



## رفتار مکانیکی لایه سطحی Fe/TiC ایجاد شده بوسیله جوش کاری قوس الکتروود پوشش دار

اسماعیل ملایی نژاد<sup>1</sup>، محمود فاضل نجف آبادی<sup>2\*</sup>، ابراهیم کرمان<sup>3</sup>

1- کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، اصفهان

3- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، بخش فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، اصفهان

\* اصفهان، صندوق پستی 8188913415، fazel@pnu.ac.ir

### چکیده

در این پژوهش از روش جوش کاری قوسی با الکتروود پوشش دار به منظور ساخت کامپوزیت سطحی Fe/TiC بر سطح فولاد ساده کربنی استفاده گردید. قوس الکتریکی به منظور تأمین انرژی آغاز واکنش‌های تشکیل ذرات TiC در مذاب فولاد به کار رفت. اثر ترکیب شیمیایی پودر اولیه بر سختی، ریزساختار و مقاومت سایشی کامپوزیت حاصل مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی رفتار سایشی از آزمون‌های تماس چرخشی ماسه/چرخ لاستیکی مطابق استاندارد ASTM G65 استفاده گردید. نتایج نشان داد، بیشترین اندازه و نسبت حجمی ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیم در نمونه با نسبت وزنی گرافیت به فرو تیتانیم 18 به 82 ایجاد شده است. این نمونه بیشترین سختی برابر با 481 برینل را نشان داده است. همچنین، نتایج نشان داد مقاومت سایشی نمونه‌ها به ابعاد و نسبت حجمی ذرات تقویت کننده بستگی دارد. اندازه‌گیری‌ها حاکی از آن بود که حجم ماده از دست رفته در نمونه‌های پوشش دار و بدون پوشش به ترتیب 25 و 289 میلی‌متر مکعب بوده است. در تمامی نمونه‌ها مکانیزم غالب سایش رخداد ریز برش‌ها در زمینه کامپوزیت تشخیص داده شد. مشخص گردید، نمونه ایجاد شده با نسبت وزنی گرافیت به فرو تیتانیم 18 به 82 کمترین میزان سایش و بالاترین مقاومت سایشی را داشته است.

### کلیدواژگان

کامپوزیت سطحی Fe/TiC  
فولاد ساده کربنی  
جوش کاری قوسی الکتروود پوشش دار  
ریز ساختار  
سایش

## Mechanical behavior of Fe/ TiC surface layer fabricated by SMAW process

Esmaeil Mollaie Nejad<sup>1</sup>, Mahmoud Fazel Najafabadi<sup>2\*</sup>, Ebrahim Karamian<sup>1</sup>

1- Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Mechanical Engineering Department, Payame Noor University, Isfahan, Iran

\* P.O.B. 8188913415 Isfahan, Iran, fazel@pnu.ac.ir

### Keywords

Fe/TiC surface composite  
Carbon steel  
SMAW  
Microstructure  
Wear

### Abstract

In the present study, Al/TiC surface composites were prepared by SMAW process using FeTi and graphite powders as reactants. Electrical arc was used in order to start the formation of TiC particles into steel melt. The reactants ratio effect on microstructure, hardness and wear behavior was examined. Dry sand/rubber wheel abrasion test machine according to ASTM G65 was used to wear tests. Results showed that maximum size and volume fraction of TiC particles was obtained by 18/82 graphite/FeTi ratio. This specimens showed maximum hardness equal to 481 BHN. Also, results showed that wear behavior dependent on size and volume fraction of the reinforcement particles. Measurements showed that, the waste volume in the coated and non-coated specimens were 25 mm<sup>3</sup> and 289mm<sup>3</sup>, respectively. In all samples, micro-cutting of the composite matrix were seen. It was revealed that surface composites obtained with 18/82 graphite/FeTi ratio had lower wear rates and bigger wear resistant.

### 1- مقدمه

استفاده از پرتو الکترونی<sup>6</sup> روش‌هایی برای افزایش طول عمر قطعات تحت سایش یا تعمیر آنها هستند. اما این روش‌ها نمی‌توانند پوشش‌های ضخیم را برای کاربردهایی با نرخ سایش بالا ایجاد کنند [1,2]. به علاوه، این فرایندها از

بخار نشانی فیزیکی<sup>1</sup>، بخارنشانی شیمیایی<sup>2</sup>، پاشش حرارتی<sup>3</sup>، کاشت یون<sup>4</sup> روکش کاری با لیزر<sup>5</sup> و روکش کاری با

<sup>1</sup> Chemical vapor deposition (CVD)

<sup>2</sup> Physical vapor deposition (PVD)

<sup>3</sup> Thermal spraying

<sup>4</sup> Ion implantation

<sup>5</sup> Laser Cladding

<sup>6</sup> Electron beam cladding

Please cite this article using:

E. Mollaie Nejad, M. Fazel Najafabadi, E. Karamian, Mechanical behavior of Fe/ TiC surface layer fabricated by SMAW process, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 44-53, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پژوهش نشان داد، ذرات کاربید تیتانیوم از واکنش مستقیم بین فروتیتانیوم و گرافیت در حوضچه جوش فرایند جوش کاری قوسی تنگستن گاز ایجاد می‌گردد. این محققان اعلام کردند، مقاومت سایشی لایه کامپوزیتی ایجاد شده نسبت به زیرلایه، تا چهار برابر افزایش پیدا خواهد کرد [9]. بر طبق نتایج و گزارش این محققان، عامل افزایش مقاومت سایشی، استحکام بالای پیوند بین زمینه و ذرات تقویت کننده تولید شده به شکل درجا بوده است. بنابر ادعای آنها، ذرات تشکیل شده درجا به سادگی از زمینه جدا نشده و کامپوزیت سطحی ایجاد شده مقاومت بالایی در مقابل خراش و تغییر شکل زمینه نشان داده است [9].

در همین رابطه، ژین‌هونگ و همکاران ایجاد درجای کامپوزیت سطحی FeCrBSi/TiC بر روی فولاد AISI 1045 به روش جوش کاری قوسی تنگستن گاز را بررسی کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد، می‌توان ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیوم را از واکنش بین گرافیت و تیتانیوم در حوضچه جوش ایجاد نمود [10]. بر طبق نتایج پژوهش ذکر شده، دلیل افزایش مقاومت سایشی در کامپوزیت حاصله، اثر بازدارندگی ذرات سخت کاربید تیتانیوم در مقابل عامل ساینده و در نتیجه انحراف و یا مختل کردن مسیر شیارهای سایش است [10].

بوچلی و همکاران سایش خراشان کامپوزیت‌های حاوی ذرات کرم و تنگستن ایجاد شده به روش جوش کاری الکترود پوشش دار بر سطح فولاد AISI A36 را بررسی کردند. بر طبق نتایج گزارش شده توسط ایشان، مکانیزم غالب در سایش این کامپوزیت‌ها، ریز خیش<sup>5</sup> و ریز برش<sup>6</sup> زمینه بوده است. بر اساس نظر این محققان، اثر بازدارندگی ذرات سخت کاربیدی در برابر ماده ساینده، عامل افزایش مقاومت سایشی کامپوزیت تحت آزمون بوده است [11]. در پژوهش دیگری توسط وانگ و همکاران ایجاد لایه کامپوزیتی حاوی ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیوم بر سطح فولاد AISI 1020 با استفاده از فرایند جوش کاری قوسی تنگستن گاز مورد بررسی قرار گرفته است. بر طبق نتایج این تحقیق، ایجاد ذرات کاربید تیتانیوم از واکنش مخلوط پودری گرافیت و فروتیتانیوم در حین فرآیند جوش کاری، امکانپذیر گزارش شده است [12]. در این تحقیق نیز، بازدارندگی ذرات کاربیدی ایجاد شده در مقابل مکانیزم سایش خراشان یعنی

ویژگی‌هایی نظیر هزینه‌های بالا، پیچیدگی و عدم امکان استفاده برای قطعات بزرگ و نقاط خارج از دسترس برخوردارند [1]. جوش کاری ذوبی یکی از روش‌هایی است که مشکلات روش‌های پوشش دهی ذکر شده را ندارد. در این فرایند امکان رسوب لایه‌هایی با ضخامت چند میلی‌متر وجود دارد [2]. جوش کاری قوسی الکترود پوشش‌دار<sup>1</sup> به عنوان کم هزینه‌ترین و در عین حال کاربردی ترین روش جوش کاری مورد توجه است [2]. کاربرد الکترودهای پایه آهنی مخصوص سخت کاری که حاوی مقادیر متفاوت کروم و کربن هستند در صنعت متداول است. در مواردی گزارش شده است که پوشش‌های حاصل از این الکترودها به دلیل ایجاد ترکیبات ترد و شکننده، نداشتن چقرمگی کافی و داشتن ترک، مستعد تخریب سطحی و پوسته شدن هستند [2].

ذرات سرامیکی کاربیدی مانند کاربید کروم و کاربید تنگستن به صورت گسترده به منظور ایجاد پوشش‌های مقاوم به سایش بر روی قطعات صنعتی با استفاده از روش‌های مختلف جوش کاری ذوبی استفاده می‌شوند [3]. پژوهش‌های مختلف نشان داده که، کامپوزیت‌های حاوی تقویت کننده تولید شده به شکل درجا<sup>2</sup> خواص مکانیکی و مقاومت به سایش بهتری ایجاد می‌کند. این امر به استحکام بسیار زیاد فازهای سخت ایجاد شده، پیوند مستحکم فصل مشترک زمینه-ذرات تقویت کننده و نیز توزیع همگن تر و اندازه ذرات کوچکتر تقویت کننده‌های ایجاد شده، در مقایسه با روش‌های تولیدی غیر درجا مرتبط شده است [4]. در این میان کاربید تیتانیوم به علت وزن مخصوص کمتر، ضریب اصطکاک کمتر، سختی زیادتر، پایداری حرارتی و شیمیایی بالاتر نسبت به کاربید تنگستن بسیار مورد توجه است [5-7]. مطالعات ترمودینامیک تشکیل فلزات واسطه تناوب چهارم جدول تناوبی نشان داده که، کاربید تیتانیوم به علت منفی‌تر بودن تغییرات انرژی آزاد گیبس<sup>3</sup> تشکیل آن گزینه مناسبی برای ساخت کامپوزیت‌های درجا است [8].

وانگ و همکاران در مورد ایجاد کامپوزیت Fe/TiC بر سطح فولاد AISI 1045 طی فرایند جوش کاری قوسی تنگستن گاز<sup>4</sup> تحقیق کردند. مخلوط پودری مورد استفاده در تحقیق آنها شامل فروتیتانیوم و گرافیت بود. نتایج این

<sup>1</sup> Shielded metal arc welding (SMAW)

<sup>2</sup> In-situ

<sup>3</sup> Gibbs free energy

<sup>4</sup> Gas tungsten arc welding (GTAW)

<sup>5</sup> Micro-ploughing

<sup>6</sup> Micro-cutting

جوش کاری شده و مقطع آن نشان داده شده است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی مخلوط پودری اولیه

Table 1 Chemical composition of mixed powders

نمونه	نسبت اتمی C:Ti	FeTi (wt.%)	C (wt.%)
1	45 : 55	87	13
2	50 : 50	85	15
3	55 : 45	82	18

جدول 2 ترکیب شیمیایی مواد مورد استفاده در این پژوهش (wt.%)

Table 2 Chemical composition of materials used in this study (wt. %)

عنصر	C	Si	Mn	P	S	Ti	Fe
AISI 1045	0/44	0/22	0/53	0/01	0/01	-	بقیه
AISI 1005	0/05	0/04	0/21	0/01	0/01	-	بقیه
FeTi	≤0/1	-	-	≤0/02	≤0/02	70	بقیه

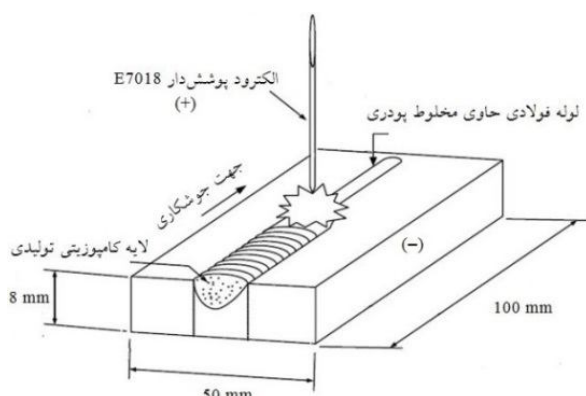


Fig. 1 Schematic representation of SMAW composite cladding

شکل 1 چگونگی انجام عملیات کامپوزیت سازی سطحی با استفاده از فرایند جوش کاری قوسی الکترود پوشش‌دار

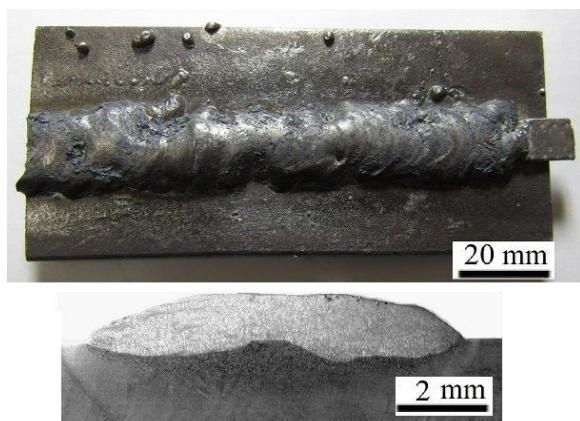


Fig. 2 Specimen No.3, (a) welded track (b) cross section

شکل 2 نمونه جوش کاری سطحی شده شماره 3، (a) نمای گرده جوش (b) سطح مقطع جوش

ریز خیش‌ها و ریز برش‌ها و استحکام بالای پیوند این ذرات با زمینه به دلیل فرایند تولید درجا به عنوان عوامل افزایش مقاومت سایشی نمونه‌ها گزارش شده است [12].

در پژوهش حاضر از فرایند جوش کاری با الکترود پوشش‌دار به منظور ساخت کامپوزیت سطحی Fe/TiC به صورت درجا بر سطح فولاد کربنی AISI 1045 استفاده گردیده است. در این رابطه، اثر ترکیب شیمیایی پودر اولیه بر ریزساختار، سختی و سایش خراشان کامپوزیت سطحی ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفته است.

## 2- مواد و روش تحقیق

برای انجام این پژوهش از مخلوط پودری فروتیتانیم<sup>1</sup> و گرافیت به منظور ایجاد ذرات کاربید تیتانیم استفاده شد. در ابتدا پودرهای واکنش دهنده شامل فروتیتانیم و گرافیت (خلوص 99%) با نسبت‌های مختلفی که در جدول 1 آورده شده مخلوط گردید. مخلوط پودری بدست آمده به منظور همگن شدن و فعال سازی مکانیکی به مدت 3 ساعت و با سرعت 600 دور در دقیقه با استفاده از آسیاب گلوله‌ای پراورزی<sup>2</sup> و تحت اتمسفر خنثی آرگون و با نسبت گلوله به پودر 20 به 1، مورد آسیاب کاری قرار گرفت. سه مخلوط پودری آماده شده درون لوله‌هایی از جنس فولاد AISI 1005 با قطر داخلی 4 mm و قطر خارجی 5 mm قرار گرفت. به منظور افزایش فشردگی پودر داخل لوله‌ها و افزایش احتمال واکنش تولید ذرات کاربید تیتانیم، لوله‌ها توسط دستگاه پرس فشرده شدند. لوله‌های آماده شده بر روی قطعات فولادی از جنس فولاد کربنی AISI 1045 با ابعاد 100×50×8 mm ثابت شدند. ترکیب شیمیایی فولاد زیرلایه، لوله فولادی و فروتیتانیم در جدول 2 آورده شده است. فرایند کامپوزیت سازی با استفاده از الکترود پوشش‌دار AWS A5.1: E7018 با ضخامت 3/25 mm بر روی نمونه‌ها انجام شد. به منظور کاهش رقت و با توجه به نوع الکترود مورد استفاده، نوع جریان و قطبیت، مستقیم با الکترود مثبت<sup>3</sup>، انتخاب شد. شدت جریان با توجه به قطر الکترود مصرفی برابر با 120 A و سرعت متوسط جوش کاری برابر با 1 mm/s انتخاب شد. شکل 1 چگونگی عملیات کامپوزیت سازی به روش جوش کاری با استفاده از فرایند جوش کاری با الکترود پوشش‌دار و در شکل 2، تصویر نمونه

<sup>1</sup> Ferrotitanium (FeTi)

<sup>2</sup> High energy planetary ball mill

<sup>3</sup> Direct current electrode positive (DCEP)

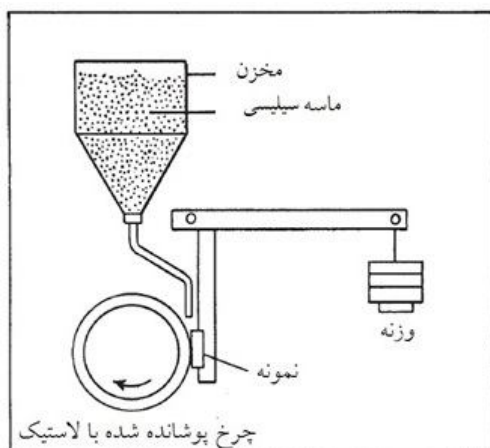


Fig. 3 Schematic of dry sand/rubber wheel abrasion test machine according to ASTM G65

شکل 3 نمای دستگاه آزمون سایش ماسه خشک و چرخ لاستیکی طبق استاندارد ASTM G65 [13]

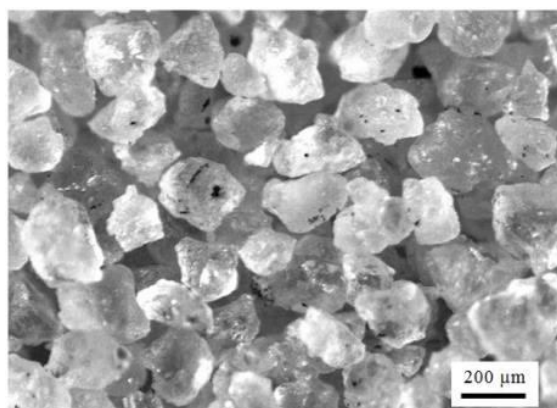


Fig. 4 Morphology of silica sand particles used in abrasion tests  
شکل 4 مورفولوژی ذرات ماسه سیلیکاتی استفاده شده در آزمون سایش

جدول 3 شرایط آزمون سایش ماسه خشک و چرخ لاستیکی طبق استاندارد ASTM G65 و پروسه انجام حالت B [13]

Table 3 ASTM G65 Dry Sand/ Rubber Wheel procedure B wear test parameters

میدان سایش (m)	تعداد دور (n)	زمان نیروی اعمالی (s)	نیروی اعمالی (N)	میانگین اندازه ذرات ماسه (μm)	میدان سایش ماسه (g/min)
1436	2000	600	130	212	350

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- بررسی ریزساختار

در شکل‌های 5 و 6 به ترتیب تصاویر میکروسکوپی الکترونی و میکروسکوپی نوری از ریزساختار نمونه‌ها نشان داده شده است. در این شکل‌ها توزیع و اندازه ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیوم در نمونه‌ها قابل مشاهده و مقایسه با یکدیگر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع ذرات کاربید تیتانیوم در هر سه نمونه نسبتاً یکنواخت است. همچنین مشاهده می‌شود

به‌منظور بررسی‌های ریزساختاری و فازشناسی از مقطع عرضی نمونه‌ها، نمونه‌هایی به ابعاد  $30 \times 20 \times 8$  mm توسط وایرکات برش داده شد. نمونه‌ها با استفاده از محلول نایتال 3 درصد حجمی حکاکی<sup>1</sup> شد. بررسی ریزساختاری پوشش به دست آمده با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>2</sup> انجام شد.

میکروسکوپ الکترونی مدل 435VP ساخت شرکت لئو<sup>3</sup> مجهز به آشکارساز الکترون‌های برگشتی<sup>4</sup> و میکروسکوپ الکترونی مدل وگا ساخت شرکت تسکن<sup>5</sup> مجهز به طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس<sup>6</sup> برای مطالعه ریزساختار ریزساختار و آنالیز شیمیایی نقطه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. بررسی فازی پوشش ایجاد شده با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس<sup>7</sup> ساخت شرکت فیلیپس مجهز به لامپ اشعه ایکس با هدف مسی و  $K\alpha = 1.54\text{\AA}$  انجام شد. به‌منظور سختی‌سنجی از روش سختی‌سنجی برینل طبق استاندارد ASTM E10 با استفاده از فرورونده گلوله کاربید تنگستن با قطر 2/5mm، بار اعمالی 187/5 kgf و زمان توقف 10 s استفاده شد. آزمون سایش ماسه خشک و چرخ لاستیکی<sup>8</sup> تحت استاندارد ASTM G65 به‌منظور بررسی مقاومت نمونه‌ها در برابر سایش خراشان و در دمای محیط انجام گرفت. در این آزمون از ماسه سیلیسی به عنوان عامل ساینده استفاده می‌گردد. چرخ فولادی پوشانده شده با لاستیک، تحت نیروی مشخص، ذرات ماسه را بر سطح نمونه حرکت داده و باعث سایش خراشان سطح آن می‌گردد. نمایی از این دستگاه در شکل 3 و مورفولوژی ذرات ماسه مورد استفاده در شکل 4 نشان داده شده است.

جدول 3 شرایط مربوط به آزمون سایش طبق استاندارد ذکر شده را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، طبق این استاندارد، در انجام این آزمون‌ها، میزان وزن از دست رفته نمونه‌های تحت سایش، بایستی از تفاوت وزن نمونه‌ها، قبل و در انتهای هر آزمون اندازه‌گیری شده و با استفاده از رابطه (1) [13] به میزان حجم از دست رفته تبدیل و گزارش گردد.

$$(1) \quad \text{میزان کاهش وزن (g)} = \frac{\text{میزان کاهش وزن (g)}}{\left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)_{\text{چگالی}}} \times 1000$$

<sup>1</sup> Etching

<sup>2</sup> Scanning electron microscope (SEM)

<sup>3</sup> LEO

<sup>4</sup> Backscattered electron detector (BSD)

<sup>5</sup> Tescan Vega

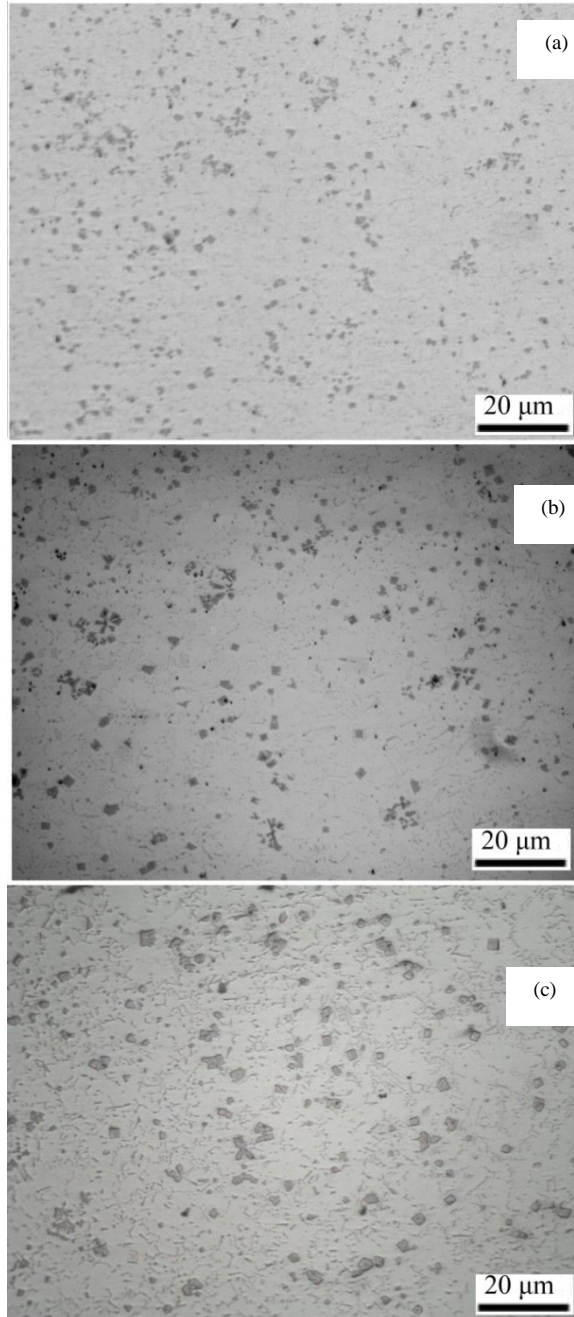
<sup>6</sup> Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS)

<sup>7</sup> X-ray powder diffraction (XRD)

<sup>8</sup> Dry Sand/Rubber Wheel abrasion test



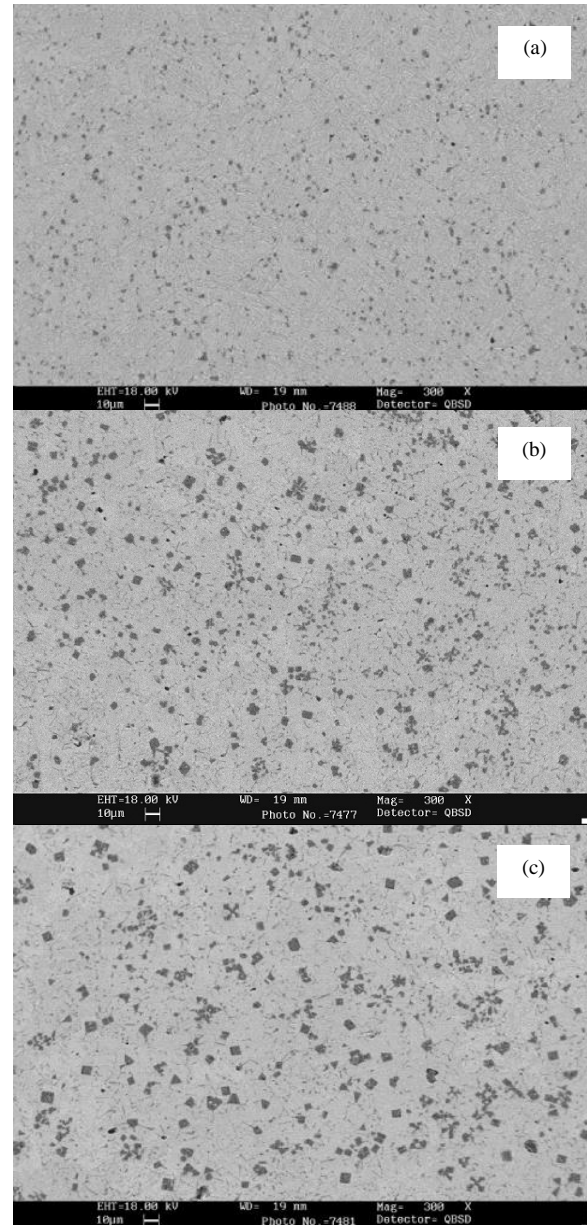
در شکل 7(a) تصویر میکروسکوپ الکترونی از ذرات کاربید تیتانیوم در زمینه پرلیتی نشان داده شده است. با توجه به اینکه تیتانیوم یک عنصر کاربیدزا است، می‌توان چنین استنباط نمود که تشکیل و رشد ذرات کاربید تیتانیوم باعث مصرف عنصر کربن محلول در مذاب شده و تمایل به تشکیل ساختار فریتی در زمینه افزایش یافته است.



**Fig. 6** Unetched OM micrograph of unetched coating with different chemical composition of reactant powders (a) specimen 1 (C13 FeTi87) (b) specimen 2 (C15 FeTi85) (c) specimen 3 (C18 FeTi82)

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های حکاکی نشده از ریزساختار پوشش با ترکیب شیمیایی پودر اولیه متفاوت. ذرات تیره کاربید تیتانیوم. (a) نمونه 1 (C13 FeTi 87)، (b) نمونه 2 (C15FeTi85)، (c) نمونه 3 (C18 FeTi 82)

که با افزایش نسبت گرافیت به تیتانیوم در پودر اولیه، اندازه ذرات کاربید تیتانیوم حاصل از واکنش‌ها بزرگتر شده و با کاهش این نسبت، اندازه ذرات کاهش می‌یابد. با بررسی نمونه‌ها مشخص گردید، بیشترین کسر حجمی ذرات کاربید تیتانیوم در نمونه 3 با نسبت وزنی گرافیت به فروتیتانیوم (18 به 82) ایجاد شده است. اندازه گیری‌ها نشان داد که در این نمونه، اندازه متوسط ذرات تقویت کننده  $6 \mu\text{m}$  و متوسط کسر حجمی آنها به حدود 8% رسیده است.



**Fig. 5** SEM micrographs of coating with different chemical composition of reactant powders (a) specimen 1 (C13 FeTi87) (b) specimen 2 (C15 FeTi85) (c) specimen 3 (C18 FeTi82)

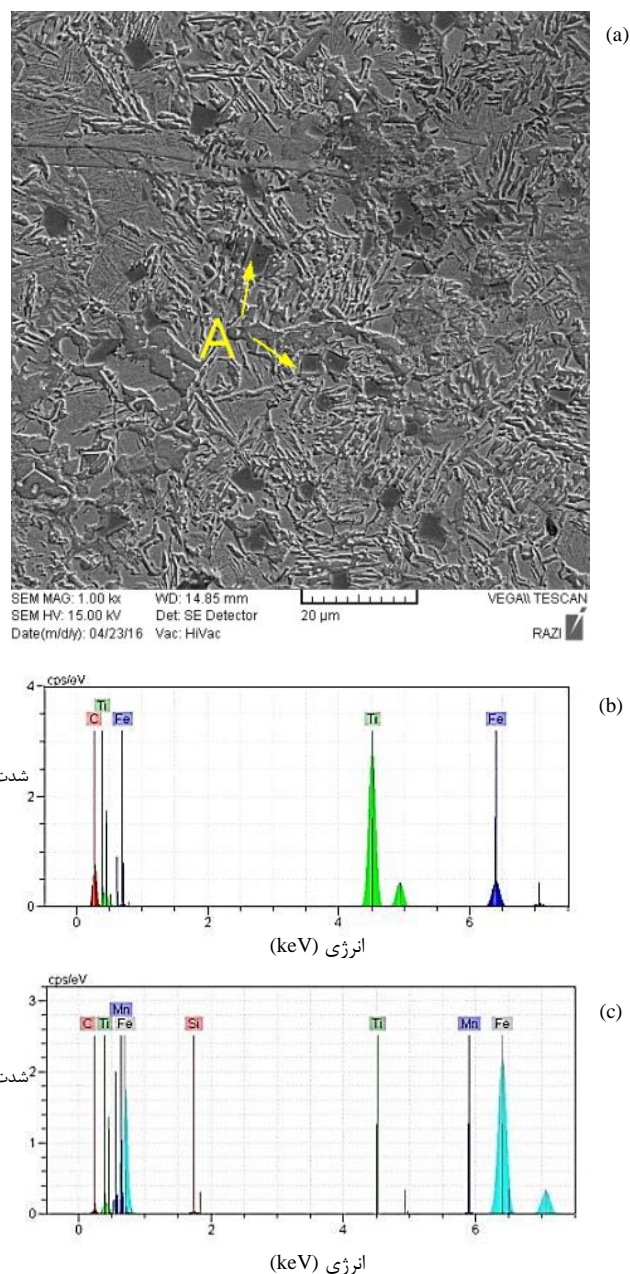
شکل 5 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار پوشش با ترکیب شیمیایی پودر اولیه متفاوت (a) نمونه 1 (C13 FeTi 87)، (b) نمونه 2 (C15FeTi85)، (c) نمونه 3 (C18 FeTi 82)

ساختار کریستالی مکعبی کاربید تیتانیوم نسبت داد. این نوع ساختار کاربید تیتانیوم توسط وانگ و همکاران در کامپوزیت سطحی Fe/TiC تولید شده توسط فرایند جوش کاری قوسی تنگستن گاز نیز گزارش شده است [14]. شکل 7(b) نتیجه تجزیه شیمیایی انجام شده از ذرات کاربید تیتانیوم تشکیل شده در این فرآیند را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ترکیب این ذرات عنصر تیتانیوم و کربن قابل شناسایی است. همچنین مقادیری آهن نیز شناسایی شده است که این امر به اثر زمینه فولادی مربوط است. در همین رابطه و در شکل 7(c) نتیجه تجزیه شیمیایی زمینه فولادی در بر گیرنده ذرات کاربیدی نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در زمینه عناصر آهن (Fe)، کربن (C)، منگنز (Mn)، تیتانیوم (Ti) و سیلیسیم (Si) شناسایی شده است. وجود این عناصر را می‌توان ترکیب اولیه فولاد مصرفی و بخشی را به عناصر وارد شده به زمینه پس از فرآیند ساخت در جای ذرات نسبت داد.

شکل 8 ذرات کاربید تیتانیوم در نمونه 1 را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، ذرات کاربید تیتانیوم در این نمونه کوچکتر از ذرات موجود در نمونه 3 هستند. کاهش اندازه این ذرات را می‌توان به کاهش نسبت کربن به تیتانیوم در مخلوط پودری اولیه و دسترسی به کربن کمتر در حین فرآیند تشکیل ذرات مربوط دانست. در این نمونه، زمینه به طور کلی از فریت تشکیل شده است. با توجه که مقدار کربن در پودر اولیه مربوط به این نمونه کمتر از نمونه 3 است، احتمالاً واکنش کربن و تیتانیوم و تولید کاربید تیتانیوم باعث فقیر شدن مذاب از کربن شده است. در این شرایط، زمینه تمایل به فریتی شدن داشته است. این امر در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است [14].

### 3-2- بررسی یافته‌های پراش پرتو ایکس

در شکل 9 الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه 3 نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، خطوط پراش حاصل از این نمونه شامل خطوط مربوط به کاربید تیتانیوم (TiC)، فریت ( $\alpha$ -Fe) مربوط به زمینه و سمنتیت ( $Fe_3C$ ) احتمالاً مربوط به ساختار پرلیت است. همچنین اثری از فازهای موجود در عوامل واکنش‌دهنده استفاده شده شامل فروتیتانیوم ( $FeTi$  و  $Fe_2Ti$ ) و گرافیت (C) در این نمونه مشاهده نمی‌شود.



**Fig. 7** SEM micrographs of specimen 3. (a) TiC particles in perlite matrix. (b) Chemical composition analysis of spots marked with A. (c) Chemical composition analysis of matrix

شکل 7 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه 3 (a) ذره TiC در زمینه پرلیتی (b) آنالیز شیمیایی نقاط مشخص شده با A (c) آنالیز شیمیایی زمینه.

این مکانیزم برای توجیه ساختار فریتی زمینه از سوی محققان دیگر نیز گزارش شده است [14].

همچنین مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت کربن به تیتانیوم در پودر اولیه، ساختار زمینه به سمت تشکیل پرلیت بیشتر تمایل پیدا کرده است. همچنین در این تصاویر دیده می‌شود، ذرات کاربید تیتانیوم حاصل از واکنش‌ها غالباً مکعبی و گوشه دار هستند. شکل این ذرات را می‌توان به



ایجاد شده، دیده می‌شود. همچنین، وجود مقدار کمی تیتانیوم در زمینه کامپوزیت، نشان داده شده در شکل 7(c) را می‌توان به وجود مقداری تیتانیوم حل شده در زمینه که با کربن واکنش نداده است، نسبت داد.

### 3-3- سختی

شکل 10 نتایج آزمون‌های سختی سنجی سطحی بر مبنای برینل را در نمونه‌های کامپوزیتی نشان می‌دهد. دیده می‌شود که سختی سطحی با افزایش ذرات کاربید تیتانیوم افزایش پیدا کرده است. کمترین سختی سطحی در نمونه 1 با نسبت وزنی گرافیت به فرو تیتانیوم (13 به 87) در مخلوط پودری اولیه مشاهده گردید. در این رابطه می‌توان گفت، در این نمونه به علت اندازه کوچک ذرات کاربید تیتانیوم و کسر حجمی کم آنها در پوشش، افزایش سختی کمتری بوجود آمده است. از سوی دیگر، بیشترین سختی سطحی در نمونه 3 مشاهده شد. در این نمونه سختی در مقایسه با زیرلایه تقویت نشده از 160 به 481 برینل (حدود 200% افزایش پیدا کرده است. همان‌طور که در قسمت بررسی ریزساختار ذکر شد، افزایش نسبت وزنی گرافیت به فرو تیتانیوم (18 به 82) در نمونه 3 باعث افزایش کسر حجمی و اندازه ذرات فاز سخت کاربید تیتانیوم شده است. می‌توان دید که با افزایش اندازه و کسر حجمی ذرات سخت کاربید تیتانیوم در این نمونه، سختی نیز افزایش یافته است. تغییر نوع زمینه از فریتی در نمونه 1 به پرلیتی در نمونه 3 با افزایش مقدار کربن در مخلوط پودری اولیه را می‌توان عامل موثر دیگری در افزایش سختی در نمونه 3 دانست.

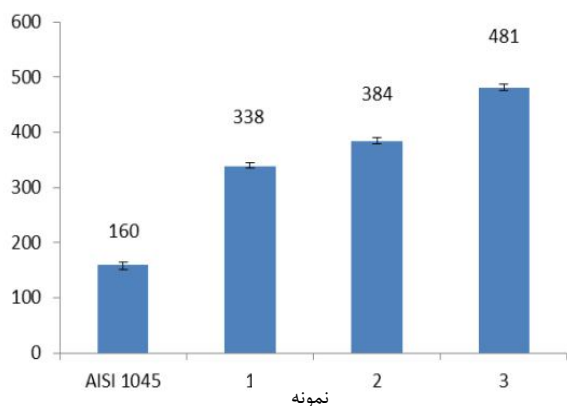


Fig. 10 Hardness of specimens (Brinell Hardness)

شکل 10 نتایج سختی سنجی نمونه‌ها (برینل)

البته باید توجه داشت، افزایش سختی پوشش با افزایش در

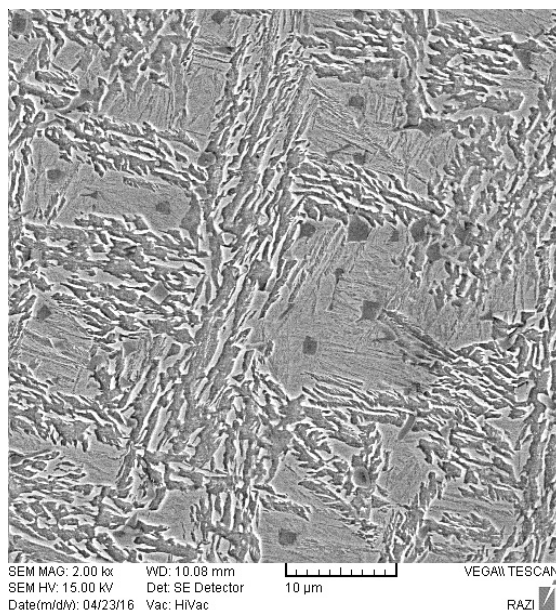


Fig. 8 SEM micrograph of TiC particles in ferrite matrix in specimen 1

شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات TiC در زمینه فریتی در نمونه 1

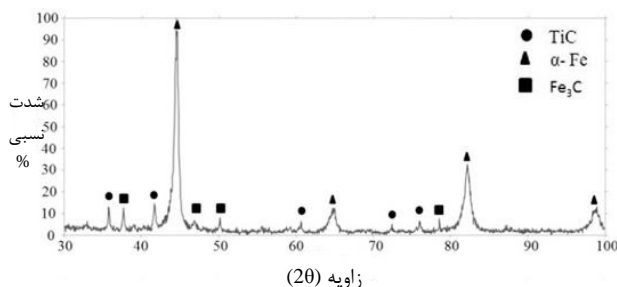


Fig. 9 XRD spectrum of composite coatings of specimen 3

شکل 9 الگوی پراش پرتو ایکس از پوشش کامپوزیتی در نمونه 3

عدم حضور ترکیبات پودر اولیه در پوشش را می‌توان این‌گونه توضیح داد که، بخش زیادی از این ترکیبات در واکنش شرکت کرده و فاز تقویت‌کننده را ایجاد نموده است. از سوی دیگر، وجود فاز  $Fe_3C$  را می‌توان به کاهش تیتانیوم در حوضچه جوش در اثر تولید کاربید تیتانیوم، و در نتیجه کاهش تمایل آن به ایجاد کاربیدهای بیشتر نسبت داد. این امر قبلاً نیز مورد بررسی قرار گرفته و گزارش شده است [14]. در این رابطه، گزارش شده است که در مراحل پایانی واکنش تولید کاربید تیتانیوم در کامپوزیت‌های زمینه فولادی، با کاهش مقدار تیتانیوم در مذاب و در نتیجه کاهش اکتیویته آن، شرایط برای واکنش آهن با کربن و تولید فاز سمنتیت ( $Fe_3C$ ) مهیا می‌گردد [15].

لذا به نظر می‌رسد به همین دلیل است که خطوط پراش مربوط به حضور سمنتیت ( $Fe_3C$ ) در الگوی پراش پوشش

در همین رابطه، گزارش شده است که در آزمون سایش ASTM G65 سازوکار سایش شامل ایجاد خراش، شیار و تغییر شکل پلاستیک در سطح نمونه توسط ذرات سخت ماسه سیلیسی است [11]. شکل 12 سطح سایش حاصل از انجام آزمون بر روی زیرلایه تقویت نشده را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، سطح تحت تاثیر برخورد و حرکت ماده ساینده بر روی آن تحت نیروی عمودی وارده، به شدت شیاردار شده است. شیارهای سایشی ایجاد شده در این نمونه موازی و عمیق هستند. همچنین می‌توان دید که در این نمونه به علت سختی کم و تغییر شکل پلاستیکی زیاد، ماده در راستای شیارهای ایجاد شده جابجا شده و به صورت برآمدگی‌هایی در دو طرف شیار ایجاد شده (نشان داده شده با حرف A در شکل 10) انباشته شده است. از این پدیده در مراجع به عنوان سازوکار ریز خیش نام برده شده است [16,11]. شکل 13 سطح سایش نمونه 1 را نشان می‌دهد. می‌توان دید که در این نمونه عمق شیارها در مقایسه با زیر لایه تقویت نشده، کمتر شده است و برآمدگی‌های بسیار کمتری در اطراف شیارهای سایش دیده می‌شود. در نتیجه با توجه به شکل شیارها و عدم وجود تغییر شکل پلاستیکی زیاد در اطراف آنها، می‌توان در نظر گرفت که سازوکار غالب سایش در این نمونه از نوع ریز برش است [16]. افزایش سختی در این نمونه نسبت به نمونه پایه را می‌توان عاملی در تغییر سازوکار سایش از ریز خیش‌ها به ریز برش‌ها و کاهش عمق شیارها دانست [16].

شکل 14 سطح سایش نمونه 2 را نشان می‌دهد. با مقایسه این تصویر و تصویر حاصل از نمونه 1 می‌توان دید که سازوکار سایش خراشان در نمونه 1 یعنی ریز برش هم در این نمونه دیده می‌شود.

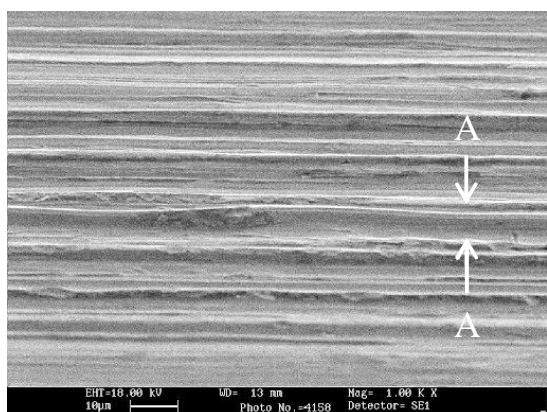


Fig. 12 SEM micrograph of the worn surface of substrate

شکل 12 تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش زیر لایه تقویت نشده

میزان کربن ورودی امری همیشگی نیست. به عبارت دیگر فقط تا زمانی که افزایش کربن ورودی بتواند در افزایش کسر حجمی ذرات در حال تشکیل موثر باشد، اثر مثبت ذکر شده وجود خواهد داشت. لذا نسبت مناسب گرافیت و فروتیتانیم به منظور ایجاد ذرات کاربیدی مقاوم به سایش مورد توجه است. در صورت افزایش بیش از حد نسبت گرافیت به تیتانیم، بدلیل عدم حضور تیتانیم کافی در حوضچه مذاب تشکیل ذرات کاربید تیتانیم بیشتر رخ نخواهد داد. طبق نتایج گزارش شده دیگر محققان، کاهش مقاومت سایشی نیز دیده شده و دلیل آن سختی بیش از حد زمینه و کاهش مقاومت به پوشته شدن و ترک خوردن سطحی گزارش شده است. به همین دلیل کاهش مقاومت سایشی سطح و عملکرد عکس نیز گزارش شده است. این امر با پژوهش امامیان و همکاران در مورد اثر افزایش نسبت کربن به تیتانیم در پودر اولیه بر ریزساختار و افزایش سختی پوشش تولیدی هماهنگی دارد [5].

### 3-4-3 سایش

در شکل 11، نتایج آزمون‌های سایش انجام شده بر روی نمونه‌ها به شکل نمودار نشان داده شده است. می‌توان دید که با افزایش مقدار و اندازه ذرات کاربیدتیتانیم در نمونه‌ها، مقدار تخریب نمونه‌ها که به شکل کاهش حجم ناشی از سایش گزارش شده است، کاهش یافته است. این امر به معنی افزایش مقاومت سایشی در این نمونه‌ها است. در این رابطه، بیشترین مقاومت سایشی در نمونه 3 که دارای بیشترین کسر حجمی و بیشترین اندازه ذرات کاربید تیتانیم است مشاهده می‌شود. همچنین کمترین مقاومت سایشی نیز بر اساس این نتایج به نمونه تقویت نشده، مربوط است.

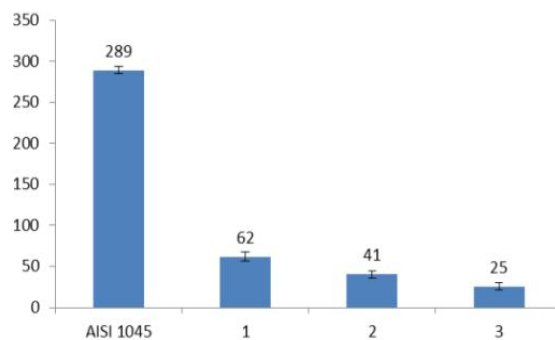


Fig. 11 Volume loss of specimens according to ASTM G65 wear test

شکل 11 کاهش حجم نمونه‌ها بر اساس آزمون سایش ASTM G65 سایش در نمونه 3



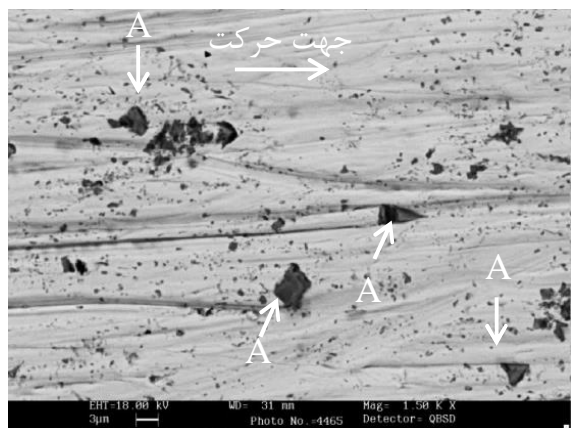


Fig. 15 SEM micrograph of the worn surface of specimen 3

شکل 15 تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح

استحکام بالای فصل مشترک ذره-زمینه، ذرات تقویت کننده در این کامپوزیت را می‌توان عامل این پدیده دانست. گزارش شده است که در کامپوزیت‌های درجا، ذرات تقویت کننده در برخورد با ماده ساینده براحتی از زمینه جدا نشده و در نتیجه کامپوزیت حاصله دارای مقاومت بسیار بالایی در مقابل سایش است [2، 10 و 17].

#### 4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش لایه کامپوزیتی Fe/TiC با استفاده از فرایند SMAW بر سطح فولاد AISI 1045 ایجاد شد، نتایج حاصل را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد.

- کامپوزیت سطحی حاوی ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیوم طی فرایند جوش کاری قوسی با الکترود پوشش‌دار از مخلوط پودری فروتیتانیم و گرافیت بر سطح فولاد ساده کربنی ایجاد شد.

- بیشترین اندازه و نسبت حجمی ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیوم در نمونه با نسبت وزنی گرافیت به فرو تیتانیوم (18 به 82) بدست آمد.

- بیشترین سختی در نمونه با نسبت وزنی گرافیت به فروتیتانیم (18 به 82) بدست آمد، به طوری که سختی کامپوزیت تولید شده تا 200% نسبت به زیرلایه تقویت نشده (160 به 481 برینل) افزایش پیدا کرد.

- میزان کاهش حجم سایش در نمونه پایه نسبت به نمونه کامپوزیت سازی شده از 289 به 25 میلی‌متر مکعب کاهش یافت.

- سازوکار غالب در سایش خراشان نمونه‌های کامپوزیت سازی شده، برش ریز زمینه فولادی بود.

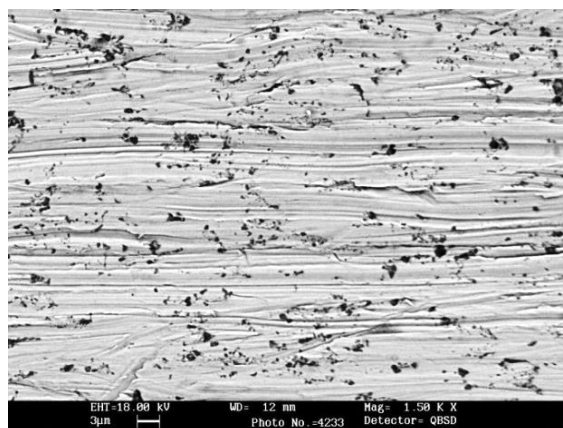


Fig. 13 SEM micrograph of the worn surface of specimen 1

شکل 13 تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش در نمونه 1

ولی در این نمونه با افزایش اندازه و کسر حجمی ذرات تقویت کننده و در نتیجه افزایش سختی کامپوزیت حاصله، اثر بازدارندگی ذرات کاربید تیتانیوم افزایش یافته است و در مواردی مسیر شیارها مختل شده است. به همین دلیل پیوستگی مشاهده شده در مسیر شیارها که قبلاً در نمونه 1 مشاهده شد، در نمونه شماره 2 مشاهده نمی‌گردد. این رفتار را می‌توان به اثر بازدارندگی ذرات سخت کاربید تیتانیوم موجود در زمینه در برابر شیارزنی و ایجاد خراش توسط ماده ساینده نسبت داد [9 و 11]. در شکل 15 سطح سایش نمونه 3 نشان داده شده است. شیارهای ایجاد شده در این نمونه نسبت به نمونه‌های دیگر بسیار کم‌عمق‌تر هستند. افزایش سختی این نمونه نسبت به نمونه 2 را می‌توان عاملی در کاهش عمق شیارها دانست. سازوکار سایش خراشان در این نمونه را هم می‌توان سازوکار ایجاد برش‌های ریز دانست. به علاوه در این نمونه می‌توان دید که ذرات تقویت کننده باعث انحراف و یا متوقف شدن شیارهای سایش شده‌اند. اما دیده می‌شود، این ذرات از زمینه جدا نگردیده‌اند (نشان داده شده با A در شکل 15).

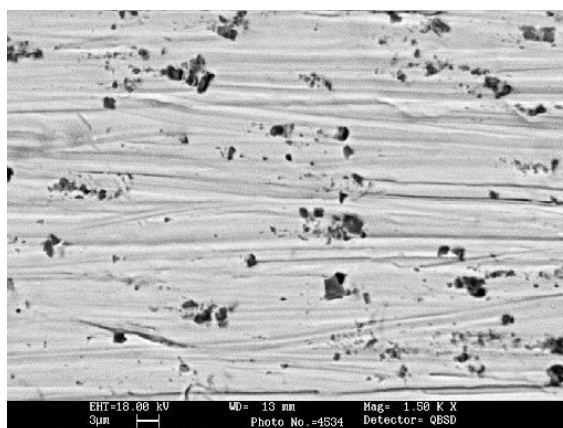


Fig. 14 SEM micrograph of the worn surface of specimen 2

شکل 14 تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش در نمونه 2

composite coatings produced by GTAW multi-layers melting process, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 441, No. 1-2, pp. 60-67, 2006.

- [10] W. Xinhong, Z. Zengda, S. Sili, Q. Shiyao, Microstructure and wear properties of in situ TiC/FeCrBSi composite coating prepared by gas tungsten arc welding, *Wear*, Vol. 260, No. 1-2, pp. 25-29, 2006.
- [11] M.F. Buchely, J.C. Gutierrez, L.M. Leon, A. Toro, The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys, *Wear*, Vol. 259, No. 1-6, pp. 52-61, 2005.
- [12] X.H. Wang, S.L. Song, S.Y. Qu, Z.D. Zou, Characterization of in situ synthesized TiC particle reinforced Fe-based composite coatings produced by multi-pass overlapping GTAW melting process, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, No. 12, pp. 5899-5905, 2007.
- [13] ASTM Standard G-65, Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2000.
- [14] Q. Wu, Y. Sun, C. Yang, F. Xu, F. Song, Microstructure and mechanical properties of common straight carbon steels strengthened by TiC dispersion, *Materials Transactions*, Vol. 47, No. 9, pp. 2393-2398, 2006.
- [15] X. H. Wang, Z. D. Zou, S. Y. Qu, S. L. Song, Microstructure and properties of the TiC/Fe-based alloy hardfacing layers, *Journal of Materials Science*, Vol. 40, No. 14, pp. 3629-3633, 2005.
- [16] M. Salehi, F. Ashrafizadeh, *Surface metallurgy and tribology*, Iranian Society of Science and Surface Technology, 1995 (in Persian فارسی)
- [17] X. H. Wang, M. Zhang, Z. D. Zou, S. Y. Qu, Microstructure and wear properties of TiC-VC Reinforced iron based hardfacing layers, *Materials Science and Technology*, Vol. 22, No. 2, pp. 193-198, 2006.

- اثر بازدارندگی ذرات سخت کاربیدی در مقابل ماده ساینده و استحکام بالای فصل مشترک ذره- زمینه را می‌توان عامل مؤثری در افزایش مقاومت سایشی در این کامپوزیت دانست.

## 5- مراجع

- [1] D.X. Peng, The effects of welding parameters on wear performance of clad layer with TiC ceramic, *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 64, No. 5, pp. 303-311, 2012.
- [2] X.H. Wang, S.Y. Zou, S.L. Song, Microstructure and wear properties of Fe-based hardfacing coating reinforced by TiC particles, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 168, No. 1, pp. 89-94, 2005
- [3] P.F. Mendez, N. Barnes, K. Bell, Borle, S.D. S.S. Gajapathi, S.D. Guest, H. Izadi, A. Kamyabi Gol, G. Wood, Welding processes for wear resistant overlays, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 16, No. 1, pp. 4-25, 2013.
- [4] S.C. Tjong, Z.Y. Ma, Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites, *Materials Science and Engineering*, Vol. 29, No. 3-4, pp. 49-113, 2000.
- [5] A. Emamian, S.F. Corbin, A. Khajepour, Tribology characteristics of in-situ laser deposition of Fe-TiC, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 206, No. 22, pp. 4495-4501, 2012.
- [6] H.O. Pierson, *Handbook of refractory carbides and nitrides*, Noyes Publication, 1996.
- [7] B. Du, X. Wang, Z. Zou, Microstructure and tribological behavior of laser in situ synthesized TiC-reinforced Fe-based composite coatings, *Tribology Letters*, Vol. 43, No. 3, pp. 295-301, 2011.
- [8] S.R. Shatynski, The thermochemistry of transition metal carbides, *Oxidation of Metals*, Vol. 13, No. 2, pp. 105-118, 1979.
- [9] X.H. Wang, S.L. Song, Z.D. Zou, S.Y. Qu, Fabricating TiC particles reinforced Fe-based