



# روش کاری فولاد ساده کربنی با لایه زنگ‌زن آلومینیومی به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

علی زهره‌وند<sup>1</sup>، محمدرضا فراهانی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 1439957131، mrfarahani@ut.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 بهمن 1395

پذیرش: 14 اسفند 1395

ارائه در سایت: 09 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

آلیاژ آلومینیوم

خواص مکانیکی

پوشش‌دهی

## چکیده

ایجاد پوشش بر روی قطعات فلزی در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی و نفت‌گاز از کاربرد بالایی برخوردار است. ایجاد یک لایه پوشش بر روی قطعات فلزی می‌تواند امکان تأمین نمودن رنج وسیع‌تری از خواص مکانیکی، حرارتی و خوردگی را برای آن قطعه فراهم نماید. فولادهای ساده کربنی امروزه بیش‌ترین سهم از مواد فلزی در صنایع مختلف را به خود اختصاص می‌دهند، ایجاد یک لایه مقاوم به خوردگی بر روی این فولادها می‌تواند کاربرد این قطعات در شرایط مختلف محیطی را با قیمت پایین فراهم نماید. در این پژوهش برای اولین بار پوشش‌دهی سطح فولاد کربنی St37 با آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 به روش اصطکاکی اغتشاشی با موفقیت انجام گرفت. به‌منظور کنترل فرایند پوشش‌دهی، در ادامه اثر سرعت‌های دورانی و پیشروی بر خواص مکانیکی و ساختار پوشش ایجاد شده مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج تست کشش‌برش نشان می‌دهد که با افزایش سرعت پیشروی به‌دلیل فورج بیشتر مواد و ورود همگن مواد به درون اتصال، استحکام برشی لایه پوشش داده شده افزایش پیدا می‌کند. با کاهش سرعت دورانی و افزایش سرعت پیشروی گرمای ورودی کمتر می‌شود و باعث کاهش حرارت ایجاد شده در اثر اصطکاک و جلوگیری از اغتشاش بیش از حد محل اتصال می‌شود، در نتیجه استحکام برشی اتصال افزایش پیدا می‌کند.

## Cladding of Carbon Steel with Aluminum Stainless Layer Using Friction Stir Welding Method

Ali Zohrehvand, Mohammadreza Farahani\*

1- School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1439957131 Tehran, Iran, mrfarahani@ut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 22 January 2017  
Accepted 04 March 2017  
Available Online 29 April 2017

**Keywords:**  
Friction Stir Welding  
Aluminum Alloys  
Mechanical Properties  
Cladding

### ABSTRACT

Cladding on metallic products is relatively applicable in industries, e.g. aerospace, automotive and oil. One layer cladding on metallic specimens could improve mechanical, thermal and corrosion resistance properties considerably. Nowadays carbon steels have the highest share of metallic materials among different industries. One layer cladding on this type of steel with the aim of enhancing the corrosion resistance could decrease the price of them when they are put into use in different conditions. In this study, for the first time, cladding of the carbon steel by 6061-T6 Al alloy via Friction Stir was carried out successfully. In order to control cladding, the effect of different rotational speeds and traverse speeds on mechanical properties and structure of cladded layer was inspected. Results of shear test showed that by increasing the traverse speed the shear strength of the cladded layer increases due to the addition of material into the joint area uniformly. By decreasing the rotational speed and increasing the traverse speed, the generated heat from friction decreases and prevents over-stirring in joint area and as a result the shear strength of the joint will increase.

### 1- مقدمه

به‌صورت گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد [3,2]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به‌دلیل نیاز به انرژی کمتر نسبت به روش سنتی جوشکاری ذوبی [5,4] و عدم استفاده موادی از قبیل الکتروود و گاز محافظ [6] امروزه به صورت موفقیت‌آمیز در صنعت هوابیما، اتومبیل، کشتی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای ابزار نیز می‌تواند تأثیر زیادی بر جریان ماده و تولید حرارت داشته باشد. بخش عمده‌ای از تولید حرارت در این روش مربوط به اصطکاک میان شانه و قطعه‌کار است. بر طبق تحقیقات انجام شده سهم پین در کل حرارت تولید شده کم و در حدود 20% می‌باشد [7]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اتصال مواد نامشابه از قبیل آلیاژهای

فرایند اصطکاک اغتشاشی یک تکنیک برای ساخت سطوح کامپوزیتی و اصلاح ویژگی‌های ریزساختاری است. برای اولین بار میشر و همکارانش [1] در سال 1991 این فرایند را ابداع کردند که از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برگرفته شده است. در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ابزار چرخنده‌ای که شامل شانه و پین می‌باشد در سطح مشترک دو فلز پایه با یک زاویه انحراف قرار می‌گیرد و تا درگیر شدن سطح شانه با سطح فلز، در ماده پایه نفوذ می‌کند. سپس همراه با دو حرکت چرخشی و پیشروی در راستای خط اتصال پیش می‌رود [2]. در میان آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژ 6061-T6

Please cite this article using:

A. Zohrehvand, M. Farahani, Cladding of Carbon Steel with Aluminum Stainless Layer Using Friction Stir Welding Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 410-418, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

اغتشاشی می‌تواند به عنوان ایده و روش جدید در توسعه تولید ورق‌های چند لایه با هزینه پایین و کارایی بالا مورد استفاده قرار گیرد.

## 2- نمونه‌سازی و انجام آزمایش‌های تجربی

در این پژوهش از آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 که دارای مقاومت به خوردگی عالی در محیط اتمسفری و مقاومت به خوردگی خوبی در نواحی صنعتی و دریایی دارد [3]، به‌عنوان پوشش برای سطح فولاد St37 استفاده شده است. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 به‌ترتیب در جدول شماره 1 و 2 آورده شده است. فولاد St37 مهم‌ترین، پرکاربردترین و نیز پرتیراژترین فولاد ساخته شده در صنایع می‌باشد، دارای کاربرد بسیار گسترده‌ای در صنایع راه‌آهن، پل سازی و کشتی‌سازی است. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد St37 به‌ترتیب در جدول 3 و 4 آورده شده است. ابعاد فلز پایه فولاد St37 استفاده شده در این تحقیق  $150 \times 100 \times 10$  میلی‌متر است. ورق آلومینیومی 6061-T6 به ضخامت 2 میلی‌متر جهت پوشش‌دهی بر روی فولاد استفاده شد. تمامی نمونه‌ها با وایرکات برش داده شده و هیچ‌گونه عملیات حرارتی بر روی ورق‌ها انجام نگرفته است.

در این تحقیق ورق آلومینیوم 6061-T6 با ضخامت 2 میلی‌متر در قسمت بالا و ورق فولادی St37 با ضخامت 10 میلی‌متر در پایین قرار گرفت که منجر به پوشش‌دهی ورق فولادی با آلومینیوم به کمک روش نوین پوشش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی شد. همان‌گونه که در "شکل 1 (الف)" نشان داده شده است ابزار غیر مصرفی دارای سه حرکت دورانی، پیشروی و عمودی برای نفوذ در سطح کار می‌باشد؛ با حرکت دورانی و نیروی عمودی ابزار در سطح کار نفوذ کرده و بعد از مکث اولیه جهت ایجاد حالت خمیری در ماده در راستای مستقیم حرکت می‌کند. در "شکل 1 (ب)" قسمت پیشرو در پاس بعدی فرایند باقی‌مانده و قسمت پسرو در پاس قبلی بوده و در پاس جدید فرایند قرار نمی‌گیرد. در این تحقیق از یک ابزار غیرمصرفی از جنس کارباید تنگستن استفاده شده است که نسبت به محور عمودی با زاویه 3 درجه موقعیت دهی شد. هندسه بین ابزار استفاده شده و پیشنهاد شده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای آلومینیوم به فولاد [10]، آلومینیوم به

### جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6

	Al	Mg	Mn	Zn	Fe	Cu	Si	Cr	Ti
پایه		0.84	0.15	0.25	0.7	0.24	0.54	0.18	0.15

### جدول 2 خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6

سختی (HV)	تغییر طول (%)	استحکام کششی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)
85	9	290	240

### جدول 3 ترکیب شیمیایی فولاد St37

	Fe	C	S	P	Mn
پایه		0.17	0.05	0.45	1.14

### جدول 4 خواص مکانیکی فولاد St37

سختی (HV)	تغییر طول (%)	استحکام کششی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)
130	17	350	235

آلومینیوم به فولاد [8] آلیاژهای آلومینیوم به منیزیم [9] و ... استفاده می‌شود. زونگ و همکارانش جوشکاری لب رو لب آلیاژ آلومینیوم به فولاد زنگ‌زن را با فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد مطالعه قرار دادند. به هم پیوستن‌های<sup>1</sup> مکانیکی در اثر فلش لایه پایینی فولاد در اتصال به لایه بالایی آلومینیوم در هر دو طرف ناحیه مرکزی جوش است [10]. افزایش عمق نفوذ پین در لایه سخت فولاد سبب افزایش استحکام اتصال می‌شود، اما با افزایش عمق نفوذ پین در فولاد پین در مدت زمان کوتاهی خورده می‌شود [11]. فولاد پوشش داده شده به کمک آلومینیوم باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود، به ویژه ترکیبی از خواص عالی از قبیل مقاومت به خوردگی بالا، نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به سایش و ... ایجاد می‌کند؛ بنابراین تلاش زیادی برای تولید صفحات فلزی چند لایه با تکنیک‌ها و روش‌های گوناگون از قبیل جوشکاری انفجاری [12، 13] پیوند نفوذی [14] اکسترودژن [15] و نورد سرد همراه با بازپخت [16، 17] انجام شده است. در سال 2015 بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد پوشش داده شده با مس با استفاده از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری با گاز محافظ انجام گرفت. دریافتند که اندازه دانه در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در مقایسه با جوشکاری با گاز محافظ ریزتر و یکنواخت‌تر است، و در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی هیچ‌گونه شواهدی از ترک در لایه پوشش داده شده مشاهده نمی‌شود درحالی‌که در لایه پوشش‌داده شده با جوشکاری با گاز محافظ ترک‌های زیادی در سطح ایجاد شده است [18]. در سال 2016 لایتو و همکارانش جوشکاری لب رو لب آلیاژ آلومینیوم به فولاد به کمک روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی چندپایه پرداختند، مشخص شد که به‌دلیل عمق نفوذ کم پین در لایه پایین فولادی ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکال در لایه پایین فولادی بسیار کم است درحالی‌که ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکال در لایه آلومینیوم به‌دلیل حرارت ورودی بالا ایجاد شده در اثر چند پاس بسیار زیاد است. در تست کشش‌برش یک شکست سطحی یکنواخت مشاهده شد درحالی‌که در تست خستگی انتشار ترک از ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکال در لایه آلومینیوم رخ داده سبب شکست شده است [19]. شن و همکارانش در سال 2016 جوشکاری لب رو لب فولاد زنگ‌زن SSt 316 به آلومینیوم 6061 را با استفاده از لایه واسط آلیاژ روی و به کمک فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که فلز روی به‌صورت گسترده در آلومینیوم پخش شده و نکته قابل‌ملاحظه این‌که فلز روی در سمت پسرو نسبت به سمت پیشرو بیشتر پخش شده است [20]. در سال 2016 پوشش‌دهی آلیاژ تیتانیوم با آلومینیوم خالص به کمک فرایند نوین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام شد و در ادامه اثر متغیرهای فرایند و عملیات حرارتی برخواص اتصال مورد بررسی قرار گرفت، مشخص شد که اثر حرارتی-مکانیکی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مکانیزم اصلی پیوند لایه میانی آلومینیوم به تیتانیوم بوده است [21]. در مقاله حاضر به بررسی امکان‌پذیری پوشش‌دهی سطح فولاد St37 با آلومینیوم 6061-T6 به کمک فرایند نوین اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شده است؛ در ادامه خواص مکانیکی و ساختار اتصال مورد بررسی قرار گرفته است.

این پژوهش اولین مطالعه برای پوشش‌دهی سطح فولاد ساده کربنی با آلومینیوم توسط روش نوین پوشش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی در سطح بین‌الملل می‌باشد. بررسی انجام گرفته نشان داد که تکنیک اصطکاکی

<sup>1</sup> Interlocks

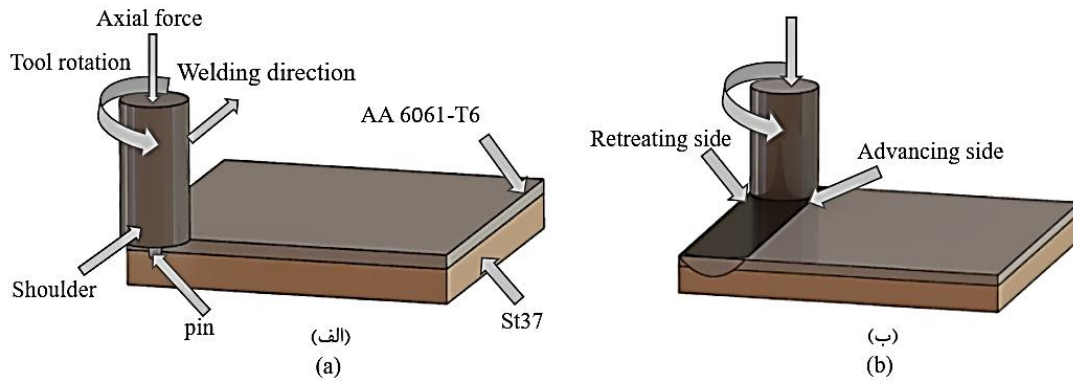


Fig. 1 Schematic cladding process a) Rotational and traverse motions and axial force of tool b) cladding after the first pass

شکل 1 شماتیک فرایند پوشش‌دهی (الف) حرکت‌های دورانی، پیشروی و نیروی محوری ابزار (ب) پوشش‌دهی بعد از پاس اول

قرارگیری و بستن ورق‌ها در حین انجام پوشش کاری اصطکاکی اغتشاشی در "شکل 3 (ب)" نشان داده شده است.



Fig. 2 Tool used in the study

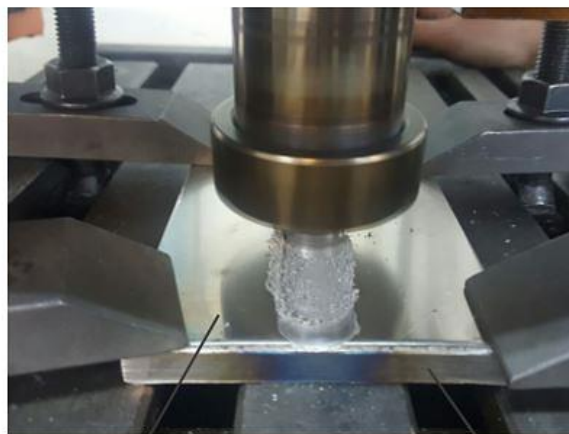
شکل 2 ابزار استفاده شده در این تحقیق

تیتانیوم [22] و منیزیم به فولاد [23] است. شکل هندسی و ابعاد ابزار یکی از مهم‌ترین متغیرهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد [24]. طراحی پین ابزار به‌منظور کاهش سایش پین در تماس با لایه فولادی و محدود شدن حرارت تولید شده صورت گرفت. شکل ابزار مخروطی و با قطر شانه 20 میلی‌متر، ارتفاع پین 2.15 میلی‌متر، قطر بزرگ و کوچک پین مخروطی به‌ترتیب 4 و 6 میلی‌متر و زاویه تقعر شانه 2 درجه انتخاب شده است. ابزار استفاده شده در فرایند جوشکاری اصطکاکی در "شکل 2" نشان داده شده است.

حرارت ورودی به محل اتصال مهم‌ترین عامل تغییر ساختار و خواص مکانیکی اتصال به‌حساب می‌آید [25]. حرارت ورودی با سرعت دورانی رابطه مستقیم و با سرعت پیشروی رابطه معکوس دارد. عمق نفوذ تعیین‌کننده مقدار نفوذ شانه در لایه آلومینیومی و نفوذ پین در لایه فولادی است و عامل اصلی پیوند آلومینیوم و فولاد در لایه میانی می‌باشد. بنابراین پارامترهای موثر در این تحقیق سرعت دورانی، سرعت پیشروی و عمق نفوذ می‌باشد، نسبت سرعت‌های دورانی به پیشروی، سرعت‌های دورانی و پیشروی مختلف در جدول 5 نشان داده شده است. دستگاه فرز استفاده شده برای انجام پوشش کاری اصطکاکی اغتشاشی در این تحقیق در "شکل 3 (الف) و نحوه



(الف)  
(a)



AA 6061-T6 (ب)  
St37 (b)

Fig. 3 a) used Milling machines b) setup and clamping of plates during the process

شکل 3 (الف) دستگاه فرز استفاده شده (ب) نحوی قرارگیری و بستن ورق‌ها در حین انجام فرایند

جدول 5 پارامترهای فرایند پوشش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی

شماره نمونه	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	نسبت سرعت دورانی به پیشروی (rev/mm)
1	800	15	53.3
2	800	25	32
3	800	35	22.8
4	1000	15	66.6
5	1000	25	40
6	1000	35	28.5
7	1200	15	80
8	1200	25	48
9	1200	35	34

جولوگیری از وارد شدن نیروی غیرمحوری در هر سمت از نمونه‌ها لایه‌ای جهت یکسان شدن ضخامت هر دو سمت نمونه قرار داده شد. پس از فرایند پوشش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی برای تحلیل سیلان مواد و ساختار مواد در لایه میانی آلومینیوم و فولاد، نمونه‌هایی با اندازه مناسب از مقطع عرضی آن‌ها تهیه شده که در "شکل 4" نشان داده شده است. سطح نمونه‌های با شماره سنباده‌های 80، 120، 400، 600، 800، 1000، 1500، 2000، 3000 سنباده زده شد و با استفاده از نمد پولیش شد، درنهایت با میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت.

### 3- بحث و تحلیل نتایج

#### 3-1- تنظیم عمق نفوذ جهت تشکیل پیوند لایه میانی

تغییر شکل پلاستیک و افزایش دما در منطقه جوش منجر به تبلور مجدد دینامیکی و تغییر در ریزساختار، انحلال و درشت شدن رسوبات در اطراف منطقه اتصال می‌شود. بر این اساس سه منطقه مختلف با نام‌های منطقه اغتشاشی، منطقه متأثر از حرارت-کار مکانیکی و منطقه متأثر از حرارت قابل تشخیص است [26]. به‌علت تغییرشکل پلاستیک شدید و افزایش ناگهانی دما در منطقه اغتشاشی دانه‌ها شکسته می‌شوند و مرزدانه‌هایی با زاویه کم ایجاد می‌شوند [27]. این نقاط، مکان‌های مناسبی برای جوانه‌زنی هستند. در این نقاط تبلور مجدد رخ می‌دهد که موجب ایجاد یک ساختار ریزدانه‌تر در منطقه اغتشاشی می‌شود. همچنین میزان عناصر آلیاژی در آلومینیوم-6061 T6 بر روی اندازه دانه مؤثر می‌باشد. عناصر آلیاژی سبب ایجاد رسوبات در منطقه جوش می‌شوند. وجود رسوبات در منطقه اغتشاشی می‌تواند به‌عنوان مانعی در برابر رشد دانه عمل کند. ویژگی ساختارهای چند لایه آلومینیوم و فولاد تولید شده با روش اصطکاکی اغتشاشی به رفتار همزنی پین در لایه میانی بستگی دارد. از اثرات پین شامل تغییر شکل پلاستیک شدید و مخلوط کردن مکانیکی مواد در لایه میانی آلومینیوم و فولاد می‌باشد. رفتار اصطکاکی اغتشاشی پین در لایه میانی اثر قابل‌توجهی بر اطمینان از مخلوط شدن مواد در لایه میانی اعمال می‌کند. گرمای تولید شده جهت تشکیل لایه میانی

خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته شده با روش پوشش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی با تست کشش‌برش در دمای محیط ارزیابی شد. به منظور انجام تست کشش‌برش از هر یک از نمونه‌ها دو نوع تست کشش‌برش متفاوت تهیه شد، تا صحت و تکرارپذیری نتایج مورد ارزیابی قرار گیرد. نوع اول نمونه طولی به عرض 10 میلی‌متر و نوع دوم مربعی با طول و عرض 10 میلی‌متر با دستگاه وایپرکات برش زده شد که در "شکل 4" نشان داده شده است. از آنجایی که در طول نمونه تنها به اندازه قطر پین، پیوند ایجاد شده است لذا در ارزیابی استحکام نمونه‌ها تنها عرض نمونه‌ها باید یکسان باشد. برای هر دو نمونه مورد بررسی عرض یکسان و برابر 10 میلی‌متر است. نتایج به دست آمده از هر دو تست بسیار به یکدیگر نزدیک بود و لذا در قسمت نتایج مقدار میانگین استحکام هر دو نمونه ارائه شده است.

سرعت تست کشش‌برش برای همه نمونه‌ها 1 mm/min بود. به‌منظور انجام تست کشش‌برش نوع دوم، قالبی از جنس فولاد H13 ساخته شد و سطح قالب بعد از تراشکاری سنگ‌زده شده که دقت و کیفیت لازم در قالب حاصل شود. در "شکل 5" تصویر قالب استفاده شده برای انجام تست کشش‌برش نوع دوم نشان داده شده است. برای انجام تست کشش‌برش نوع اول نمونه‌ها همانند نمونه‌های جوشکاری لب رو لب برش داده شد که در "شکل 6" نشان داده شده است. جهت ایجاد نیروی تست در جهت طول نمونه و

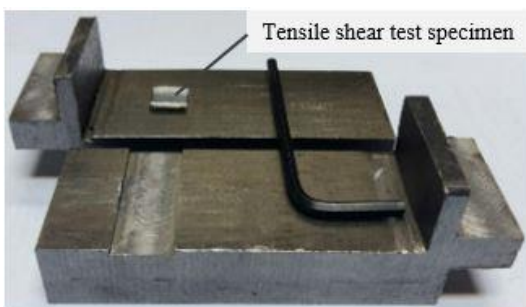


Fig. 5 Photograph of shear tensile die

شکل 5 عکس قالب کشش‌برش



Fig. 6 Photograph of tensile shear test specimens

شکل 6 نمونه‌های آزمون کشش‌برش

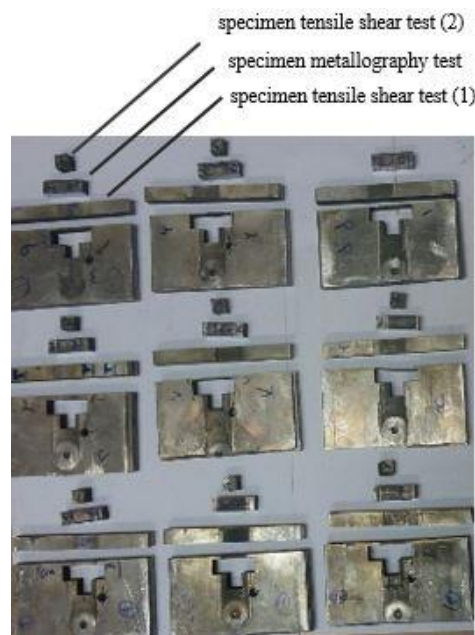


Fig. 4 Photograph of tensile shear and hardness test specimens

شکل 4 عکس نمونه‌های آزمون کشش‌برش و متالوگرافی

تولید حرارت، خمیری شدن مواد و اکستروژن مواد در زیر شانه می‌شود و با حرکت ابزار به داخل لایه پایینی فولاد، قسمت‌های خمیری شده از فولاد در اثر دوران ابزار وارد لایه بالایی آلومینیومی شده و پستی و بلندی‌هایی در لایه میانی تشکیل می‌شود که سبب بهبود اتصال و قفل شدگی دو ناحیه در لایه میانی می‌شود [29]. به‌نظر می‌رسد منشأ این پستی و بلندی‌ها به نوسانات تحمیل‌شده در اثر سرعت دورانی مربوط می‌شود و زمانی که فاصله از لبه‌های خارجی افزایش پیدا می‌کند اتصال قوی‌تری شکل می‌گیرد [30]. با افزایش سرعت پیشروی و کاهش سرعت دورانی دمای فرایند پوشش کاری اصطکاکی اغتشاشی کاهش می‌یابد. از آنجایی‌که منشأ حرارت در این روش اصطکاکی بین ابزار و قطعه کار است، لذا حرارت ورودی با سرعت دورانی رابطه مستقیم و با سرعت پیشروی ابزار رابطه معکوس دارد. با افزایش سرعت پیشروی منبع حرارت از هر مقطع سریع‌تر حرکت کرده و لذا حرارت ورودی به حوزه جوش کاهش پیدا می‌کند. کاهش سرعت دورانی باعث کاهش انرژی اصطکاکی و در نتیجه حرارت ورودی می‌شود. در نتیجه با کاهش سرعت دورانی و افزایش سرعت پیشروی دما در واحد حجم فلز جوش کاهش پیدا می‌کند. در این شرایط نوسانات در طی فرایند افزایش پیدا کرده، در نتیجه پستی و بلندی‌ها در لایه میانی بیشتر و استحکام اتصال افزایش می‌یابد. دما در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از پارامترهای موثر است که معمولاً به صورت غیر متقارن در هر سمت از ناحیه اتصال جوش است. دما در سمت پیشرو نسبت به سمت پسرو بیشتر است [20].

"شکل 8 (الف) و (ب)" سطح مقطع عرضی نمونه‌های پوشش‌دهی شده در سرعت دورانی 1200 rpm و سرعت پیشروی 35 mm/min را نشان می‌دهد. "شکل 8 (الف)" بزرگنمایی 50 برابر از لایه میانی اتصال است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در اثر نفوذ پین در لایه فولاد پستی و بلندی‌هایی در لایه میانی تشکیل شده که سبب بهبود اتصال و قفل شدگی مکانیکی ورق‌های آلومینیوم و فولاد در لایه میانی می‌شود، "شکل 8 (ب)" بزرگنمایی 500 برابر لایه میانی اتصال را نشان می‌دهد که در اثر نفوذ پین در لایه فولاد قسمت‌های خمیری شده از فولاد در اثر دوران پین وارد ناحیه آلومینیوم شده است. "شکل 8 (ج) و (د)" سطح مقطع عرضی نمونه‌های پوشش‌دهی شده در سرعت دورانی 1000 rpm و سرعت پیشروی 35 mm/min را نشان می‌دهد، "شکل 8 (ج)" بزرگنمایی 50 برابر و "شکل 8 (د)" بزرگنمایی 250 برابر لایه میانی آلومینیوم و فولاد را نشان می‌دهد که مخلوط شدگی ورق‌های آلومینیوم و فولاد در لایه میانی کاملاً واضح است، موج‌دار شدن لایه میانی آلومینیوم و فولاد شبیه به جوشکاری انفجاری است [32,31] که در "شکل 8 (د)" نشان داده شده است.

"شکل 9" سطح مقطع عرضی نمونه‌های پوشش‌دهی شده در سرعت دورانی 800 rpm، (الف) و (ب) سرعت پیشروی 35 mm/min، (ج) و (د) سرعت پیشروی 15 mm/min را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با کاهش سرعت دورانی از 1200 rpm "شکل 8 (الف)" به 800 rpm "شکل 9 (الف)"، حرارت تولید شده در حین حرکت ابزار کمتر شده و در نتیجه دمای پوشش‌کاری کاهش یافته است. دمای پایین‌تر حوزه اتصال منجر به ایجاد تنش‌های پلاستیک شدیدتری در حین فرایند پوشش‌کاری شده است. این تنش‌های شدید، منجر به نوسانات بیشتر در لایه میانی گشته‌ها باعث شده تا ذرات فولاد جدا شده در سطح بیشتری از لایه آلومینیوم پراکنده شود و همین مسئله باعث گره خوردن و پیوند بهتر دو فلز و در نتیجه افزایش استحکام اتصال شده است. با افزایش سرعت پیشروی از 15 mm/min "شکل 9 (د)" به 35 mm/min "شکل 9 (ب)"، به دلیل نیروی

آلومینیوم و فولاد به طور عمده با سه مکانیسم ایجاد می‌شود (الف) تماس شانه با سطح آلومینیوم، (ب) تماس سطح جانبی پین با لایه آلومینیوم و سطح انتهایی پین با لایه فولاد و (ج) گرمای داخلی آزادشده مواد که در اثر تغییر شکل پلاستیک شدید ایجاد شده به وسیله برش پین حاصل می‌شود. در این تحقیق ورق آلومینیوم 6061-T6 با ضخامت 2 میلی‌متر به‌عنوان پوشش بر روی سطح فولاد St37 قرار گرفته است. عمق نفوذ ابزار در لایه آلومینیوم یکی از پارامترهای مهم در فرایند پوشش‌دهی به روش اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد. عمق نفوذ ابزار تعیین‌کننده مقدار نفوذ پین در لایه فولادی و نفوذ شانه در لایه آلومینیومی است. مقدار نفوذ ابزار بر روی کیفیت سطح اتصال و جریان مواد در زیر شانه تأثیر مستقیم دارد. با افزایش عمق نفوذ ابزار، فشار فورج پوشش‌کاری نیز افزایش می‌یابد [28] عمق نفوذ بیش از حد شانه در لایه آلومینیوم سبب فشار زیاد و ایجاد حرارت بالا در نتیجه چسبندگی مواد به سطح شانه، لهیدگی سطح اتصال، بیرون زدگی مواد و ضعف اتصال می‌شود که در "شکل 7 (الف)" عمق نفوذ 0.35 میلی‌متر نشان داده شده است. عمق نفوذ بهینه 0.15 میلی‌متر در این تحقیق با سعی و خطا به‌دست آمد که منجر به حداقل شدن پلیسه، سطح یکنواخت پوشش، حرارت مناسب بر لایه فولاد و تغییر رنگ در فولاد که اطمینان از اتصال صحیح می‌باشد گردید، نمونه حاصل از عمق نفوذ 0.15 میلی‌متر در "شکل 7 (ب)" نشان داده شده است. در ادامه این تحقیق، عمق نفوذ ثابت 0.15 میلی‌متر برای همه نمونه‌ها استفاده شد.

### 3-2- بررسی اثر سرعت دورانی و سرعت پیشروی بر شکل‌گیری پوشش

"شکل 8 و 9" عکس میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی نمونه‌های پوشش‌دهی شده با ترکیب متفاوت از سرعت‌های پیشروی و دورانی را نشان می‌دهد. نیروی عمودی ابزار، سرعت دورانی و تماس شانه با سطح ورق‌ها منجر به

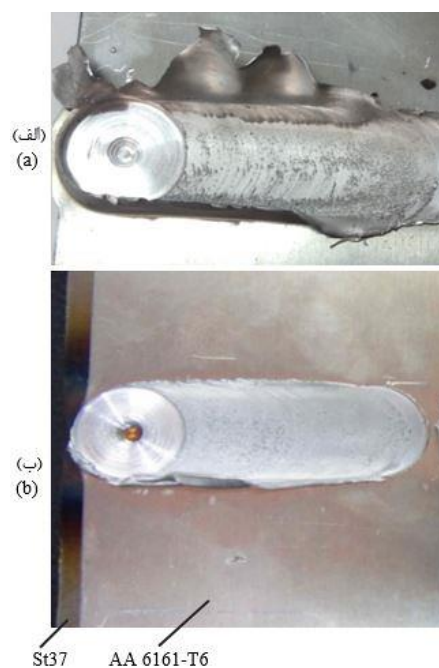
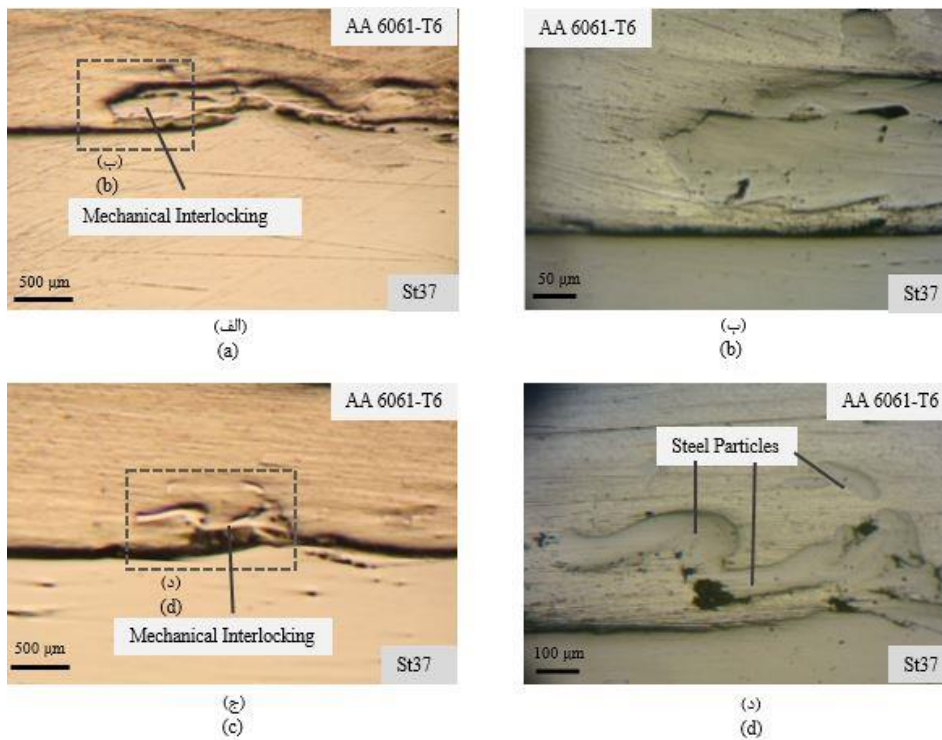


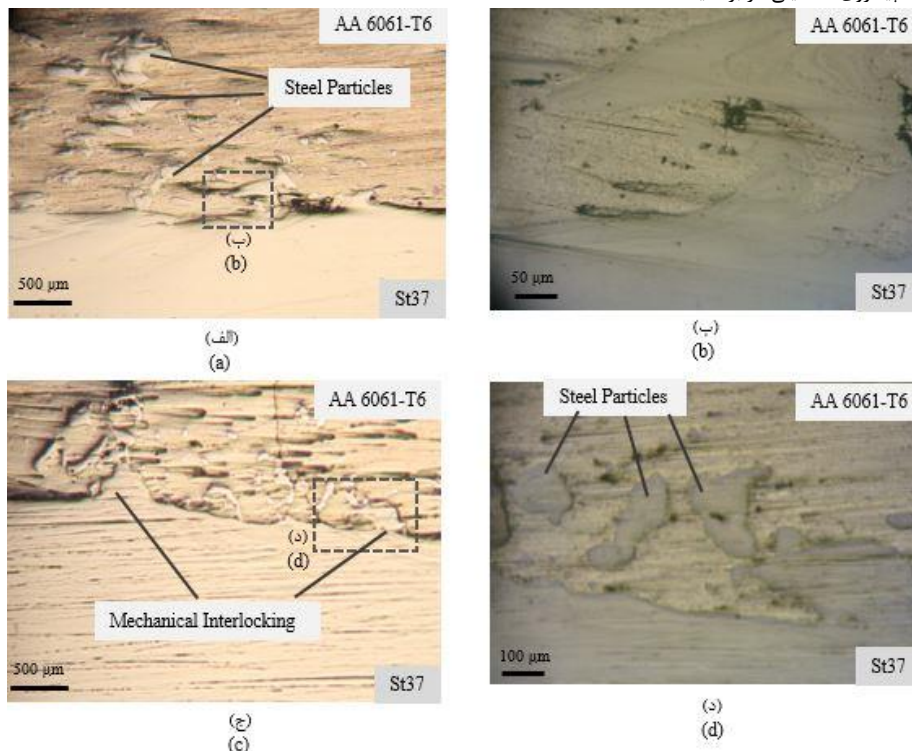
Fig. 7 Effect of shoulder depth on the cladding a) shoulder depth 0.35 mm b) shoulder depth 0.15 mm

شکل 7 تأثیر عمق نفوذ شانه بر پوشش‌دهی (الف) عمق نفوذ شانه 0.35 میلی‌متر (ب) عمق نفوذ 0.15 میلی‌متر



**Fig. 8** Cross-section macrostructure of clad-plate samples a) and b) rotational speed 1200 rpm and traverse speed 35 mm/min c) and d) rotational speed 1000 rpm and traverse speed 35 mm/min

شکل 8 ماکرو ساختار مقطع عرضی نمونه‌های پوشش‌دهی شده (الف) و (ب) سرعت دورانی 1200 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 35 میلی‌متر بر دقیقه (ج) و (د) سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 35 میلی‌متر بر دقیقه



**Fig. 9** Cross-section macrostructure of clad-plate samples a) and b) rotational speed 800 rpm and traverse speed 35 mm/min c) and d) rotational speed 800 rpm and traverse speed 15 mm/min

شکل 9 ماکرو ساختار مقطع عرضی نمونه‌های پوشش‌دهی شده (الف) و (ب) سرعت دورانی 800 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 35 میلی‌متر بر دقیقه (ج) و (د) سرعت دورانی 800 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 15 میلی‌متر بر دقیقه

### 3-3- اثر سرعت دورانی و سرعت پیشروی بر استحکام اتصال

عواملی نظیر اندازه دانه‌ها، چگالی نایجایی‌ها، اندازه و مورفولوژی رسوبات و

فوج مناسب مواد در لایه میانی به خوبی با یکدیگر ادغام شده و پیوند مکانیکی قوی‌تری تشکیل شده است.

اتصال می‌شود. در "شکل 10 (ب)" استحکام برشی نمونه‌های پوشش داده شده برحسب سرعت دورانی به پیشروی نشان داده شده است. با افزایش نسبت سرعت دورانی به پیشروی، میزان حرارت ورودی در موضع اتصال افزایش یافته و استحکام اتصال کاهش می‌یابد. افزایش نسبت سرعت‌ها منجر به افزایش بیش از حد حرارت ورودی و در نتیجه جریان ماده به صورت تلاطمی شده، درشت‌دانه‌گی مواد و افزایش عیوب در ناحیه اتصال می‌شود. به علت تغییر شکل شدید پلاستیک و افزایش دما در منطقه اغتشاشی دانه‌ها شکسته می‌شوند و مرز دانه‌هایی با زاویه کم ایجاد می‌شوند [27]. این نقاط، مکان‌های مناسبی برای جوانه‌زنی هستند. در این نقاط تبلور مجدد دینامیکی رخ می‌دهد که موجب ایجاد یک ساختار ریزدانه‌تر در منطقه اغتشاشی می‌شود [34]. درجه حرارت و سرعت تغییر شکل دو عامل مهم در فرایند اتصال دهی اصطکاکی اغتشاشی هستند که اثر زیادی بر روی اندازه دانه در منطقه اغتشاشی دارند. افزایش میزان تغییر شکل باعث کاهش اندازه دانه‌ها به دلیل تغییر شکل پلاستیک شده و افزایش درجه حرارت باعث افزایش اندازه دانه ناشی از آنیلینگ در این منطقه می‌شود. افزایش سرعت پیشروی موجب افزایش شدت تغییر شکل و در نتیجه کاهش اندازه دانه‌ها شده، که همین مسئله استحکام اتصال را افزایش می‌دهد. کاهش سرعت دورانی موجب کاهش حرارت اصطکاکی و در نتیجه کاهش اندازه دانه‌ها می‌شود در نتیجه استحکام اتصال با کاهش سرعت دورانی افزایش می‌یابد. به منظور بررسی اثر سرعت پیشروی بر جریان سطحی مواد، سطح خط اتصالاتی که با سرعت دورانی 800 rpm پوشش‌دهی شده‌اند در "شکل 11" نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت پیشروی، جریان سطحی مواد بهتر می‌شود؛ مهم‌ترین دلیل این مسئله وارد شدن مواد بیشتر از جلوی محل اتصال به منطقه اغتشاش و نیز افزایش نرخ کرنش محل اتصال است که با افزایش سرعت پیشروی افزایش می‌یابد [35,36]. "شکل 11 (ج)" در سرعت 15 mm/min به دلیل نیروی فورج نامناسب، ورود ناهمگن مواد به درون اتصال، افزایش حرارت حاصل از تغییر شکل پلاستیک شدید و اغتشاش بیش از حد، سطح پوشش داده شده دارای کیفیت مناسبی نمی‌باشد. "شکل 11 (ب)" در سرعت 25 mm/min جریان سطحی مواد نسبت به 15 mm/min بهتر شده، اما هنوز منبع گرما آهسته حرکت می‌کند و منجر به کاهش نرخ خنک‌شوندگی می‌شود. "شکل 11 (الف)" با افزایش

کامل بودن اتصال در آلیاژهای آلومینیم عملیات حرارتی‌پذیر بر روی استحکام اتصال تأثیر می‌گذارند [33]. گرمای ورودی به محل اتصال مهم‌ترین عامل تغییر ساختار و خواص مکانیکی اتصال به حساب می‌آید [25]. حرارت ورودی با سرعت دورانی رابطه مستقیم و با سرعت پیشروی رابطه معکوس دارد، به‌گونه‌ای که با افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی حرارت اصطکاکی و دما افزایش پیدا می‌کند. افزایش دما سبب درشت شدن دانه‌بندی و کاهش استحکام می‌شود. حرارت ورودی بالاتر باعث افزایش سرعت انحلال و درشت شدن رسوبات استحکام بخش و همچنین کاهش چگالی نایجایی‌ها می‌شود. یکی از علت‌های اصلی کاهش استحکام با افزایش دما، کاهش فشار فورج مواد در زیر شانه و در نتیجه تسهیل جریان مواد در اطراف پین است. این مسئله باعث کاهش شدت تغییر شکل‌های پلاستیک مواد در این حوزه می‌باشد. به‌علاوه در دماهای بالا به‌دلیل جریان آسان‌تر مواد احتمال شکل‌گیری ناپیوستگی و حفره در منطقه اتصال افزایش می‌یابد که همین مسئله می‌تواند به کاهش استحکام نهایی اتصال منجر شود. در "شکل 10" استحکام برشی نمونه‌های پوشش داده شده با ترکیب سرعت‌های دورانی و پیشروی مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که در "شکل 10 (الف)" مشاهده می‌شود با کاهش سرعت دورانی از 1200 rpm به 800 rpm در سرعت پیشروی ثابت 15 mm/min استحکام پوشش از 3.7 kN به 4.8 kN افزایش یافته است. در سرعت دورانی ثابت 800 rpm با افزایش سرعت پیشروی از 15 mm/min به 35 mm/min استحکام پوشش از 4.8 kN به 6.6 kN افزایش یافته است. علت افزایش استحکام پوشش با افزایش سرعت پیشروی، نیروی فورج مناسب و ورود همگن مواد به درون اتصال است. با افزایش سرعت پیشروی، منبع حرارت از محل زودتر بیرون می‌رود و نرخ خنک‌شوندگی بیشتر می‌شود که این مسئله باعث جلوگیری از اغتشاش بیش از حد محل اتصال شده است. با افزایش سرعت پیشروی، جریان مواد بیشتر شده و مواد بیشتری از جلوی محل اتصال به منطقه اغتشاش وارد شده و باعث افزایش تغییر شکل پلاستیک شدید می‌شود که موجب افزایش استحکام می‌شود. با افزایش سرعت پیشروی حرارت ورودی به قطعه به دلیل حرکت سریع‌تر ابزار کاهش می‌یابد همین مسئله باعث عدم رخداد درشت‌دانه‌گی در منطقه جوش می‌شود، به‌علاوه زمان پایین‌تر منجر به ایجاد کار مکانیکی بیشتر ناشی از فرایند هم‌زنی ابزار و در نتیجه استحکام بالاتر

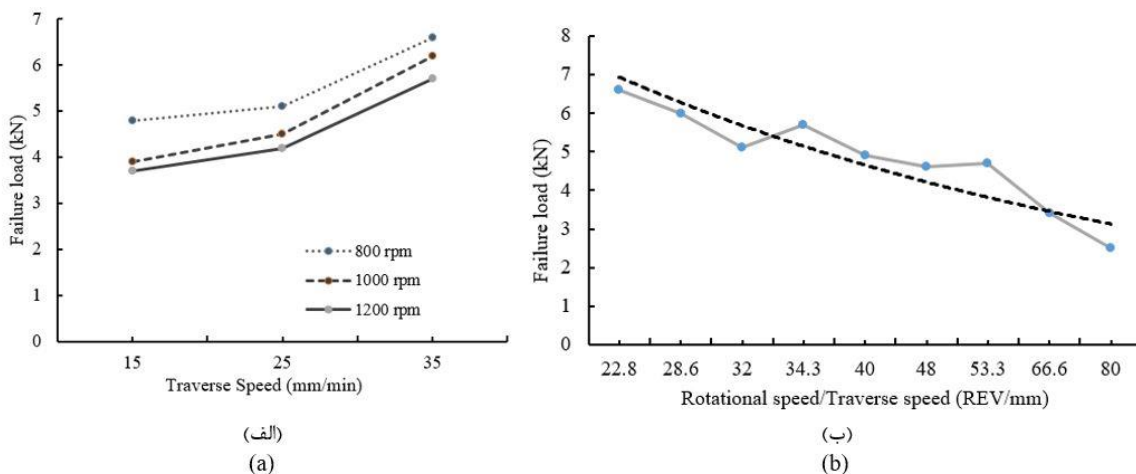


Fig. 10 The shear strength of the cladding samples a) By combining different rotational speed and traverse b) According to ratio rotational speed on traverse

شکل 10 استحکام برشی نمونه‌های پوشش‌دهی شده (الف) با ترکیب سرعت‌های دورانی و پیشروی مختلف (ب) بر اساس نسبت سرعت دورانی به پیشروی

#### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، سطح فولاد St37 با آلومینیوم 6061-T6 با روش نوین پوشش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی به‌صورت موفقیت‌آمیز پوشش‌دهی شد، و تأثیر پارامترهای سرعت دورانی و پیشروی بر خواص مکانیکی و ساختار پوشش مورد بررسی قرار گرفت، اهم نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

1- با افزایش سرعت پیشروی و کاهش سرعت دورانی نوسانات در لایه میانی افزایش پیدا کرده و ذرات فولاد جدا شده افزایش یافته و در سطح بیشتری از لایه آلومینیوم پراکنده شده است.

2- با افزایش سرعت پیشروی گرمای ورودی کمتر شده و باعث جلوگیری از اغتشاش بیش از حد محل اتصال می‌شود، در نتیجه استحکام برشی اتصال افزایش پیدا می‌کند.

3- با افزایش سرعت دورانی استحکام برشی اتصال کاهش پیدا کرده است که دلیل آن حرارت ایجاد شده در اثر اصطکاک افزایش یافته و باعث تسهیل جریان مواد و ایجاد حفره در اطراف پین می‌شود.

4- با افزایش سرعت پیشروی، جریان سطحی مواد بهتر می‌شود، مهم‌ترین دلیل این مسئله وارد شدن مواد بیشتر از جلوی محل اتصال به منطقه اغتشاش و نیز افزایش نرخ خنک‌شوندگی محل اتصال است. با افزایش سرعت پیشروی به دلیل نیروی فورج مناسب، ورود همگن مواد به درون اتصال و افزایش نرخ خنک‌شوندگی، جریان سطحی مواد بهتر شده و کیفیت سطح پوشش افزایش پیدا کرده است.

5- ارتفاع پین ابزار استفاده شده در این تحقیق 2.15 میلی‌متر، ضخامت لایه آلومینیوم 2 میلی‌متر و عمق نفوذ شانه در لایه آلومینیوم 0.15 میلی‌متر است. بنابراین تنها 0.3 میلی‌متر از ارتفاع پین در لایه فولادی نفوذ کرده و اغتشاش ایجاد می‌کند، در نتیجه ناحیه مخلوط شده و قفل شده برابر قطر کوچک پین است. در اثر نفوذ 0.3 میلی‌متر و دوران ابزار در لایه فولادی، قسمت‌های خمیری شده از فولاد وارد لایه آلومینیومی شده و منجر به تشکیل پستی بلندی‌ها و قفل شدگی مکانیکی آلومینیوم و فولاد در لایه میانی می‌شود، که باعث افزایش استحکام برشی لایه پوشش‌دهی شده می‌گردد.

#### 5- مراجع

- [1] R. S. Mishra, M. W. Mahoney, S. X. McFadden, N. A. Mara, A. K. Mukherjee, High strain rate superplasticity in a friction stir processed 7075 Al alloy, *Scripta Mater.* Vol. 42, No. 2, pp. 163–168, 1999.
- [2] R. S. Mishra, Z. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 50, No 21, pp. 71-78, 2005.
- [3] G. Liu, L. Murr, C. Niou, J. McClure, F. Vega, Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum, *Scripta materialia*, Vol. 37, No. 3, pp. 355-361, 1997.
- [4] M. Mahoney, C. Rhodes, J. Flintoff, W. Bingel, R. Spurling, Properties of friction-stir-welded 7075 T651 aluminum, *Metallurgical and materials transactions A*, Vol. 29, No. 7, pp. 1955-1964, 1998.
- [5] K. Colligan, Material flow behavior during friction welding of aluminum, *Weld J*, Vol. 75, No. 7, pp. 229s-237s, 1999.
- [6] W.J. Arbegast, R.S. Mishra, M.W. Mahaney, Friction Stir Welding and Processing, *ASM International, Materials Park*, pp. 273–308, 2007.
- [7] K. Elangovan, V. Balasubramanian, Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy, *Materials Science and Engineering, A*, Vol. 459, No. 1, pp. 7-18, 2007.
- [8] T. Watanabe, H. Takayama, A. Yanagisawa, Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 178, No. 1, pp. 342–349, 2006.



Fig. 11 The Surface flow of the cladding samples a) sample No.3 b) sample No.2 c) sample No.1

شکل 11 جریان سطحی نمونه‌های پوشش‌دهی شده (الف) نمونه شماره 3 (ب) نمونه شماره 2 (ج) نمونه شماره 1

سرعت پیشروی به 35 mm/min به دلیل نیروی فورج مناسب، ورود همگن مواد به درون اتصال و افزایش نرخ خنک‌شوندگی، جریان سطحی مواد بهتر شده و کیفیت سطح پوشش افزایش پیدا کرده است.

ارتفاع پین ابزار استفاده شده در این تحقیق 2.15 میلی‌متر و عمق نفوذ شانه در لایه آلومینیومی 0.15 میلی‌متر است بنابراین در نفوذ ابزار به داخل سطح قطعه کار تنها 0.3 میلی‌متر از ارتفاع پین به داخل لایه پایین فولاد نفوذ کرده و اغتشاش ایجاد می‌کند، بنابراین ناحیه مخلوط شده و قفل شده تقریباً برابر قطر کوچک پین است، در اثر نفوذ 0.3 میلی‌متر و دوران ابزار در لایه فولادی، قسمت‌های خمیری شده از فولاد وارد لایه آلومینیومی شده و منجر به تشکیل پستی بلندی‌ها و قفل شدگی مکانیکی آلومینیوم و فولاد در لایه میانی می‌شود. تمامی نمونه‌ها از فصل مشترک آلومینیوم و فولاد، محل نفوذ پین در لایه فولادی، شکسته شده‌اند. ناحیه اتصال تقریباً برابر با قطر کوچک پین بوده است. سطح مقطع شکست برای نمونه‌ها در "شکل 12" نشان داده شده است.



Fig. 12 Fracture surface samples tensile shear test

شکل 12 سطح مقطع شکست نمونه‌های تست کشش برش



- joint made by friction stir lap welding, *Materials & Design.*, Vol. 33, pp. 111–114, 2012.
- [24] A. fari, G. F. Batalha, E. F. Prados, R. Magnabosco, S. Delijaicove, Tool Wear Evaluations In Friction Stir Processing Of Commercial Titanium Ti-6Al-4V, *Wear Journal* Vol. 302, No. 1, pp. 1327-1333, 2013.
- [25] M. Elyasi, H. Aghajani Derazkola, M. Hossinzadeh, Study on joint zone Microstructure Evolution and Hardness in friction stir welds of AA110 Aluminum alloy to A441 AISI steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 97-107, 2014 (in Persian فارسی).
- [26] M. Nazari, M. Besharati, M. R. Farahani, J. M. Milani, H. M. Jamalian, Investigation on the effects of using Nano-size Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder on the mechanical and microstructural in the multi-passes continuous friction stir welding of the 2024-T6, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 85-90, 2014 (in Persian فارسی).
- [27] Z. Y. Ma, R. S. Mishra, M. W. Mahoney, Superplastic deformation behaviour of friction stir processed 7075Al alloy, *Acta Materialia*, Vol. 50, No. 17, pp. 4419-4430, 2002.
- [28] M. Elyasi, H. Aghajani Derazkola, M. Hossinzadeh, Effects of friction stir welding parameters on mechanical quality of AA110 Aluminum alloy to A441 AISI steel joint, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 379-390, 2015 (in Persian فارسی).
- [29] M. Hammerschmidt, H. Kreye, Microstructure and bonding mechanism in explosive welding, in *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals*, in: M.A. Meyers, L.E. Murr (Eds.), Plenum Press, pp. 961–973, 1981.
- [30] B. Yang, J. Yan, M. A. Sutton, A. P. Reynolds, Banded microstructure in AA2024-T351 and AA2524-T351 aluminum friction stir welds: Part I. Metallurgical studies, *Materials Science and Engineering. A*, Vol. 364, No. 1, pp. 55–65, 2004.
- [31] J. N. Hunt, Wave formation in explosive welding, *Philosophical magazine.*, Vol. 17, No. 148, pp. 669–680, 1968.
- [32] F. Findik, Recent developments in explosive welding, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 3, pp. 1081–1093, 2011.
- [33] M. M. Moradi, H. Jamshidi Aval, R. Jamaati, Experimental investigation on the effect of friction stir welding process parameters in dissimilar joining of AA2024-T351 and AA6061-T6 aluminum alloys, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 394-402, 2016 (in Persian فارسی).
- [34] F. J. Humphreys, P. B. Prangnell, R. Priestner, Fine-grained alloys by thermomechanical processing, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 5, No. 1, pp. 15-21, 2001.
- [35] P. F. Mendez, K. E. Tello, T. J. Lienert, Scaling of coupled heat transfer and plastic deformation around the pin in friction stir welding, *Acta Materialia*, Vol. 58, No. 18, pp. 6012–6026, 2010.
- [36] A. Arora, Z. Zhang, A. Deb, T. Debroy, Strains and strain rates during friction stir welding, *Scripta Materialia*, Vol. 61, No. 9, pp. 863–866, 2009.
- [9] Y. J. Kwon, I. Shigematsu, N. Saito, Dissimilar friction stir welding between magnesium and aluminum alloys, *Materials Letters.*, Vol. 62, No. 5, pp. 3827–3829, 2008.
- [10] J. T. Xiong, J. L. Li, J. W. Qian, F. S. Zhang, W. D. Huang, High strength lap joint of aluminium and stainless steels fabricated by friction stir welding with cutting pin, *Science and Technology of Welding and Joining.*, Vol. 17, No. 3, pp. 196–201, 2012.
- [11] K. Kimapong, T. Watanabe, Friction stir welding of aluminum alloy to steel, *Weld. J.*, Vol. 83, No. 10, p. 277, 2004.
- [12] K. Hokamoto, K. Nakata, A. Mori, S. Tsuda, T. Tsumura, A. Inoue, Dissimilar material welding of rapidly solidified foil and stainless steel plate using underwater explosive welding technique, *Journal of Alloys and Compounds.*, Vol. 472, No. 1, pp. 507–511, 2009.
- [13] M. Asemabadi, M. Sedighi, M. Honarpisheh, Investigation of cold rolling influence on the mechanical properties of explosive-welded Al/Cu bimetal, *Materials Science and Engineering. A*, Vol. 558, pp. 144–149, 2012.
- [14] W. Deqing, S. Ziyuan, Q. Ruobin, Cladding of stainless steel on aluminum and carbon steel by interlayer diffusion bonding, *Scripta materialia*, Vol. 56, No. 5, pp. 369–372, 2007.
- [15] J. S. Lee, H. Son, I. Oh, C. Kang et al, Fabrication and characterization of Ti–Cu clad materials by indirect extrusion, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 187, pp. 653–656, 2007.
- [16] X. Li, G. Zu, M. Ding, Y. Mu, P. Wang, Interfacial microstructure and mechanical properties of Cu/Al clad sheet fabricated by asymmetrical roll bonding and annealing, *Materials Science and Engineering. A*, Vol. 529, pp. 485–491, 2011.
- [17] N. Masahashi, K. Komatsu, S. Watanabe, S. Hanada, Microstructure and properties of iron aluminum alloy/CrMo steel composite prepared by clad rolling, *Journal of Alloys and Compounds.*, Vol. 379, No. 1, pp. 272–279, 2004.
- [18] Z. Shen, Y. Chen, M. Haghshenas, T. Nguyen, J. Galloway, A. P. Gerlich, Interfacial microstructure and properties of copper clad steel produced using friction stir welding versus gas metal arc welding, *Materials Characterization.*, Vol. 104, pp. 1–9, 2015.
- [19] C. Leitao, E. Arruti, E. Aldanondo, D. M. Rodrigues, Aluminium-steel lap joining by multipass friction stir welding, *Materials & Design.*, Vol. 106, pp. 153–160, 2016.
- [20] Q. Zheng, X. Feng, Y. Shen, G. Huang, P. Zhao, Dissimilar friction stir welding of 6061 Al to 316 stainless steel using Zn as a filler metal, *Journal of Alloys and Compounds.*, Vol. 686, pp. 693–701, 2016.
- [21] B. Li, Y. Shen, L. Luo, W. Hu, Effects of processing variables and heat treatments on Al/Ti-6Al-4V interface microstructure of bimetal clad-plate fabricated via a novel route employing friction stir lap welding, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 658, pp. 904–913, 2016.
- [22] Y. Wei, J. Li, J. Xiong, F. Huang, F. Zhang, S. H. Raza, Joining aluminum to titanium alloy by friction stir lap welding with cutting pin, *Mater. Charact.*, Vol. 71, pp. 1–5, 2012.
- [23] Y. Wei, J. Li, J. Xiong, F. Huang, F. Zhang, Microstructures and mechanical properties of magnesium alloy and stainless steel weld-