

# بررسی ریزساختار و سختی فولاد منگنزی با ایجاد لایه حاوی ذرات WC توسط فرآیند جوشکاری GTAW

امین قائدرحمتی

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

رضا درخشنده حقیقی

گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

مهرداد کریمی

گروه مهندسی مواد، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

(دریافت مقاله: ۹۶/۰۵/۰۷ - پذیرش مقاله: ۹۷/۰۶/۱۱)

## چکیده

در این پژوهش ایجاد روکش کامپوزیتی حاوی ذرات کاربید تنگستن بر سطح فولاد منگنزی هادفیلد با به کارگیری فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز بررسی شده است. بدین منظور پودر ذرات کاربید تنگستن بر سطح فولاد منگنزی پیش نشانی شده و با تغییر شدت جریان، فرآیند ذوب سطحی کاربید با فلز پایه انجام شد. مطالعه ریزساختار پوشش ایجاد شده توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) همراه با آنالیز نقطه‌ای و بررسی‌های فاز شناسی لایه سخت ذرات کاربیدی توسط پراش اشعه ایکس (XRD) انجام گرفت. سختی روکش در آزمون ریز سختی سنجی ارزیابی شد. نتایج حاصله از پراش سنجی پرتو X، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکرو سختی در نمونه فولاد منگنزی روکش شده بیانگر ساختار دندردیتی روکش حاوی فازهای WC و CW<sub>3</sub> تقویت کننده‌ی کاربید تنگستن را دارا می‌باشد که می‌تواند باعث بهبود سختی و رفتار سایشی پوشش مذکور شود. نتایج آزمون ریز سختی سنجی نشان دهنده‌ی افزایش ۳ برابری سختی نمونه روکش شده (HV650) نسبت به نمونه بدون روکش (HV 200) می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری GTAW، فولاد منگنزی، کاربید تنگستن، سایش، لایه سخت.

## Investigating Microstructure and Hardness of Manganese Steel by Creating a Layer Containing WC Particles through GTAW Process

Amin Ghaedrahmati

Young Researchers and Elite Club, Bandar Abbas Branch, Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran

Reza Derakhshande

Department of Materials Science and Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Mehrdad Karimi

Department of Materials Science and Engineering, Bandar Abbas Branch, Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran

(Received 29 July 2017, accepted 2 September 2018)

### Abstract

In this research, creation of the composite coating containing tungsten carbide particles on the surface of Hadfield manganese steel by using gas tungsten arc welding (GTAW) process has been investigated. For this purpose, tungsten carbide particles were prefigured on the surface of manganese steel. By changing welding current, surface melting of carbides and the base metal occurs. The microstructure of coating and phase analysis of hard layer was investigated through different characterization techniques such as light microscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM), and X-ray Diffraction (XRD). The micro-hardness of the coating was evaluated. According to the characterization results, the created coating includes WC and CW<sub>3</sub> amplifier of tungsten in a dendritic microstructure. Such carbides can significantly improve the hardness and wear behavior of the coating. The micro-hardness of the coated sample (650 HV) is more than 3 times the uncoated one (200HV).

**Keywords:** Gas tungsten arc welding (GTAW), Manganese steel, tungsten carbide, Wear, Hard layer.

**E-mail of Corresponding author:** derakhshande@shirazu.ac.ir.

## مقدمه

کروی را با توزیع های مختلف بسته به پارامترهای لیزر اعمال شده مشاهده کردند.

فولاد آستنیتی منگنز دار هادفیلد کاربرد گسترده ای دارد و اصلاحات جزئی در ترکیب شیمیایی و عملیات حرارتی آن انجام شده است. این فولاد در استاندارد ASTM A128 [۸] دارای ترکیب شیمیایی ۱ تا ۱/۴ درصد کربن و ۱۰ تا ۱۴ درصد منگنز است. فولاد منگنزی معمولاً آستنیت می شود تا کاربیدهای آن حل شوند و آستنیت همگنی به دست بیاید. ساختار آستنیتی با کوئچ در آب از دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد حفظ می شود؛ بنابراین این آلیاژ یک آلیاژ پایدار و تک فاز آستنیتی است [۹]. در آزمون های سایش خراشان کندگی، فولاد هادفیلد عملکرد بهتری نسبت به فولادهای آلیاژی کار شده، فولادهای آلیاژی ریختگی، فولادهای زنگ نزن، فولادهای ابزار یا چدن سفید پر کروم دارد [۱۰].

سختی سطح این فولادها پس از عملیات حرارتی در حدود ۲۲۰ برینل می باشد که در اثر کار سختی حین کار به حدود ۵۵۰ برینل افزایش می یابد و موجب مقاومت به سایش بسیار مناسب آن ها می شود. بنابراین در صورت عدم وجود کار سختی تفاوت چندانی بین این نوع فولادها و فولادهای با کربن متوسط وجود ندارد [۱۱].

کار سختی فولاد منگنزی تدریجی به صورت لایه لایه است. ابتدا تمامی آستنیت موجود در سطحی ترین قسمت قطعه به مارتنزیت تبدیل می شود و پس از بین رفتن این قسمت، تمامی آستنیت سطح زیرین به مارتنزیت تبدیل می شود. نکته قابل توجه در این بحث سرعت استحاله به مارتنزیت است که از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد و با توجه به سختی پایین این فولادها چنانچه قبل از پایان استحاله سایش بسیار شدیدی رخ دهد، امکان از بین رفتن قطعه وجود دارد [۱۲، ۱۳].

در این پژوهش جهت جلوگیری از تخریب قطعات ناشی از سایش شدید در ابتدای سرویس دهی از روش جوشکاری GTAW به منظور تشکیل لایه سخت حاوی

یکی از روش های متداول جهت افزایش مقاومت به سایش خراشان استفاده از فرآیند عملیات سطحی با استفاده از جوشکاری می باشد [۱]. روش های عملیات سطحی با جوشکاری به دسته های ۱- آلیاژسازی سطحی ۲- ذوب سطحی ۳- کامپوزیت سازی سطحی تقسیم بندی می شوند [۲، ۳]. در روش کامپوزیت سازی از ذرات سرامیکی جهت ایجاد لایه مقاوم به سایش استفاده می شود ذرات مانند  $Al_2O_3, SiC, TiC$  تاکنون برای ایجاد لایه کامپوزیتی بر روی سطح فولاد با استفاده از روش لیزر و پلاسما استفاده شده است [۳]. در سال های اخیر آلیاژسازی سطحی با ایجاد لایه مرکب سطحی با استفاده از فرآیندهای جوشکاری نظیر جوشکاری قوسی تنگستن-گاز مورد توجه قرار گرفته است. ویژگی های روش GTAW<sup>۱</sup> عبارت اند از ضخامت زیاد پوشش، نرخ رسوب گذاری بالا، چسبندگی خوب پوشش به زیر لایه به دلیل برقراری پیوندهای متالورژیکی و همچنین، سهولت مراحل تولید که سبب گستردگی کاربرد آن برای پوشش دهی قطعات شده است. این روش نسبتاً ارزان بوده و در اغلب کارگاه های جوشکاری دسترس است [۴]. در این روش عناصر آلیاژی همچون کرم، کربن کبالت و مولیبدن یا ذرات سخت سرامیکی نظیر  $Al_2O_3, SiC, B_4C, WC$  به حوضچه مذاب افزوده می شوند تا لایه های سطحی آلیاژی و یا کامپوزیتی سخت ایجاد کنند [۵].

اولوتان و همکاران [۶] آلیاژسازی سطحی به روش GTAW بر روی فولاد AISI 4140 را با مخلوطی از پودرهای SiC و گرافیت انجام دادند. نتیجه به دست آمده نشان داد که سختی و مقاومت در برابر سایش لایه آلیاژی افزایش یافته بود.

امامیان و همکاران [۷] پوشش دهی لیزری پودرهای TiC، گرافیت و آهن را بر روی فولاد کربن متوسط AISI 1030 به عنوان بستر بررسی کردند. آن ها ذرات TiC دندرتی یا

<sup>۱</sup> Gas Tungsten Arc Welding

حرارت ورودی برای ذوب سطحی با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود که در آن V ولتاژ، I جریان و S سرعت جوشکاری است.

$$\text{Heat Input} = \eta (V \cdot I / S)$$

رابطه ۱ حرارت ورودی

در فرآیند جوشکاری TIG مقدار  $\eta$  (ضریب بازده قوس) بین ۳۵ تا ۵۰ درصد متغیر بوده و معمولاً ۴۸ درصد در نظر گرفته می‌شود [۱۴]. بنابراین حرارت ورودی برای هر نمونه با توجه به پارامترهای مختلف محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. پس از ایجاد لایه با جوشکاری GTAW برای اطمینان از عدم وجود ترک سطح نمونه‌ها مورد ارزیابی سطحی قرار گرفت. ضخامت پوشش در این حالت بین ۱ الی ۲ میلی‌متر بود.

جدول ۲. پارامترهای فرایند رویه‌سازی

شدت جریان (A)	۹۰-۱۱۰
سرعت (mm/s)	۴-۵
ولتاژ (V)	۱۰-۲۰
نوع جریان	DCEN
نرخ دمش گاز آرگون (L/min)	۸

جدول ۳. میزان حرارت ورودی نمونه‌ها

نمونه	شدت جریان (A)	سرعت (mm/s)	حرارت ورودی (J/mm)
۱	۹۰	۵	۱۲۹/۶
۲	۱۰۰	۵	۱۵۳/۶
۳	۱۱۰	۵	۱۷۹/۵

پس از تهیه نمونه‌های متالوگرافی از مقاطع عرضی پوشش ایجاد شده و فرارگیری درمانت، به منظور بررسی ریزساختار پوشش، فصل مشترک و زیر لایه، نمونه‌های مانت شده توسط سنباده‌های ۸۰ تا ۲۵۰۰ سنباده کاری شدند و سپس عملیات پولیش کاری توسط پودر  $Al_2O_3$  انجام شد و در پایان توسط محلول نایتال ۵ درصد حکاکی شدند؛ و جهت

ذرات کاربید تنگستن بر روی سطح فولاد منگیزی A128 استفاده گردید؛ در این راستا تأثیر تغییر شدت جریان جوشکاری بر ساختار و سختی لایه کاربیدی ایجاد شده مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

#### مواد و روش تحقیق

فولاد منگیزی ASTM A128 Grade C [۸] به دلیل استفاده گسترده در صنایع سیمان و معادن در این پژوهش انتخاب شد. نمونه‌های فولاد منگیزی به صورت ریختگی تهیه شد. پس از انجام عملیات حرارتی آستنیت‌زد کردن در دمای ۱۰۵۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و نگهداری در این دما به مدت دو ساعت در آب کوئنچ انجام شد. نمونه‌های به ضخامت ۱۰ و قطر ۵۰ میلی‌متر با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد منگیزی برحسب درصد وزنی

C	Mn	Cr	S	P	Mo	Ni	Si	Ti
۱/۱	۱۳/۵	۱/۸	۰/۰۱۹	۰/۰۰۵	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۱

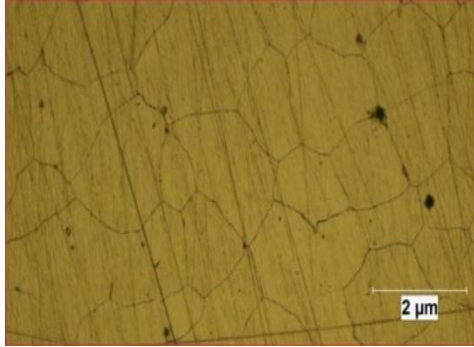
سطح نمونه‌ها از مواد روغنی و چرب تمیز شد و تا سنباده شماره ۳۲۰ سنباده زده شد تا آلودگی‌های سطحی آن برطرف شود. برای ایجاد لایه سطحی از پودر WC با ابعاد متوسط ۴۰ تا ۸۰ میکرون استفاده شد.

ثابت سازی ذرات با آغشته نمودن آن‌ها به پلی وینیل الکل<sup>۲</sup> (PVA) انجام شد. پس از خشک شدن کامل چسب قبل از شروع جوشکاری نمونه‌ها در خشک‌کن حرارتی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت پیش گرم شدند تا رطوبت نمونه حذف شود.

برای ذوب سطحی فولاد، از روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز استفاده شد. گاز محافظ مصرفی آرگون با خلوص ۹۹/۹۹٪، قطر الکتروود تنگستن ۲/۴ میلی‌متر و شکل نوک الکتروود مخروطی بود. مشخصات پارامترهای فرایند جوشکاری TIG در جدول ۲ ارائه شده است.

<sup>۲</sup> Poly Vinyl Alcohol

عملیات حرارتی شده حاوی دانه‌های آستنیت بدون حضور کاربیدها در مرز دانه و بیانگر حل شدن موفق کاربیدها می‌باشد و کاربیدهای حجیم و پراکنده در حالت ریختگی در ساختار زمینه حل گردیده است.



شکل ۱. ریزساختار فولاد منگنزی پس از محلول سازی و کوئنچ.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود ریزساختار کاملاً آستنیتی می‌باشد. وجود زمینه آستنیتی به دلیل حضور کربن و منگنز زیاد در ترکیب است. با افزایش منگنز در آلیاژهای Fe-Mn دمای شروع مارتنزیت به میزان بسیار زیادی کاهش می‌یابد به طوری که در آلیاژهای پر منگنز یک زمینه کاملاً آستنیتی را می‌توان مشاهده نمود [۱۵].

شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی نوری سطح مقطع نمونه‌های فولاد منگنزی پوشش داده شده با کاربید تنگستن را نشان می‌دهد همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود لایه کامپوزیتی ایجاد شده متراکم و باکیفیت نفوذ کامل لایه پیش نشانی شده با زیر لایه فولاد منگنزی به دست آمده است و همچنین سطح و فصل مشترک زیر لایه و پوشش خالی از ترک و حفره می‌باشد. شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی نوری را در سطح مقطع نمونه‌های فولاد منگنزی پوشش داده شده با WC بعد از روکش کاری با TIG و فرآوری شده با جریان حداکثر ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ آمپر در سرعت جوشکاری ۵ میلی‌متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در آمپر ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ یک لایه‌ی مخلوط از کامپوزیت فولادی تقویت شده با WC در سطح بالایی زیر لایه تشکیل شد.

مطالعات میکروسکوپی، از دستگاه میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۳</sup> SEM استفاده شد. میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی یا FESEM برای بررسی آنالیز ریزساختاری سطح و یا مقطع عرضی نمونه‌ها به کار رفت. تصویربرداری در حالت BSE (تصویربرداری الکترون برگشتی) انجام شد. آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس<sup>۴</sup> (EDS) برای تعیین ترکیب شیمیایی همراه با عمق لایه انجام شد.

فازهای مختلف موجود در لایه‌ی روکش کاربید تنگستن ایجاد شده بر روی فولاد منگنزی توسط XRD پراش سنج اشعه‌ی ایکس با پرتو  $CuK\alpha$  ( $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ ) به دست آمدند. دامنه‌ی روبش  $5^\circ$  تا  $120^\circ$  انتخاب شد. اندازه‌ی گام در هر بررسی  $0.015^\circ/\text{min}$  در نظر گرفته شد. الگوهای XRD به کمک نرم‌افزار Phillip's X'Pert High Score بررسی و آنالیز شدند.

جهت بررسی تغییرات سختی در نواحی پوشش، فصل مشترک و زیر لایه سختی از سطح نمونه‌ها توسط دستگاه ریز سختی سنج ویکرز با نیروی ۱۰ کیلوگرم بر طبق استاندارد ASTM E92(2016) انجام شد.

پروفیل سختی از سطح به طرف فلز پایه و در مقطع عرضی روکش توسط ریز سختی سنجی و با فرورونده هرم الماسه ویکرز با بار اعمالی ۵ کیلوگرم در مدت زمان اعمال ۱۵-۱۰ ثانیه به دست آمد.

## نتایج و بحث

بررسی ریزساختار

شکل ۱ تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار فولاد منگنزی مطابق با استاندارد ASTM A128 Grade C با ترکیب شیمیایی ۱/۱ درصد کربن، ۱۳/۵ درصد منگنز و ۱/۸ درصد کروم بعد عملیات حرارتی آستنیت در محدوده دمایی ۱۱۰۰ - ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت و سپس کوئنچ شده در آب را نشان می‌دهد. ریزساختار

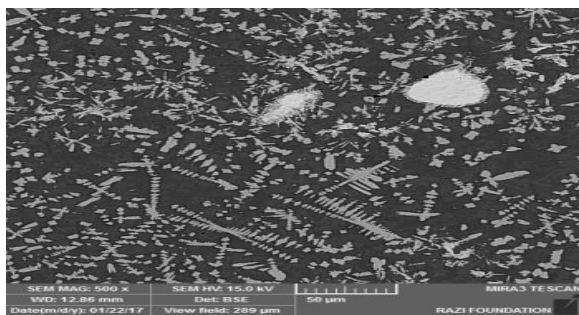
<sup>3</sup> Scanning Electron Microscope

<sup>4</sup> Energy-dispersive X-ray spectroscopy

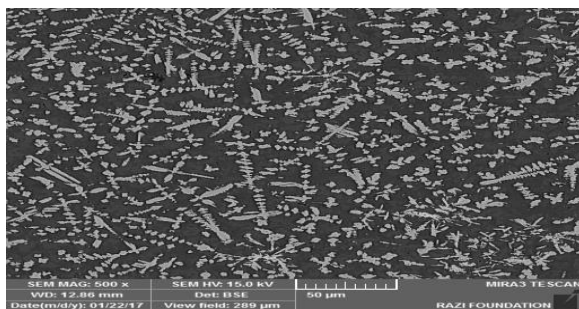
مذاب توزیع می‌گردند. به همین علت کنترل حرارت ورودی در زمان فرآیند جوشکاری به‌منظور جلوگیری از ذوب شدن دانه‌های کاربیدی ضروری است. در صورتی که دانه‌های کاربید تنگستن در داخل زمینه فولادی حل شوند، تبدیل به کاربیدهای تنگستن نرم‌تری خواهند شد که باعث کاهش مقاومت به سایش لایه رسوب‌کرده می‌شوند [۱۷].

### ریزساختار میکروسکوپی SEM

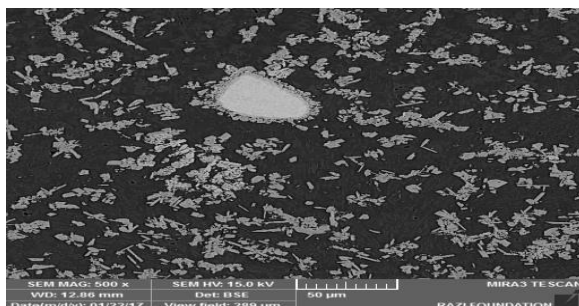
شکل ۳ تصاویر SEM را در سطح پوشش نمونه‌های فولاد منگنزی روکش کاری شده با TIG، پوشش داده شده با WC و فرآوری شده با جریان جوشکاری ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ آمپر و سرعت ۵ میلی‌متر بر ثانیه را نشان می‌دهد.



الف) نمونه آمپر ۹۰



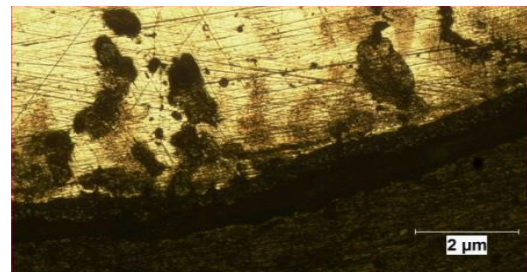
ب) نمونه آمپر ۱۰۰



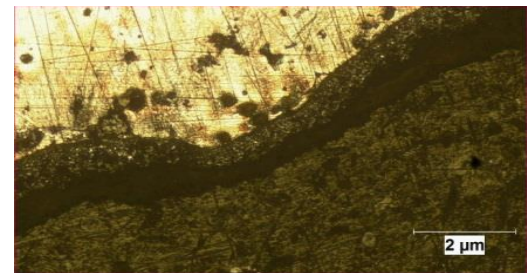
ج) نمونه آمپر ۱۱۰

شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی SEM ریزساختار سطح پوشش WC.

واکنش‌های فصل مشترک در طول رسوب MMC<sup>۵</sup>، بین کاربیدها و زمینه رخ می‌دهند و کاربیدها را به زمینه وصل می‌کنند که می‌توانند بر رفتار مکانیکی پوشش سختی گردانی سطحی تأثیر بگذارند. نتایج تحقیقات نشان داده است که ورود بیشتر حرارت به درون جوش منجر به انحلال بیشتر کاربیدها می‌شود. فصل مشترک با ذوب توسط نفوذ پسین و یا نفوذ خالص بدون ذوب کاربید تشکیل می‌شود [۱۶].



الف) نمونه آمپر



ب) نمونه آمپر

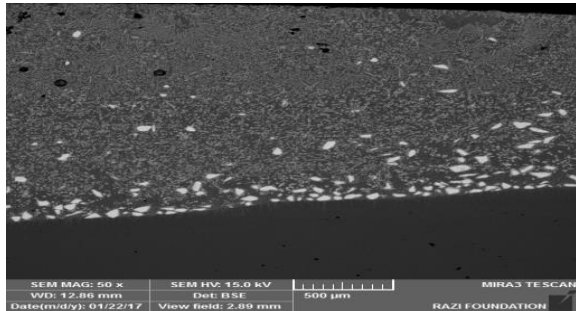


ج) نمونه آمپر ۱۱۰

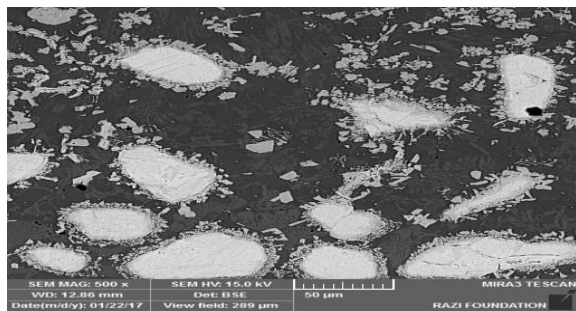
شکل ۲. ریزساختار سطح مقطع نمونه‌های پوشش داده شده با WC. برخلاف سایر مواد سخت پوششی که فازهای سخت مناسب آن‌ها در حین فرآیند انجماد حوضچه مذاب تشکیل می‌دهند، دانه‌های کامپوزیتی کاربید تنگستن به هنگام فرآیند جوشکاری از داخل فلز پرکننده روی حوضچه

<sup>5</sup> Metal Matrix Composite

کامل داخل زیر لایه‌ی فولادی ذوب می‌شوند و جوانه‌زنی ذرات WC شروع می‌شود. نرخ سرمایش متناظر آهسته، منجر به رشد ساختار دندریتی WC به هنگام انجماد درون حوضچه‌ی ذوب می‌شود.



الف) تصویر مقطع نمونه آمپر ۱۱۰



ب) تصویر ریزساختار پوشش نمونه آمپر ۱۱۰

شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی SEM

### آنالیز FESEM

شکل ۵ تصویر FESEM بزرگنمایی شده و گرفته شده در حالت BSE و متناظر با نقشه‌ی عنصری EDS منطقه‌ی خاکستری لایه‌ی روکش WC را نشان می‌دهد. تصویر بزرگنمایی شده نشان می‌دهد که این منطقه‌ی تیره شامل ذرات سفید خاکستری شدیداً متراکم و چگال و منطقه‌ی زمینه‌ی سیاه نسبتاً کم است. از نقشه‌ی EDS واضح است که این ذرات سفید، غنی از تنگستن و منگنز هستند اما منطقه‌ی زمینه‌ی سیاه، غنی از آهن است. در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که این ذرات سفید، تقویت شده با WC در زمینه‌ی آهن زیر لایه هستند.

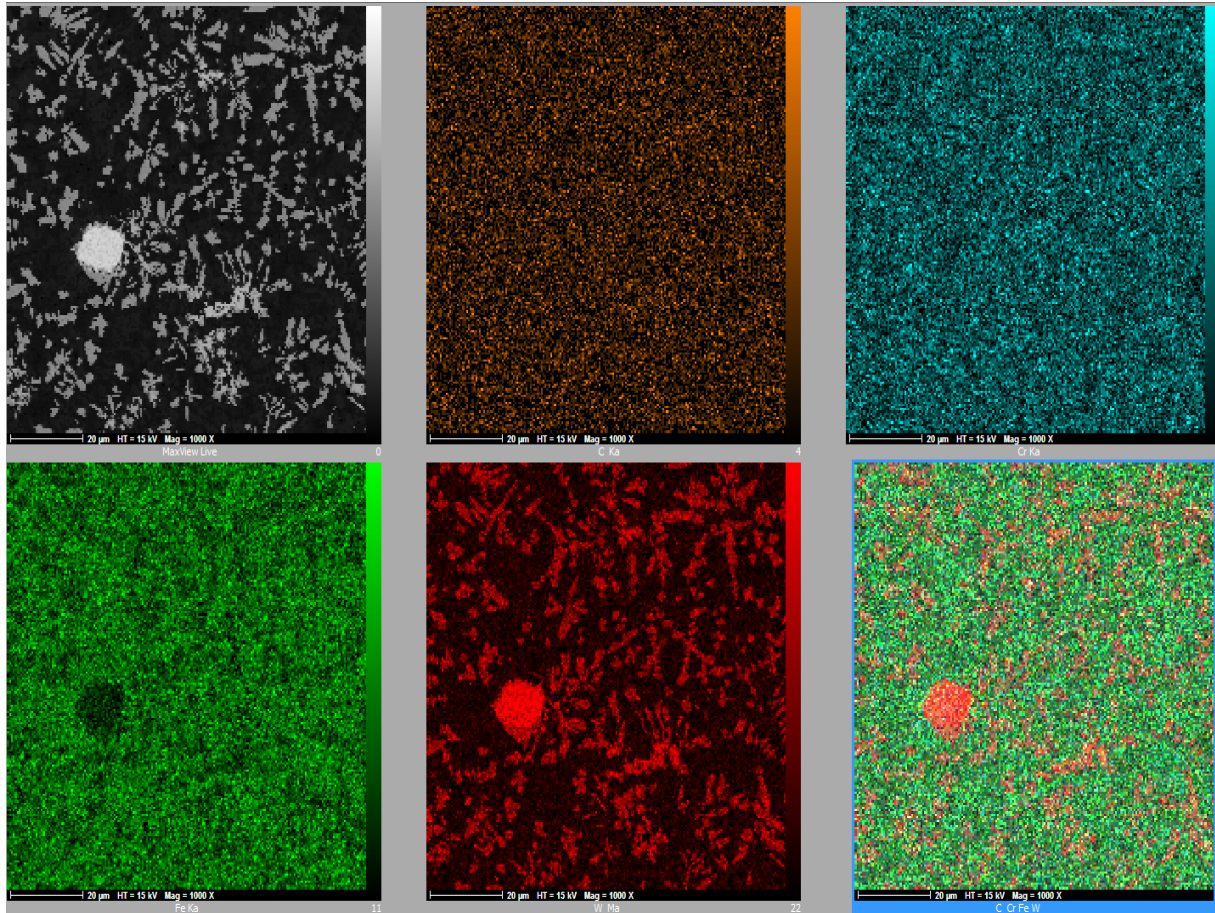
همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود در جریان پایین یک‌لایه WC بر روی زیر لایه‌ی فولاد منگنزی تشکیل شده و دارای پراکندگی نسبتاً خوب می‌باشد. در نمونه ۹۰ آمپر همراه با تشکیل لایه‌ی WC یک منطقه‌ی آلیاژی حاوی مخلوطی از WC و زیر لایه‌ی فولادی زیر لایه‌ی WC تشکیل شد. در جریان جوشکاری ۹۰ آمپر، ورودی حرارت کل بر روی قطعه کار مناسب بوده در نتیجه در جریان پایین و سرعت ۵ میلی‌متر بر ثانیه فقط پودر WC ذوب می‌شود که بعد از آن، انجماد یک‌لایه‌ی روکش با رقت ناچیز آهن از ماده‌ی پایه را تولید می‌کند.

علاوه بر این، در نمونه ۱۰۰ آمپر لایه‌ی WC ذوب شده، حرارت ورودی کافی بوده تا ذرات WC را درون حوضچه‌ی ذوب توزیع کند؛ و در نمونه ۱۰۰ و ۱۱۰ آمپر به خاطر ورودی حرارت بالاتر، عمق ذوب افزایش می‌یابد که باعث ذوب لایه‌ی WC و هم‌چنین لایه‌ی بالایی زیر لایه می‌شود. در نتیجه مقداری از ذرات WC درون زیر لایه‌ی فولادی نفوذ می‌کنند و یک پوشش نوع کامپوزیت زمینه‌ی فلزی (MMC) حاوی مخلوطی از WC و فولاد را تولید می‌کنند.

شکل ۴ تصاویر SEM را در مقطع عرضی نمونه‌ی روکش‌کاری شده با TIG و پوشش داده شده با کاربرد تنگستن و فرآوری شده با جریان حداکثر ۱۱۰ آمپر و سرعت ۵ میلی‌متر بر ثانیه نشان می‌دهد.

در شکل دیده می‌شود که WC داخل فولاد توزیع شده و یک‌لایه‌ی سفیدرنگ را در منطقه‌ی بالایی زیر لایه تشکیل داده است. روکش‌کاری با TIG در تنظیمات بالاتر جریان (۱۱۰ آمپر) مقدار حرارت بیشتری را برای زیر لایه تأمین می‌کند و منجر به عمق حوضچه‌ی ذوب بیشتر و عرض بیشتر نسبت به نمونه‌های با جریان ۹۰ و ۱۰۰ آمپر می‌شود. هم‌چنین به علت مقدار بالای حرارت، ذرات WC به‌طور



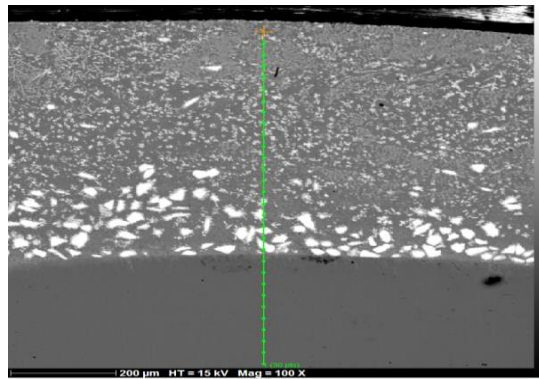


شکل ۵. نقشه برداری عنصری EDS از لایه پوشش WC.

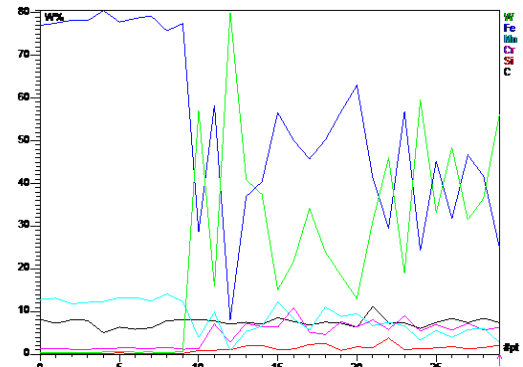
آنالیز EDS متناظر نشان می‌دهد که درصد WC به‌طور منطقی در این لایه زیاد است. ذوب سطحی کاربید تنگستن بر روی زیر لایه‌ی فولادی پوشش داده‌شده با WC، فقط ذوب لایه‌ی پودری WC و لایه‌ی بسیار نازک زیر لایه‌ی فولادی رخمی‌دهد. این انرژی حرارت ورودی در جریان جوشکاری ۱۱۰ آمپر، برای ذوب لایه‌ی زیر لایه‌ی فولادی و انحلال پودر WC درون آن و تسریع شار هدایتی فلز ذوب‌شده، کافی می‌باشد.

نتایج آنالیز EDS از ناحیه مشخص‌شده (شکل ۶ الف) در ۳۰ نقطه آنالیز شده نشان می‌دهد که این مناطق از کربن، سیلیسیوم، کروم، منگنز، آهن و تنگستن غنی هستند. شکل ۶ ج) نقطه ۹-۱ مرز بین لایه سطحی با فلز پایه را نشان می‌دهد.

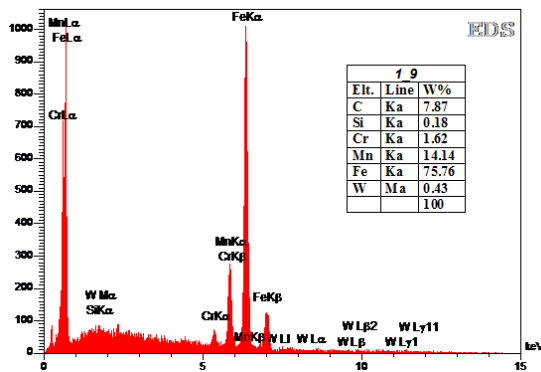
شکل ۶ تصویر FESEM بزرگنمایی شده و طیف EDS مربوطه را در منطقه‌ی علامت‌دار تصویر SEM را نشان می‌دهد. از این تصاویر مشخص است که لایه‌ی آلیاژی روکش عمدتاً شامل ساختار دندریتی سفید WC و زمینه‌ی فولادی تیره است. در جریان (۱۱۰ آمپر) دمای بالای حوضچه‌ی ذوب و توزیع ذرات WC به‌طور یکنواخت درون زمینه‌ی فولادی می‌شود. به علت مقدار بالای ورودی حرارت و نرخ سرمایش آهسته‌ی متناظر، ذرات WC به‌طور کامل درون زمینه‌ی فولادی توزیع می‌شوند و در هنگام انجماد، جوانه‌زنی ذرات WC شروع می‌شود و به‌صورت ساختار دندریتی درون حوضچه‌ی ذوب رشد می‌کنند.



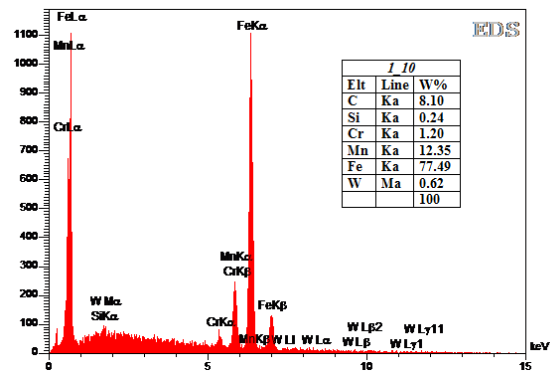
الف



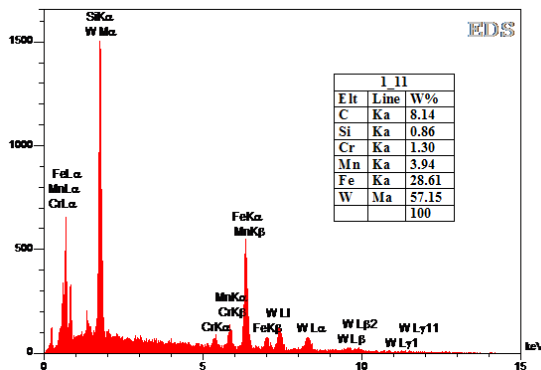
ب



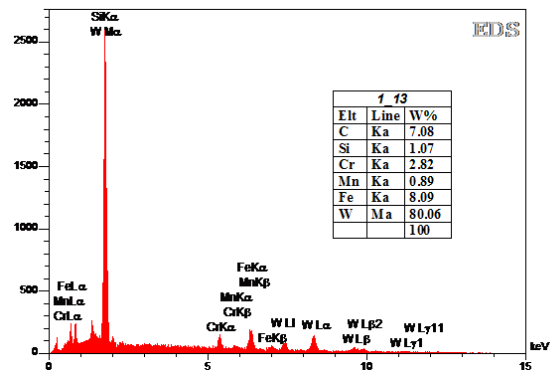
ج



د



ه



و

شکل ۶. میکرو گراف FESEM و طیف EDS از لایه روکش کاربید تنگستن.

تیره، در لایه روکش تنگستن کاهش می‌یابد با ورودی حرارت نسبتاً مناسب، ذوب نسبی زیر لایه نیز رخ می‌دهد و WC با زیر لایه مخلوط می‌شود و منطقه‌ی نوع MMC بارنگ سفید را تولید می‌کند.

آنالیز EDS لایه روکش در نقاط ۱۱-۱ تا ۱۸-۱ (شکل ۶) نشان می‌دهد که این مناطق از تنگستن غنی می‌باشند و مقادیر مختلف کربن و تنگستن در لایه روکش موجود

در آنالیز EDS این نقطه آنالیز مشابه فلز پایه فولاد منگنزی مورد استفاده در این پژوهش با مقادیر تنگستن و افزایش درصد کربن که نشان از نفوذ کاربید تنگستن ناشی از ذوب سطحی در زیر لایه فولادی دارد.

شکل ۶ (د) آنالیز لایه‌مرزی نشان از افزایش جزئی میزان کربن و تنگستن می‌باشد. آنالیز EDS نشان می‌دهد که درصد آهن و اجزای تشکیل‌دهنده‌ی دیگر فولاد در لایه‌ی



نشان می‌دهد. از شکل‌ها مشخص است که در نمونه‌های با جریان ۱۰۰ و ۱۱۰ آمپر، شدت WC بیشتر است. بررسی دقیق توسط نرم‌افزار X'Pert در نمونه‌ها نشان می‌دهد پیک CW<sub>3</sub>WC و Fe<sub>3</sub>C در روکش ایجاد شده وجود دارد.

الگوی پراش اشعه ایکس نشان می‌دهد فازهای WC، CW<sub>3</sub> و Fe<sub>3</sub>C فازهای اصلی تشکیل‌دهنده روکش هستند و احتمال حضور کاربیدهای دیگری در ساختار وجود دارد. ولی از آنجایی که روش پراش پرتو ایکس توانایی آشکارسازی فازهای با مقادیر کمتر از ۵ درصد را ندارد وجود این فازها با استفاده از این روش آنالیز قابل‌ردیابی نمی‌باشد [۱۸].

#### نتایج سختی سنجی

نتایج حاصل از ریز سختی روکش ایجاد شده در طی این پژوهش در جدول ۴ و شکل ۸ ارائه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود روکش کامپوزیتی تشکیل شده بر سطح به دلیل حضور فاز تقویت‌کننده کاربید تنگستن ورود کربن اضافی به سطح که این موضوع در طیف‌های EDS نمونه‌ها نیز قابل مشاهده می‌باشد تشکیل لایه‌ی WC با رقت کم زیر لایه‌ی فولادی و یا MMC ذرات WC در زمینه‌ی فولادی از سختی بسیار بالای (مقادیر بالاتر از ۶۵۰ ویکرز) برخوردار هستند. این شرایط می‌تواند مقاومت بالا در برابر سایش را در پی داشته باشد. سختی روکش حاوی ذرات کاربیدی در مقایسه با سختی ۲۰۰ ویکرز فولاد منگنزی بسیار بالاتر بوده و نشان از تقویت مقاومت به سایش سطحی فولاد منگنزی می‌باشد.

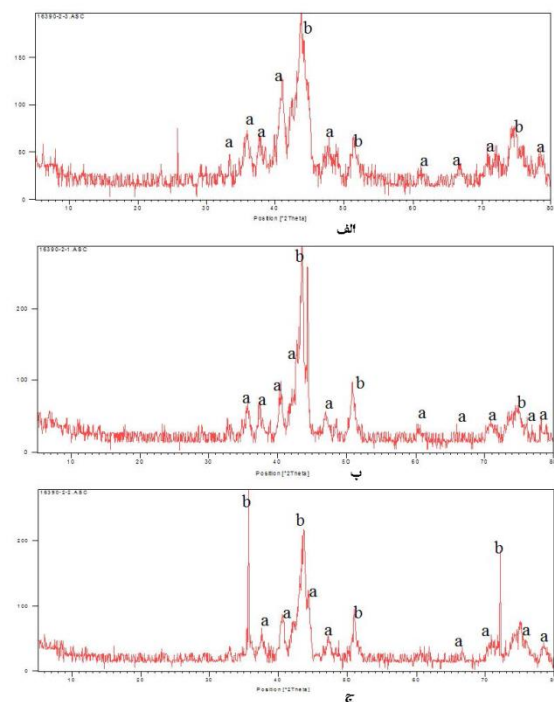
جدول ۴. نتایج سختی سنجی روکش کاربید تنگستن

سختی ویکرز (HV)		نمونه
۶۳۳	۶۱۳	نمونه روکش WC جریان ۹۰ آمپر
۶۵۵	۶۴۴	نمونه روکش WC جریان ۱۰۰ آمپر
۶۲۳	۶۲۰	نمونه روکش WC جریان ۱۱۰ آمپر

می‌باشد. آنالیز EDS نشان می‌دهد که در لایه روکش درصد تنگستن و کربن (مقدار WC) بالا است و با افزایش فاصله از فلز پایه مقدار WC در لایه‌ی کامپوزیتی فولاد-WC تغییر می‌کند.

#### آنالیز XRD

شکل‌های ۷ آنالیز پراش اشعه ایکس نمونه‌های روکش شده را در شرایط جریان مختلف نشان می‌دهند. از این نمودارها مشخص است که پیک‌های WC (با a نشان داده شده) و فولاد منگنزی (با b نشان داده شده) در نمونه‌های پوشش داده شده با TIG تحت شرایط جوشکاری مختلف وجود دارند. هیچ پیکی از ترکیب‌های دیگر در نمودار دیده نشد که بیانگر این است که هیچ واکنشی بین WC و فولاد منگنزی رخ نداده است.



شکل ۷. طیف XRD سطح فولاد منگنزی روکش شده.

الف) نمونه ۹۰ آمپر (ب) نمونه ۱۰۰ آمپر (ج) نمونه ۱۱۰ آمپر

شکل ۷ به‌طور مشابه طیف XRD سطح فولاد منگنزی روکش شده با TIG با جریان‌های ۱۰۰ و ۱۱۰ آمپر را

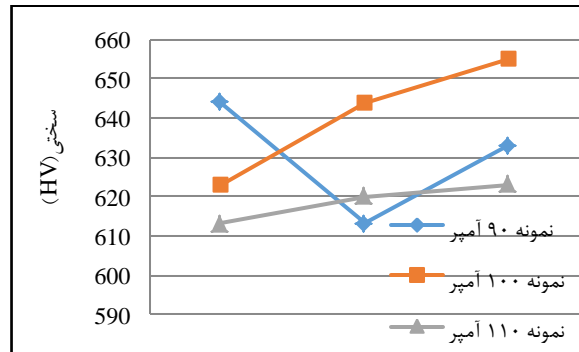
### نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش جوشکاری GTAW به منظور تشکیل رویه سختی و ایجاد لایه سخت حاوی ذرات کاربید تنگستن بر روی سطح فولاد منگنزی A128 استفاده گردید و ریزساختار، سختی مورد ارزیابی قرار گرفت و موارد زیر را می‌توان نتیجه‌گیری کرد:

۱. از آزمایش‌های انجام شده مشخص می‌باشد که پوشش حاوی ذرات کاربیدی WC به‌طور موفقیت‌آمیز بر روی فولاد منگنزی ایجاد شده است. لایه کامپوزیتی ایجاد شده متراکم و باکیفیت نفوذ کامل لایه پیش‌نشانی شده با زیر لایه فولاد منگنزی می‌باشد همچنین توزیع ذرات کاربیدی پوشش در نمونه‌ها یکنواخت به دست آمد.
۲. از آنالیز FESEM مشخص است که انواع مختلفی از ساختارهای WC دندریتی و کروی شکل حاصل شدند؛ و آنالیز EDS نشان داد که در لایه روکش درصد تنگستن و کربن (مقدار WC) بالا است و با افزایش فاصله از فولاد منگنزی مقدار WC در لایه کامپوزیتی فولاد-WC تغییر می‌کند.
۳. الگوی پراش اشعه ایکس نشان داد فازهای WC، CW<sub>3</sub> و Fe<sub>3</sub>C فازهای اصلی تشکیل‌دهنده روکش هستند.
۴. نتایج میکرو سختی نشان داد تشکیل لایه WC با رقت کم زیر لایه فولادی و یا MMC ذرات WC در زمینه فولادی از سختی بسیار بالایی (مقادیر بالاتر از ۶۰۰ ویکرز) برخوردار هستند. این شرایط می‌تواند مقاومت بالا در برابر سایش را در پی داشته باشد. سختی روکش حاوی ذرات کاربیدی در مقایسه با سختی ۲۰۰ ویکرز فولاد منگنزی بسیار بالاتر بوده که تقریباً چند برابر سختی فولاد منگنزی است.

### مراجع

1. S.Buytoz and M. Ulutan, *In situ synthesis of SiC reinforced MMC surface on AISI 304 stainless steel by TIG surface alloying*. Surface and Coatings Technology, 200(12) (2006)3698-3704.



شکل ۸. مقایسه سختی نمونه‌های روکش‌کاری شده.

عمدتاً ساختار کامپوزیت زمینه‌ی فلزی سختی تقریباً یکنواختی را در سطح بالایی زیر لایه تولید می‌کنند توزیع یکنواخت WC در زمینه‌ی فولادی موجب میکرو سختی یکنواخت‌تر در لایه‌ی آلیاژی می‌شود؛ که عمده‌تاً به خاطر ساختار یکنواخت لایه‌ی سطحی (لایه‌ی WC + لایه‌ی MMC) است.

از آنالیز EDS ریزساختار مشخص است که در نمونه با جریان ۱۰۰ آمپر، با افزایش فاصله از مرز لایه فلز پایه درصد وزنی تنگستن افزایش می‌یابد که نشانگر این است غلظت WC لایه روکش افزایش می‌یابد. چون ذرات WC سخت دلیل اصلی سختی بالاتر پوشش هستند، می‌توان نتیجه گرفت که در جریان ۱۰۰ آمپر، مقدار میکرو سختی با افزایش درصد کربن و تنگستن افزایش می‌یابد.

و مقدار میکرو سختی در قسمت بالایی لایه‌ی روکش نسبتاً بالاتر است و با عمق از سطح کاهش می‌یابد و بعد از عمق مشخصی، ثابت و پایدار می‌شود. مقدار سختی (مقدار سختی زیر لایه فولادی) تقریباً به ۲۱۲ ویکرز می‌رسد و پایدار می‌شود. لازم به توضیح می‌باشد که دلیل نبود تجهیزات سختی سنجی بالاتر از مقادیر ۶۵۰ ویکرز مقادیر به‌دست‌آمده در جدول ۴ الزاماً حداکثر سختی لایه کامپوزیتی فولاد-WC نمی‌باشد.

12. B. Hutchinson, and N. Ridley, *On dislocation accumulation and work hardening in Hadfield steel*, Scripta Materialia, 55 (2006) 299-302 .
13. I. Karaman, H. Sehitoglu, A. J. Beaudoin et al., *Modeling the deformation behavior of Hadfield steel single and polycrystals due to twinning and slip*, Acta Materialia, 489(2000) 2031-2047 .
14. S. Mridha, A. Idriss, and T. Baker, *Incorporation of TiC particulates on AISI 4340 low alloy steel surfaces via tungsten inert gas arc melting*. In Advanced Materials Research. (2012) Trans Tech Publ.
15. Y. K. Lee, and C. S. Choi, *Driving Force for  $\gamma \rightarrow \epsilon$  Martensitic Transformation and Stacking Fault Energy of  $\gamma$  in Fe-Mn Binary System*, Metallurgical and Material Transaction A, 31(2000) 355-360.
16. C. Just, E. Badisch, and J. Wosik, *Influence of welding current on carbide/matrix interface properties in MMCs*. Journal of Materials Processing Technology, 210(2) (2010) 408-414 .
17. E. N. Gregory, *Selection Of Materials for Harfacing The Welding Institute , Weld Surfacing and Harfacing Cambridge*, Abington, (1980) 22-27.
18. R. Yang, and Z. Liu, *Study of in-situ Synthesis TiCp/Ti Composite Coating on Alloy Ti6Al4V by TIG Cladding*, 36 (2012) 349-354 .
2. B. Soner, and Mustafa, U., 2006, *In Situ Synthesis of SiC Reinforced MMC Surface on AISI 304 Stainless Steel by TIG Surface alloying*, Surface & Coatings Technology, 200, 3698-3704.
3. Wang Xibao, Wang Xiaofeng, shi Zhongquan, *The composite Fe- Ti-B-C Coating by PTA powder surfacing process*, surface & cotaing Technology 192 (2005) 257-262.
4. V. Udhayabanu, and K. R. Ravi, *Synthesis of in-situ NiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposite by Reactive Milling and Subsequent heat Treatment*, Intermetallics, 18,(2010) 353- 358 .
5. Y. C. Lin, H. M. Chen, *Analysis of Microstructure and Wear Performance of SiC Clad Layer on SKD61 Die Steel After Gas Tungsten Arc Welding*, Materials and Design, 47 (2013) 828-835.
6. M. Ulutan et al., *Microstructure and wear behavior of TIG surface-alloyed AISI 4140 steel*. Tribology Transactions, 54(1) (2010) 67-79.
7. A. Emamian, S. F. Corbin, and A. Khajepour, *The influence of combined laser parameters on in-situ formed TiC morphology during laser cladding*. Surface and Coatings Technology, 206(1) (2011) 124-131.
8. ASTM A 128-75A, *annual book of ASTM Standards, Part 2*, ASTM, Philadelphia, PA, (1979) 95 .
9. E. R. Hall, *ASM Technical Report No. C6-171*(1966) 15 .
10. D. E. Diesburg, and F. Borik, *Symposium on Materials for the Mining Industry, Climax Molybdenum Company*, Greenwich, CN(1974)15.
11. A. Goldberg, O. A. Ruano, and O. D. Sherby, *Development of ultrafine microstructures and superplasticity in Hadfield manganese steels*, Materials Science and Engineering: A, 150 2, (1992) 187-194.