پیدا کرده و بیشتر روی سطح پخش می شود، بنابراین ضخامت پوشش کاهش می یابد. با افزایش نیروی عمودی چون اصطکاک و حرارت زیاد می شود مواد از زیر ابزار به اطراف می رود و بالطبع عرض پوشش زیاد می شود و ضخامت کاهش می یابد. شکل های 6 و 7 به ترتیب رویه پاسخ و منحنی تراز ضخامت پوشش را بر اساس دوران و نیروی عمودی نشان می دهد. در هر دو شکل پیشروی در مقدار صفر ثابت نگه داشته شده است. چنانچه دیده می شود با افزایش دوران و نیروی عمودی مقدار ضخامت رسوب کاهش می یابد. در واقع با افزایش نیرو گرمای ورودی افزایش می یابد و مواد رقیق می شود و با توجه به افزایش دوران و پیرو آن کاهش گشتاور پیچشی، نرخ اغتشاش مواد پلاستیکی کاهش می یابد بنابراین ضخامت کاهش می یابد.

3-4- سختی پوشش (HC)

جدول 7 آنالیز واریانس مدل بدست آمده برای سختی پوشش را نشان می دهد. جملات رگرسیون و مرتبه دو و تعامل اثر، مؤثر و غیر مؤثر می باشند. به دلیل مؤثر بودن جملات تعامل اثر، پارامترهای اصلی نیز در معادله رگرسیون وارد خواهند شد. معادله رگرسیون بر اساس مقادیر واقعی به صورت رابطه (5) بیان می گردد.

$$Hc = 90.150 - 21.0F + 95.2n - 90.0f + 05.13n \times n - 76.13f \times f - 44.4F \times f \quad (5)$$

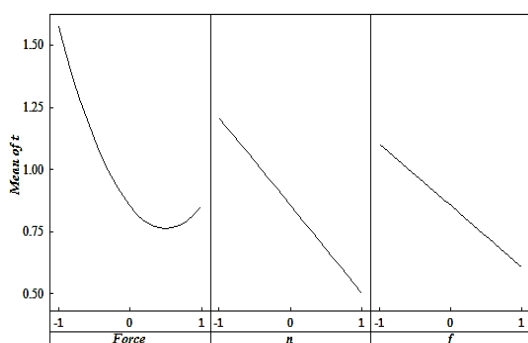


Fig. 5 Main effect plot for coating thickness diagram in terms of rotational speed and feed rate and axial force

شکل 5 نمودار تاثیر پارامترهای اصلی بر ضخامت پوشش براساس دوران و پیشروی و نیروی عمودی

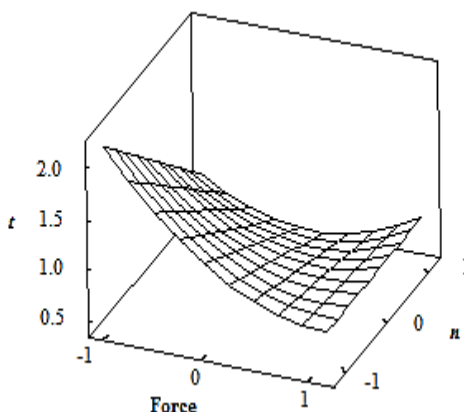


Fig. 6 Response surface of coating thickness in terms of rotational speed and force

شکل 6 رویه پاسخ ضخامت پوشش بر اساس مقدار دوران و نیرو

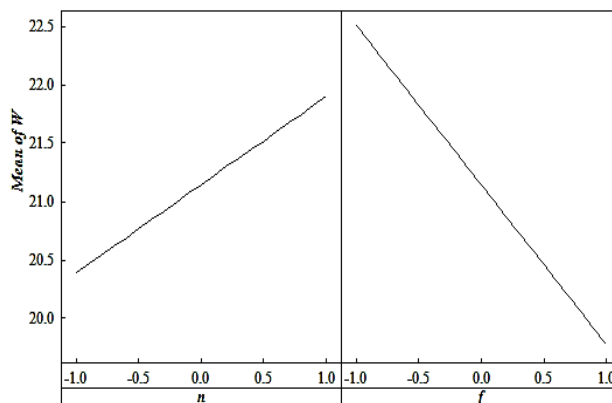


Fig. 3 Coating width diagram in terms of rotational speed and feed rate

شکل 3 نمودار عرض پوشش براساس دوران و پیشروی

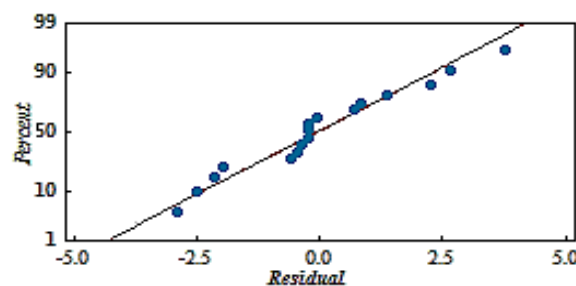


Fig. 4 Distribution of coating width residuals

شکل 4 توزیع باقی مانده های عرض پوشش

جدول 6 ANOVA اصلاح شده برای ضخامت پوشش

منبع تغییر	درجات آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
رگرسیون	6	4.9615	0.82692	9.63	0.001
خطی	3	4.1507	1.38356	16.10	0.000
F	1	1.0713	1.07134	12.46	0.005
N	1	0.9760	0.97603	11.36	0.007
F	1	0.42558	0.42558	4.95	0.05
F×F	1	0.48331	0.48331	5.68	0.038
تعامل اثر	2	1.1347	0.56737	6.60	0.015
F×n	1	0.8154	0.54821	9.49	0.012
n×f	1	0.5399	0.53987	6.28	0.031
خطای باقی مانده	1	0.2450	0.06125		
Lack-of-Fit	6	0.6141	0.10235	1.67	0.322
مجموع	16	5.8206			
R2 =%85.24		R2 (adj) =%76.38			

تعامل اثرهای F×n و n×f نیز در این تحلیل مؤثر شناخته شدند. در بهترین حالت تحلیل باید مدل رگرسیون مؤثر و غیر مؤثر¹ باشند، که این مطلب در این مورد صادق است.

رابطه (4) معادله رگرسیون ضخامت پوشش را بر حسب مقادیر واقعی نشان می دهد.

$$t = 0.854 - 0.364F - 0.355n - 0.248f + 0.362F \times F + 0.362F \times n + 0.265n \times F \quad (4)$$

شکل 5 نمودار ضخامت پوشش را بر اساس پیشروی و سرعت دورانی و نیروی عمودی نشان می دهد. با افزایش پیشروی میزان حرارت وارد شده در واحد میلی متر کاهش می یابد و مواد کمتری در واحد سطح رسوب می کند

¹ Lack-Of-Fit

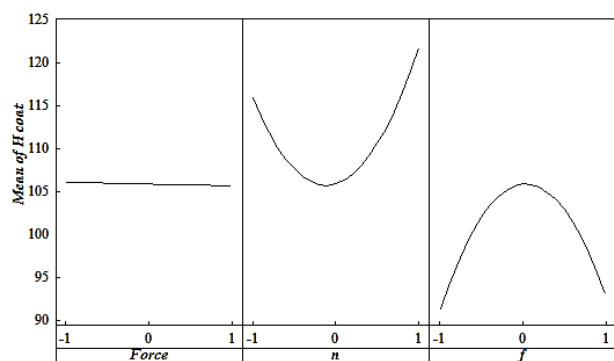


Fig. 8 Main effect plot for hardness of coating in terms of feed rate and force and rotational speed

شکل 8 نمودار تاثیر پارامترهای اصلی بر سختی پوشش بر اساس مقدار پیشروی و نیرو و دوران

4-4- ریز ساختار

از آنجا که اصطکاک سطحی و تغییر شکل پلاستیک به عنوان منابع حرارتی در فرایند پوشش‌دهی اصطکاکی هستند می‌توان از عامل نیرو جهت تامین منبع حرارتی اصطکاک سطحی و از عوامل دوران و پیشروی میله مصرفی جهت تامین منبع حرارتی اغتشاش و تغییر شکل پلاستیک نام برد. از طرفی در طول رسوب دهی، خنک سازی با کنوکسیون (همرفت)، تابش به محیط اطراف و هدایت به بستر، انجام می‌گیرد. این فرآیند خنک سازی می‌تواند در عرض چند ثانیه اتفاق افتاده و تبلور مجدد رخ دهد در نتیجه پوششی با دانه‌های ریز و همگن تولید نماید و اگر زمان خنک شدن طولانی شود باعث درشت دانه شدن می‌شود. پس از انجام فرایند نمونه‌ها در ابعاد 10×10 میلی‌متر مربع بریده شدند و پس از آماده سازی در نهایت نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری انعکاسی مورد بررسی قرار گرفتند و تصاویر نمونه‌ها در بزرگنمایی‌های مختلف تهیه گردید و همچنین اندازه دانه پوشش و میلگرد مورد مقایسه قرار گرفت. همان‌طور که در شکل 9 ملاحظه می‌شود پس از مقایسه ریزساختاری بین پوشش و صفحه و میله مصرفی مشاهده می‌شود که میکروساختار رسوب در مقایسه با صفحه و میله به صورت ساختاری کاملاً همگن و ریز دانه شده است. با اندازه گیری دانه برای نمونه نشان داده شده در شکل که حدوداً $3.3 \mu m$ گزارش شده و مقایسه با اندازه $9.4 \mu m$ میله مصرفی متوجه کاهش حدوداً 65 درصد اندازه دانه پوشش می‌شویم. همچنین بعد از مقایسه با اندازه دانه 10.8 صفحه متوجه می‌شویم که ساختار پوشش به مراتب نسبت به صفحه نیز ریزدانه می‌باشد.

5- نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر سه پارامتر مهم فرآیند نظیر سرعت دورانی، پیشروی و نیروی عمودی بر روی ریز ساختار و خواص مکانیکی در پوشش‌دهی به روش اصطکاکی میله مصرفی از جنس AA7075-T6 بر روی صفحه از جنس AA2024-T351 با بکارگیری روش طراحی آزمایش مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- اتصال این دو ماده بدون هیچ گونه تخلخل در فصل مشترک یا محل اتصال دو ماده صورت پذیرفت.
- هرچند سختی پوشش کاهش پیدا می‌کند اما رسوب دارای یک ساختار ریز دانه همگن می‌باشد.
- با افزایش سرعت دوران، نرخ پیشروی و نیروی عمودی ضخامت رسوب

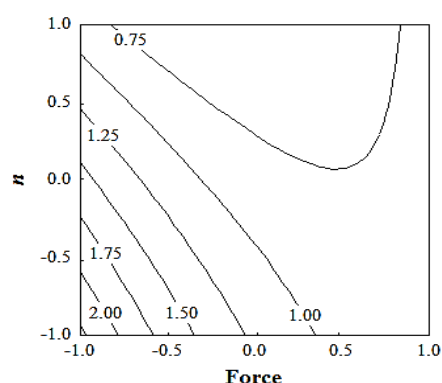


Fig.7 Contour plot of coating thickness in terms of rotational speed and force

شکل 7 منحنی تراز ضخامت پوشش بر اساس مقدار دوران و نیرو

جدول 7 ANOVA اصلاح شده برای سختی پوشش

Table 7 Modified ANOVA for hardness of coating

منبع تغییر	درجات آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
رگرسیون	6	313.599	52.266	2.63	0.085
خطی	3	113.574	35.528	1.79	0.213
F	1	0.419	0.419	0.02	0.887
N	1	61.876	61.876	3.11	0.108
f	1	6.598	6.598	0.33	0.577
مرتبه دو	2	147.295	73.647	3.70	0.063
$n \times n$	1	130.291	130.291	6.55	0.028
$f \times f$	1	145.383	145.383	7.31	0.022
$F \times f$	1	147.202	147.202	7.40	0.022
خطای باقی‌مانده	4	95.08	23.77		
Lack-of-Fit	6	103.752	17.292	0.73	0.654
مجموع	16	512.431			
$R^2 = \%61.20$		$R^2 (adj) = \%92.37$			

شکل 8 نمودار تغییرات سختی پوشش را بر حسب نیروی عمودی و دوران و پیشروی نشان می‌دهد. دو اصل مهم جهت انجام تبلور مجدد دما و جریان مواد می‌باشد. با افزایش نیرو دما افزایش می‌یابد ولی به علت خارج شدن مواد از سطح زیر ابزار جریان مواد کافی نخواهد بود، بنابراین تبلور مجدد رخ نمی‌دهد و سختی نیز کاهش می‌یابد. با افزایش دوران تا سطح صفر به علت اصطکاک بیشتر دما بالا می‌رود و حالت T6 مواد از بین می‌رود و سختی پایین می‌آید. مجدداً با افزایش دوران از سطح صفر دما باز هم بالا می‌رود که این افزایش دما تبلور مجدد را به دنبال خواهد داشت و ساختار دانه‌ریز می‌شود بنابراین سختی افزایش می‌یابد. در پیشروی‌های پایین چون دما در واحد میلی‌متر زیاد است بنابراین حالت T6 از بین خواهد رفت. از طرف دیگر تبلور مجدد رخ می‌دهد ولی به خاطر دمای خیلی بالا دانه‌ها رشد پیدا می‌کنند پس سختی به اندازه سختی آنیل پایین می‌باشد. با افزایش مقدار پیشروی چون دما در واحد میلی‌متر کمتر افزایش می‌یابد تبلور مجدد اتفاق می‌افتد و رشد دانه نیز رخ نمی‌دهد پس سختی بیشتر از حالت قبل می‌شود. مجدداً با افزایش پیشروی از سطح صفر دما در واحد میلی‌متر چون پایین است تبلور مجددی رخ نخواهد داد و سختی نیز پایین می‌باشد.

با مقایسه مقدار سختی که برای تست‌های مختلف در جدول 2 آمده است و سختی میله مصرفی که در جدول 4 آورده شده است ملاحظه می‌گردد که سختی پوشش نسبت به میله مصرفی بطور میانگین کاهشی حدود 30 درصد داشته است. علت اصلی این امر نیز می‌تواند به خاطر گرمای ایجاد شده در نوک میله مصرفی و از بین رفتن T6 آن باشد.

- [2] M. Moradi, O. Mehrabi, T. Azdast, K. Y. Benyounis, Enhancement of low power CO2 laser cutting process for injection molded polycarbonate, *Optics & Laser Technology*, Vol. 96C, No. 10, pp. 208–218, 2017.
- [3] M. Moradi, E. Golchin, Investigation on the effects of process parameters on laser percussion drilling using finite element methodology statistical modelling and optimization, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 14, No. 03, pp. 464 – 484, 2017.
- [4] V. Vitanov, N. Javaid, D. J. Stephenson, Application of response surface methodology for the optimisation of micro friction surfacing process, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 204, No. 21, pp. 3501–3508, 2010.
- [5] V. Sugandhi, V. Ravishankar, Optimization of friction surfacing process parameters for aa1100 aluminum alloy coating with mild steel substrate using response surface methodology (RSM) technique, *Modern Applied Science*, Vol. 6, No. 2, pp. 60-69, 2012.
- [6] H. Sakihama, H. Tokisue, K. Katoh, Mechanical properties of friction surfaced 5052 aluminum alloy, *Materials Transactions*, Vol. 44, No. 12, pp. 2688-2694, 2003.
- [7] H. Tokisue, K. Katoh, T. Asahina, T. Usiyama, Mechanical properties of 5052/2017 dissimilar aluminum alloys deposit by friction surfacing, *Materials Transactions*, Vol. 47, No.3, pp. 874-882, 2006.
- [8] J. Gandra, D. Pereira, R. M. Miranda, R. J. C. Silva, P. Vilaça, Deposition of AA6082-T6 over AA2024-T3 by friction surfacing Mechanical and wear characterization, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 10, No. 4, pp. 223, 32-40, 2013.
- [9] H. K. Rafi, G. j. Ram, G. Phanikumar, K. Rao, Microstructural evolution during friction surfacing of tool steel H13, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 1, pp. 82-87, 2011.
- [10] D. Nakama, K. Katoh, H. Tokisue, Some characteristics of AZ31/AZ91 dissimilar magnesium alloy deposit by friction surfacing, *Materials Transactions*, Vol. 49, No. 5, pp. 1137-1141, 2008.
- [11] J. Gandra, R. Miranda, P. Vilaça, Performance analysis of friction surfacing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 8, pp. 1676-1686, 2012.
- [12] H. K. Rafi, G. J. Ram, G. Phanikumar, K. Rao, Friction surfaced tool steel (H13) coatings on low carbon steel: A study on the effects of process parameters on coating characteristics and integrity, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 205, No. 1, pp. 232-242, 2010.
- [13] H. K. Rafi, G. j. Ram, G. Phanikumar, K. Rao, Friction surfacing of austenitic stainless steel on low carbon steel: Studies on the effects of traverse speed, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 420- 427, 2010.
- [14] K. Tahmasebi, M. Mahmoudi, Investigation of the effective parameters on the mechanical and structural properties of aluminum wire sample fabricated by friction stir extrusion, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 78-84, 2017.
- [15] M. Shamanian, H. Mostaan, M. Safari, J. A. Szpunar, Friction stir modification of GTA 7075-T6 Al alloy weld joints: EBSD study and microstructural evolutions, *Journal of Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 574-585, 2017.
- [16] M. Shamanian, H. Mostaan, M. Safari, M. Sefidkar Dezfooli, Friction-stir processing of Al-12%Si alloys: grain refinement, numerical simulation, microstructure evolution, dry sliding wear performance and hardness measurement, *Journal of Metallurgical Research & Technology*, Vol. 114, No. 2, pp. 1-11, 2017.
- [17] M. Shamanian, H. Mostaan, M. Safari, J. A. Szpunar, EBSD study on grain boundary and microtexture evolutions during friction stir processing of A413 cast aluminum alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 25, No. 7, pp. 2824-2835, 2016.
- [18] R. H. Meyers, D. C. Montgomery, *Response surface methodology, Process and Product Optimisation Using Design Experiments*, Second Edition, pp. 170-173, Wiley, New York, NY, 2002.
- [19] M. Moradi, H. Abdollahi, Statistical modelling and optimization of the laser percussion microdrilling of thin sheet stainless steel, *Journal of lasers in Engineering*, Article in press, 2017.
- [20] M. Shamsborhan, M. Moradi, A. Shokuhfar, Numerical optimization of Planar twist channel angular extrusion as a novel severe plastic deformation method by DOE method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 135-144, 2017. (in Persian فارسی)

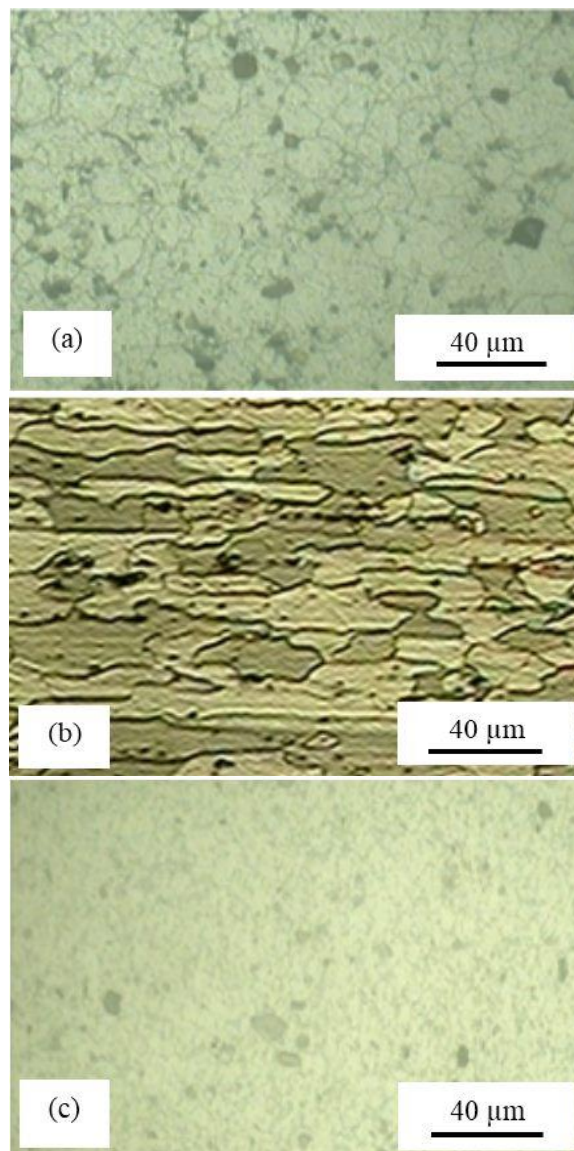


Fig. 9 Grading Structure (a) The consumable rod (b) substrate (c) deposit

شکل 9 ساختار دانه‌بندی (a) میله مصرفی، (b) صفحه، (c) رسوب

کاهش می‌یابد. اگر نیروی عمودی بیش از حد زیاد شود باعث به وجود آمدن یک قوس به سمت صفحه در سرتاسر طول رسوب می‌شود.
 - با مقایسه میکروساختار پوشش با میله مصرفی و صفحه به علت تغییر شکل پلاستیکی و سپس به سرعت خنک شدن، در ساختار تبلور مجدد رخ داده و ساختار رسوب کاملاً همگن و ریز دانه می‌گردد.
 - با استفاده از روش پوشش‌دهی اصطکاکی می‌توان نمونه‌های آلومینیومی با پوشش مناسب از ضخامت 0.2 میلی متر تا چند میلی متر بدست آورد.

6- مراجع

- [1] H. Klopstock, A. Neelands, *An Improved Method of Joining or Welding Metals*, Fourth Edition, pp. 212-213, British Patent specification, 1941.