

## ارزیابی ریز ساختار و خواص مکانیکی جوشهای اصطکاکی Ti6Al4V/(WC-Co)

مرتضی شمعانیان\*، احمد ساعتچی\*\*، مهدی صالحی\*\*، توماس نورث\*\*

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تورنتو، کانادا

(دریافت مقاله: ۸۰/۷/۲۵ - دریافت نسخه نهایی: ۸۱/۸/۷)

چکیده - در این تحقیق ریز ساختار و خواص مکانیکی جوشهای اصطکاکی Ti6Al4V/(WC-Co) مورد بررسی قرار گرفته است. ریز ساختار منطقه مجاور جوش در نمونه تیتانیومی در کلیه حالتها متشکل از فریت سوزنی و هم محور همراه با فاز بتا بوده و در کلیه نمونه ها مخلوط شدن مکانیکی و نفوذ متقابل عناصر در یکدیگر رخ داده است. استحکام شکست جوشهای اصطکاکی Ti6Al4V/(WC-Co) با افزایش درصد کبالت موجود در زمینه کاربرد تنگستن - کبالت به طور برجسته ای افزایش می یابد.

در طی آزمایش خمش جوشهای Ti6Al4V/WC-6 wt.%Co ترک در قسمت محیطی فصل مشترک اتصال جوانه زده و به سمت زمینه کاربرد تنگستن کبالت (WC-6 wt.%Co) رشد می کند، در حالی که در جوشهای Ti6Al4V/WC-11 wt.%Co و Ti6Al4V/WC-24 wt.%Co پس از جوانه زنی ترک در قسمت محیطی موضع اتصال، ترک در فصل مشترک رشد می کند.

واژگان کلیدی: جوشکاری اصطکاکی، آلیاژ Ti6Al4V، کاربرد تنگستن کبالت، ریز ساختار، استحکام شکست

## Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of Ti6Al4V/(WC-Co) Friction Welds

M. Shamanian, A. Saatchi, M. Salehi, T.H. North

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

Department of Metallurgy and Materials Engineering, University of Toronto, Canada

**Abstract:** The metallurgical and mechanical properties of Ti6Al4V/(WC-Co) friction welds have been investigated. The microstructure close to the bondline comprised a mixture of acicular and equiaxed  $\alpha$  plus  $\beta$  phases. The diffusion of elements in the welded specimens has been detected. The fracture strengths of Ti6Al4V/(WC-Co) friction welds markedly improved when the cobalt content in the (WC-Co) carbide substrate increased.

During the three-point bend testing of Ti6Al4V/WC-6 wt.%Co welds, the crack initiated at the bondline region at the periphery of the weld and then propagated into the brittle (WC-6 wt.%Co) substrate, while with the Ti6Al4V/WC-11 wt.%Co and Ti6Al4V/WC-24 wt.%Co welds, the crack initiated and propagated at the bondline region.

**Keywords:** Friction welding, Ti6Al4V alloy, Cemented tungsten carbide, Microstructure, Fracture strength

\*\* -استاد

\* -استادیار

سایش و ضریب اصطکاک نمونه های تیتانیومی شده است. اما پوششهای کاربید تنگستن-کبالت (WC-Co) ایجاد شده به روش اسپری گرمایی دارای مجموعه ای از تداخل، عدم یکنواختی ترکیب شیمیایی و عدم پیوند مستحکم بین ذرات است. همچنین ضخامت پوششهای مزبور به دلیل وجود تنشهای پسماند گرمایی در ضمن پوشش دادن محدود است. افزایش ضخامت پوشش باعث کاهش استحکام چسبندگی و ایجاد ترک در فصل مشترک پوشش - زمینه و یا در پوشش می شود [5].

در این پژوهش، با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی<sup>۲</sup> اتصالاتی بین آلیاژ Ti6Al4V و کاربید تنگستن-کبالت (WC-Co) ایجاد شده و ریز ساختار، خواص مکانیکی و مکانیزم شکست اتصالات با استفاده از روش خمش سه نقطه ای مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

## ۲- روش تحقیق

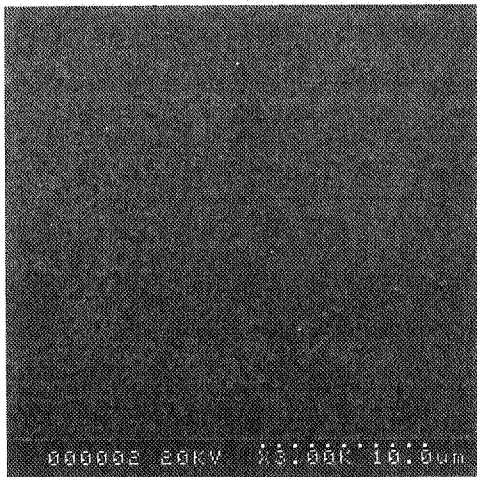
در این تحقیق از مفتول های تیتانیومی و کاربید تنگستن کبالت (WC-Co) با قطر ۱۲/mm استفاده شده است، به دلیل آن که در بین آلیاژهای تیتانیم، آلیاژ Ti6Al4V از همه بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد، لذا این نوع آلیاژ تیتانیم به عنوان یکی از قطعات جوشکاری اصطکاکی در نظر گرفته شده است. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول (۱) و ساختار میکروسکوپی آن در حالت آنیل شده در شکل (۱) نشان داده شده است. ساختار میکروسکوپی این آلیاژ متشکل از فاز تیتانیم آلفا در زمینه و شبکه ای تقریباً بسته از  $(\alpha+\beta)$  است.

از کاربید تنگستن کبالت (WC-Co) نیز سه نوع متداول آن حاوی ۶، ۱۱ و ۲۴ درصد وزنی کبالت، استفاده شده است. ساختار میکروسکوپی این سه نوع کاربید تنگستن-کبالت در شکل (۲) ارائه شده است. ضریب انبساط گرمایی آلیاژ Ti6Al4V و سه نوع کاربید تنگستن کبالت در جدول (۲) آورده شده است.

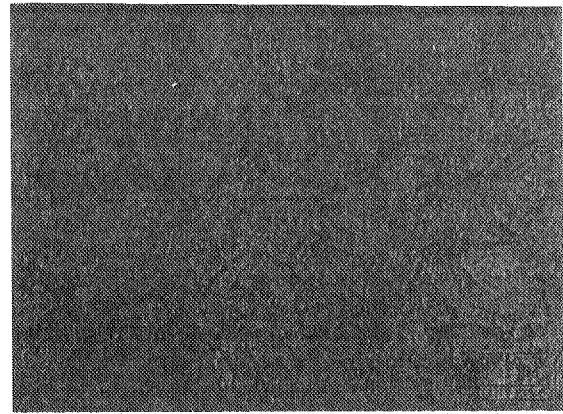
از شاخصهای مهم تیتانیم و آلیاژهای آن، نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت خوردگی عالی، مقاومت خوب در دمای بالا و زیست سازگاری با بافت های بدن است [۱] و بدین لحاظ از توانایی کاربردی بسیار بالایی در تکنولوژی هوا - فضا، صنایع شیمیایی، صنایع خودروسازی، صنایع دریایی و مهندسی پزشکی برخوردارند [۲].

از طرف دیگر، مقاومت ضعیف تیتانیم و آلیاژهای آن در تریبوسیستم که ناشی از حساسیت به چسبندگی و ضریب اصطکاک بالاست کاربرد آنها را در بسیاری از موارد محدود ساخته است [۳]. در رابطه با علت ضعف تیتانیم و آلیاژهای آن در تریبوسیستم ها دو عامل مهم را می توان ذکر کرد. یکی از این عوامل نسبت محوری (c/a) ساختار هگزاگونال متراکم (HCP) تیتانیم است. این نسبت برای تیتانیم برابر با ۱/۵۸۷ بوده و در مقایسه با نسبت محوری ساختار هگزاگونال ایده ال ( $c/a=1/133$ ) کمتر است. در نتیجه این امر، طی تماسهای لغزشی، در تیتانیم سیستمهای لغزشی بیشتری فعال شده و به دنبال آن تغییر شکل پلاستیکی بیشتر و تخریبهای چسبندگی را سبب می شوند. همچنین تیتانیم یک فلز فعال بوده که در شرایط معمولی دارای یک لایه اکسیدی نازک در سطح خود می باشد. اما این لایه سطحی در حین تماس با عضو مقابل شکسته شده و تماس فلزی شدید بین هر دو جزء برقرار می شوند. فعالیت شدید تیتانیم می تواند باعث ایجاد پیوندهایی در محل اتصالات شده و چسبندگی شدیدی را بوجود آورد، در ضمن حرکت، این اتصال در عمقی از تیتانیم گسیخته شده و سبب سایش شدید آن می شود [۴].

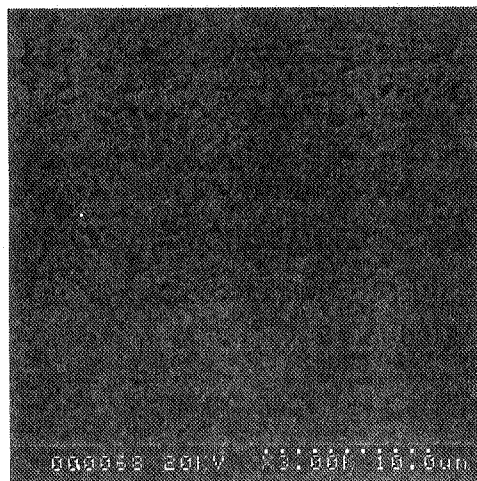
استفاده از روش اسپری گرمایی<sup>۱</sup> برای ایجاد پوششی از کاربید تنگستن-کبالت (WC-Co) بر سطح قطعات و بهبود رفتار تریبولوژیکی آنها امروزه مورد بررسی و کاربردهای وسیعی قرار گرفته است. از این روش در مورد تیتانیم و آلیاژهای آن نیز استفاده می شود و بطور مؤثری سبب کاهش



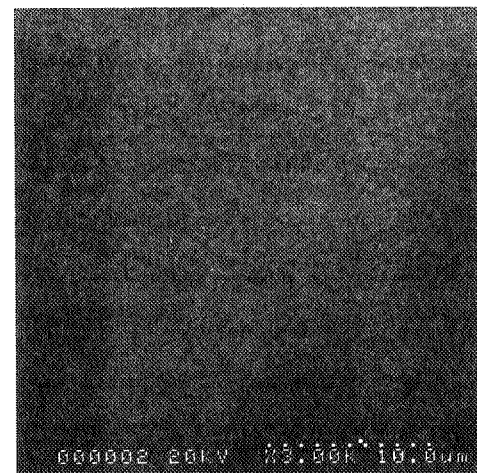
الف - WC-6wt.%Co



شکل ۱- ساختار میکروسکوپی آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V (بزرگنمایی ۵۰۰ برابر).



ب- WC-11 wt.%Co



ج- WC-24 wt.%Co

شکل ۲- ساختار میکروسکوپی کاربید تنگستن کبالت (بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر)

سطح نمونه های تیتانیومی قبل از جوشکاری عمود بر مقطع طولی ماشینکاری شده و انحراف نمونه ها از محور عمودی کمتر از ۱ درجه است. نمونه های کاربید تنگستن کبالت تهیه شده نیز دارای سطح مقطعی دایره ای شکل و مسطح و انحرافی کمتر از ۱ درجه نسبت به محور عمودی اند. نمونه های تیتانیومی تا سنباده ۱۲۰۰ سنباده زنی شده و هم نمونه های تیتانیومی و هم نمونه های کاربید تنگستن کبالت با استفاده از خمیر الماسی  $1 \mu\text{m}$  پولیش شده اند.

به منظور ارزیابی زبری سطوح<sup>۳</sup> نمونه ها از دستگاه زبری سنج استفاده شده و زبری سطوح در گستره  $0.13-0.1 \mu\text{m}$  بوده است. برای جوشکاری اصطکاکی از یک ماشین جوشکاری اصطکاکی مداوم استفاده شده است. فشار اصطکاکی ( $P_1$ ) در گستره ۱۰ تا ۲۵ MPa، زمان جوشکاری اصطکاکی در گستره ۲ تا ۴ ثانیه، فشار فورج ( $P_2$ ) در گستره ۵۰ تا ۳۰۰ MPa، زمان فورج ۵ ثانیه و سرعت چرخش ۱۵۰۰ دور بر دقیقه انتخاب شده اند. انتخاب پارامترهای بهینه جوشکاری بر اساس ایجاد اتصالی پیوسته در فصل مشترک، عدم شکست ذرات کاربید تنگستن و حصول خواص مکانیکی مطلوب به عمل آمده است [۶].

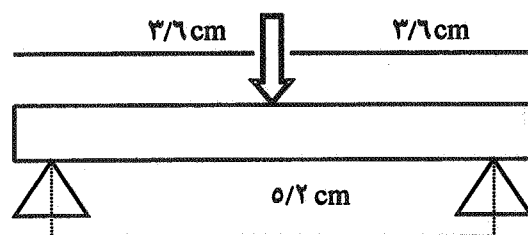
برای بررسی متالوگرافی نوری و میکروسکوپ الکترونی روبش (SEM)<sup>۴</sup>، ابتدا مقاطعی از جوش عمود بر موضع جوش با استفاده از دستگاه برش با تیغه الماسی تهیه شده است [۷].

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V.

نوع عنصر	Al	V	Fe	Si	C	N	H	Ti
درصد وزنی	۶/۱	۳/۹	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۱۵	بقیه

جدول ۲- ضریب انبساط گرمایی آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V و سه نوع کاربرد تنگستن کبالت [۱۵]

نوع آلیاژ	ضریب انبساط گرمایی ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{K}$ )
Ti6Al4V	۹/۰
WC-6wt.% Co	۴/۳
WC-11wt.% Co	۵/۲
WC-24wt.% Co	۶/۳



شکل ۳- طرح ساده ای از آزمایش خمش سه نقطه‌ای.

شده است. قبل از انجام آزمایش خمش، ماده سیلان کرده و بیرون زده از موضع اتصال (حدود ۴ میلی متر) توسط ماشینکاری برطرف شده است. پس از انجام آزمایش و اندازه‌گیری مقدار نیروی لازم برای شکست نمونه، به کمک معادله زیر می‌توان تنش لازم برای شکست نمونه را به دست آورد [۱۰]:

$$\sigma_f = \frac{8FL}{\pi d^3} \quad (1)$$

$\sigma_f$  (MPa): تنش لازم برای شکست نمونه

F (N): نیروی لازم برای شکست نمونه

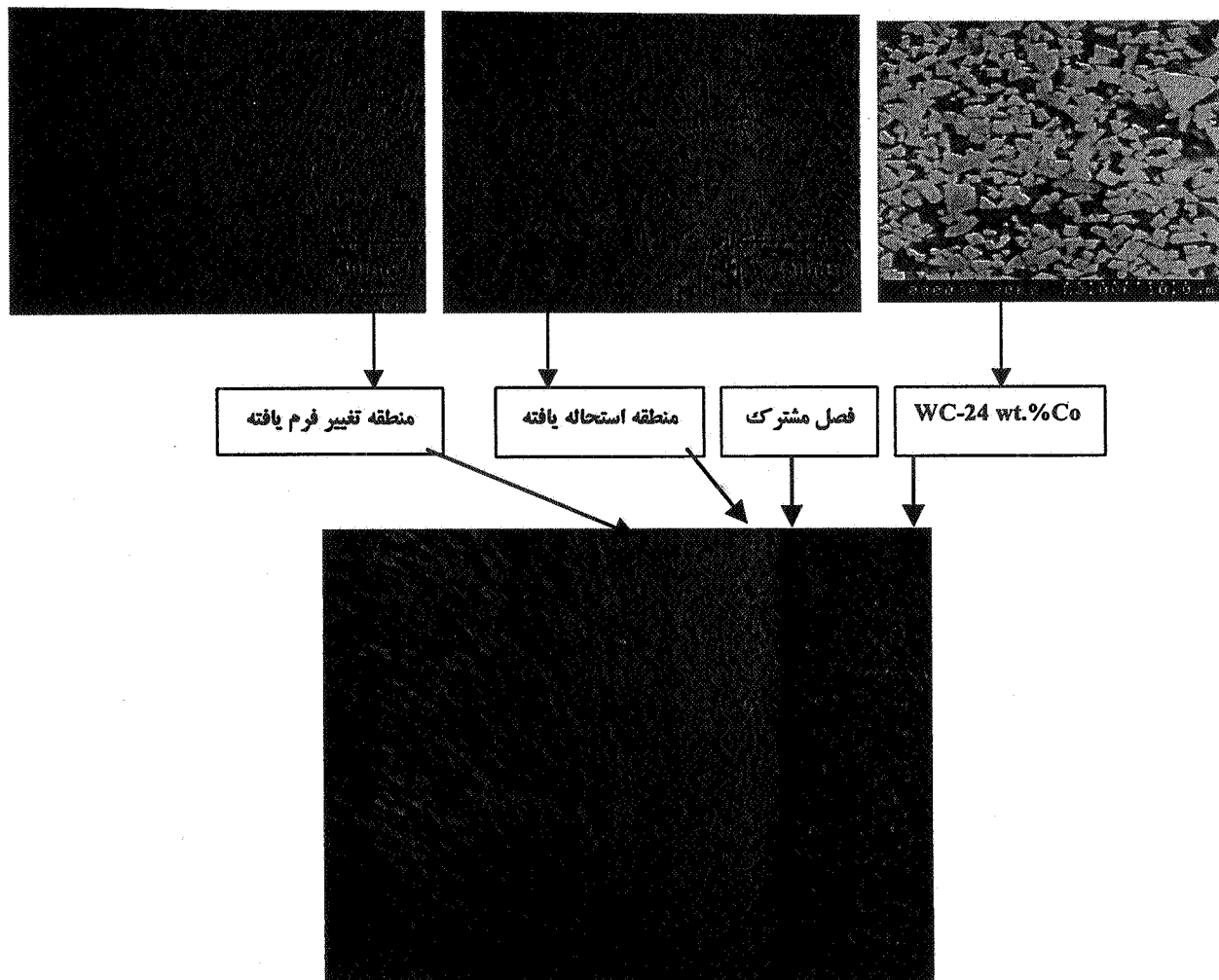
L (mm): فاصله بین دو تکیه گاه

d (mm): قطر نمونه

پس از آن نمونه های تهیه شده به روش استاندارد سنباده زنی و به کمک خمیرهای الماسی پولیش شده اند [۸]. عملیات پولیش کردن شامل استفاده از خمیر الماسی با اندازه ذرات ۱۵-۲۵  $\mu\text{m}$  برای پولیش اولیه، خمیر الماسی با اندازه ذرات ۴-۸  $\mu\text{m}$  برای پولیش ثانویه و خمیر الماسی با اندازه ذرات کمتر از ۲  $\mu\text{m}$  برای پولیش نهایی است. پس از پولیش کردن نمونه ها با آب شستشو و سپس استن زده شده اند.

برای اچ کردن قسمت تیتانیومی نمونه های جوشکاری شده از محلولی شامل ۱۰ میلی لیتر اسید هیدروفلوریک (HF)، ۵ میلی لیتر اسید نیتریک ( $\text{HNO}_3$ ) و ۸۵ میلی لیتر آب به مدت ۵ ثانیه استفاده شده است [۹]. محلول اچ کردن قسمت کاربرد تنگستن کبالت شامل ۱۰ گرم فروسیانید پتاسیم ( $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ )، ۵ گرم هیدروکسید سدیم (NaOH) و ۱۰۰ میلی لیتر آب و مدت زمان اچ کردن ۳ ثانیه است [۸]. بررسی متالوگرافی نوری و میکروسکوپ الکترونی در وسط موضع اتصال به عمل آمده است.

در این پژوهش به منظور ارزیابی خواص مکانیکی موضع اتصال از آزمایش خمش سه نقطه‌ای<sup>۹</sup> استفاده شده است. طرح ساده ای از این آزمایش در شکل (۳) نشان داده



شکل ۴- ریز ساختار موضع اتصال جوش اصطکاکی Ti6Al4V/WC-24 wt.%Co (مرکز اتصال).

می‌شود [۱۱]. به علاوه وجود ذرات سخت WC در سطح کاربرد تنگستن - کبالت می‌تواند باعث ایجاد پدیده خیش خوردن<sup>۷</sup> در سطح تیتانیم شود [۱۲]. تشکیل فصل مشترک صفحه ای در موضع اتصال بیانگر آن است که در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی یک لایه کاملاً خمیری<sup>۸</sup> در فصل مشترک ایجاد شده است. به دلیل آنکه آلیاژ تیتانیم دارای تنش سیلان کمتری نسبت به کاربرد تنگستن - کبالت می‌باشد، تقریباً تمامی تغییر شکل در تیتانیم رخ داده و لایه خمیری را در فصل مشترک ایجاد می‌کند. مشابه چنین رفتاری را می‌توان در جوشهای اصطکاکی فولاد زنگ نزن AISI 304 و کامپوزیت آلومینیم حاوی ذرات استحکام بخش SiC مشاهده کرد [۱۳].

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ریزساختار جوشهای اصطکاکی

##### Ti6Al4V/(WC-Co)

نمونه ای از ریزساختار میکروسکوپی جوشهای اصطکاکی آلیاژ تیتانیم با WC-24wt.%Co در شکل (۴) ارائه شده است. شکل (۴) نشان دهنده فصل مشترک صفحه ای<sup>۶</sup> در موضع اتصال می‌باشد. در ضمن جوشکاری اصطکاکی مواد غیرمشابه در لحظات اولیه تماس، یکسری اتصالاتی بین سطوح واقعی تماس تشکیل می‌شود. در حرکات بعدی این اتصالات در عمقی از فصل مشترک در ماده نرمتر (آلیاژ تیتانیم) شکسته شده و باعث انتقال ماده از یک سطح به سطح دیگر

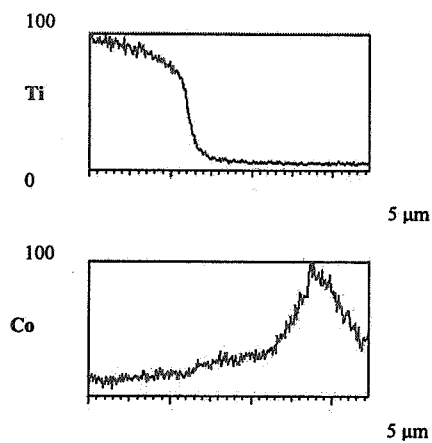
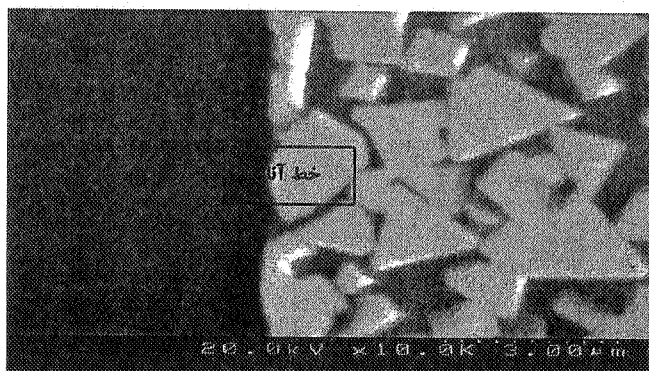
با توجه به شکل ۴ دیده می شود که در منطقه مجاور موضع اتصال (منطقه استحاله یافته<sup>۸</sup>) ساختار میکروسکوپی مجموعه ای از فریت سوزنی و هم محور همراه با فاز  $\beta$  است. بررسی نمودار سه تایی Ti-Al-V نشان می دهد که دمای استحاله  $\beta \leftrightarrow \alpha + \beta$  در حدود  $990^\circ\text{C}$  است. لذا پیش بینی می شود که در طی عملیات جوشکاری اصطکاکی آلیاژ Ti6Al4V با کاربرد تنگستن - کبالت دمای فصل مشترک بالاتر از  $990^\circ\text{C}$  بوده است و این گرما در موضع اتصال باعث شده تا نمونه تیتانیومی در منطقه تک فاز  $\beta$  قرار گرفته و سپس در اثر سرد شدن نمونه در هوا فاز  $\alpha$  سوزنی در مرز دانه های  $\beta$  جوانه زده و به داخل فاز  $\beta$  اولیه رشد کرده باشد. بررسیهای به عمل آمده در زمینه جوشکاری اصطکاکی Ti6Al4V/Ti6Al4V نشان می دهد که دما در فصل مشترک حدود  $1171^\circ\text{C}$  بوده و ساختار منطقه استحاله یافته نیز مجموعه ای از فریت سوزنی و هم محور همراه با فاز  $\beta$  است [۱۴].

در منطقه استحاله یافته پدیده تبلور مجدد نیز رخ داده است. بدون انجام تبلور مجدد منطقه استحاله یافته حاوی دانه های  $\beta$  اولیه کشیده شده به موازات فصل مشترک اتصال خواهد بود، در حالی که ساختار دانه های  $\beta$  اولیه به صورت هم محور بوده و بیانگر آن است که پس از فورج کردن و قبل از استحاله فازی پدیده تبلور مجدد رخ داده است.

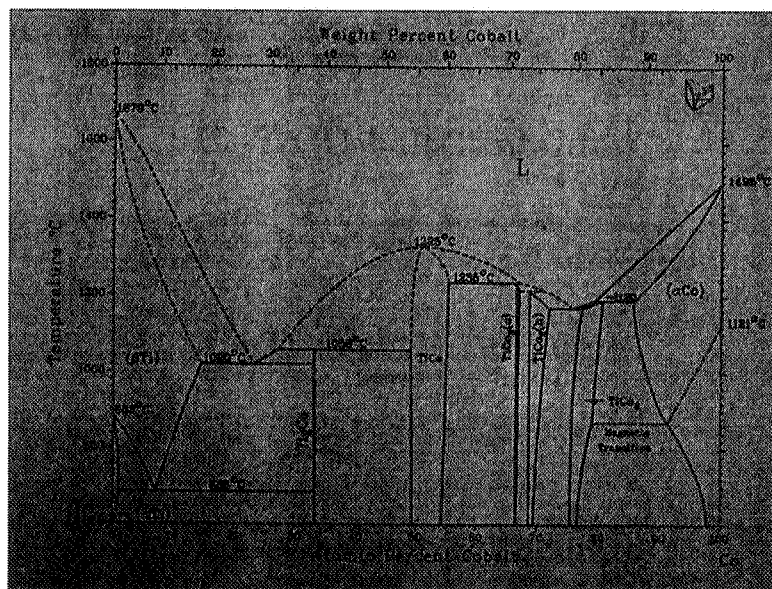
در منطقه تغییر شکل یافته<sup>۱۰</sup> (حد فاصل بین منطقه استحاله یافته و زمینه) ریزساختار متشکل از فاز  $\alpha$  کشیده شده همراه با فاز  $\beta$  بین دانه ای است، شکل (۴). در عملیات جوشکاری اصطکاکی، جهت گیری مجدد<sup>۱۱</sup> دانه ها به دلیل تغییر شکل پلاستیک رخ می دهد [۱۴]. آلیاژ Ti6Al4V دارای ضریب هدایت گرمایی  $7\text{ W/m}\cdot\text{K}$  بوده [۱۴] که در مقایسه با تیتانیوم خالص با ضریب هدایت گرمایی  $22\text{ W/m}\cdot\text{K}$  [۱۴] و کاربرد تنگستن - کبالت ( $50-70\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) [۱۵] بسیار کمتر است. بنابراین در هنگام جوشکاری اصطکاکی به دلیل ایجاد دمای بالا و پایین بودن ضریب انبساط گرمایی آلیاژ Ti6Al4V

تغییر شکل پلاستیکی به راحتی در این آلیاژ رخ خواهد داد. در این پژوهش دمای منطقه تغییر شکل پلاستیکی بالاتر از دمای استحاله  $\beta$  نبوده است زیرا اگر دما در این منطقه بالاتر از دمای استحاله  $\beta$  بود، در این منطقه استحاله فازی رخ می داد، اما مدرکی مبنی بر استحاله فازی در این منطقه مشاهده نشده است. در شکل (۵) آنالیز خطی موضع اتصال جوش اصطکاکی Ti6Al4V/WC-24 wt.%Co نشان داده شده است. با توجه به این شکل نفوذ متقابل تیتانیوم و کبالت در فصل مشترک اتصال قابل مشاهده است. با توجه به توضیحات قبلی به دلیل آنکه در ضمن جوشکاری اصطکاکی آلیاژ Ti6Al4V و کاربرد تنگستن - کبالت دما بالاتر از  $990^\circ\text{C}$  بوده و همچنین به دلیل قابلیت انحلال تیتانیوم و کبالت در یکدیگر، در ضمن جوشکاری احتمالاً نفوذ متقابل تیتانیوم و کبالت در یکدیگر رخ داده است. با توجه به نمودار فاز سیستم Ti-Co شکل (۶) دیده می شود که تیتانیوم و کبالت می توانند یکسری ترکیبات بین فلزی را در فصل مشترک اتصال به وجود آورند. وجود ترکیبات بین فلزی به طور برجسته ای بر کیفیت جوشهای اصطکاکی مؤثر می باشد [۱۶]. به منظور ارزیابی احتمال تشکیل ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال در ضمن جوشکاری اصطکاکی، آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) بر سطح مقطع شکست اتصالات در سمت تیتانیوم انجام گرفته است. لازم به ذکر است که در مورد جوشهای اصطکاکی آلیاژ تیتانیوم با کاربرد تنگستن - کبالت حاوی ۱۱ و ۲۴ درصد کبالت، جوش از فصل مشترک اتصال شکسته شده که توضیحات کامل آن در قسمت (۳-۳) ارائه شده است.

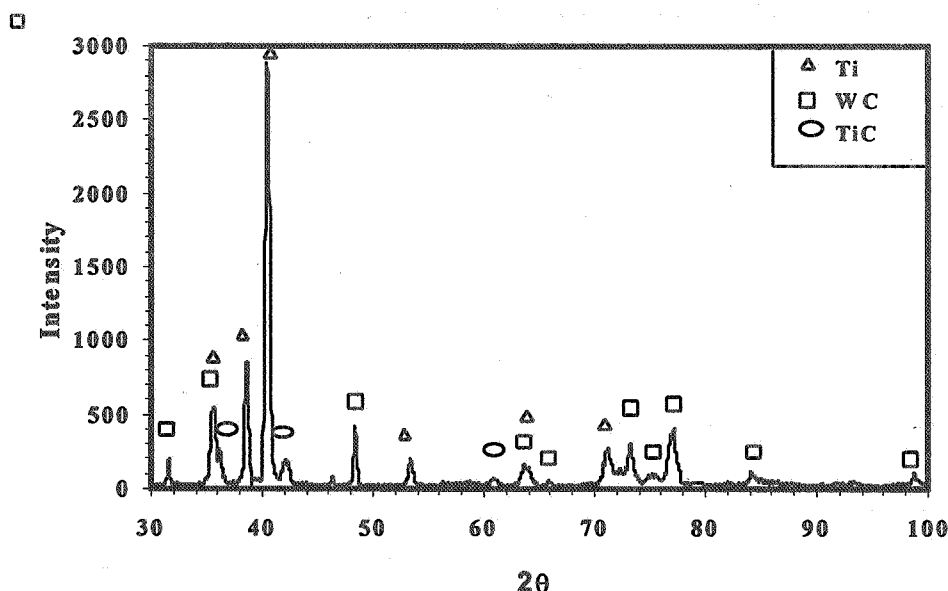
در شکل (۷) نتایج آزمایش XRD بر سطح مقطع شکست اتصال در سمت تیتانیوم در مورد جوش اصطکاکی Ti6Al4V/WC-11 wt.%Co ارائه شده است. در این شکل می توان حضور پیک های WC, Ti و TiC را مشاهده کرد. با



شکل ۵- میکروگراف الکترونی همراه با آنالیز خطی در موضع اتصال جوش اصطکاکی  $Ti6Al4V/WC-24\text{ wt.\%Co}$



شکل ۶- نمودار فازی سیستم  $Ti-Co$  [۲۱].



شکل ۷- آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) بر سطح مقطع شکست جوش اصطکاکی  $Ti6Al4V/WC-11 \text{ wt.}\%Co$  (در سمت تیتانیوم)

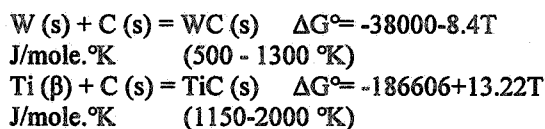
این، کامپوزیت WC را معمولاً توسط متالورژی پودر تولید می‌نمایند، لذا امکان وجود کربن آزاد در نمونه کاربید تنگستن - کبالت وجود دارد. همچنین ترکیب شیمیایی آلیاژ  $Ti6Al4V$  جدول (۱) نشان می‌دهد که مقداری کربن در این آلیاژ وجود دارد. کربن آزاد موجود در نمونه های کاربید تنگستن - کبالت و تیتانیوم می‌تواند در دمای بالا در فصل مشترک با تیتانیوم واکنش و تولید TiC کرده باشد. انجام آزمایش XRD صحت مطالب بالا مبنی بر تشکیل TiC را تأیید می‌کند.

۲-۳- خواص استحکام شکست جوشهای اصطکاکی  $Ti6Al4V/WC-Co$

همان طور که در بخش (۲) توضیح داده شده، به منظور ارزیابی خواص مکانیکی اتصالات از آزمایش خمش سه نقطه‌ای استفاده شده است. در جدول (۳) خواص مکانیکی (استحکام شکست) انواع جوشهای اصطکاکی تیتانیوم و کاربید تنگستن - کبالت آورده شده است. با توجه به این نتایج دیده می‌شود که افزایش درصد کبالت در زمینه کاربید تنگستن -

توجه به شکل (۷) دیده می‌شود که آثاری از تشکیل ترکیبات بین فلزی Ti-Co و اکسید تیتانیوم وجود ندارد، اما کاربید تیتانیوم (TiC) در فصل مشترک اتصال ایجاد شده است که علل تشکیل آن در ادامه شرح داده می‌شود.

مقادیر انرژی آزاد استاندارد تشکیل WC و TiC عبارت‌اند از [۱۷]:



برای مثال در دمای  $1000^{\circ}C$  ( $1273^{\circ}K$ ) مقادیر انرژی

آزاد تشکیل WC و TiC به ترتیب برابر است با:  $487 \text{ KJ/mole}$  و  $-1697 \text{ KJ/mole}$ . بنابراین تیتانیوم دارای میل ترکیب شیمیایی بیشتری در مقایسه با تنگستن برای تشکیل کاربید تیتانیوم (TiC) می‌باشد. با توجه به مخلوط شدن مکانیکی و نفوذ تیتانیوم به داخل کاربید تنگستن - کبالت در ضمن جوشکاری اصطکاکی شکل (۵)، و همچنین دمای بالاتر از  $995^{\circ}C$  در فصل مشترک اتصال و پایبتر بودن انرژی آزاد استاندارد تشکیل TiC در مقایسه با WC، احتمال تشکیل کاربید تیتانیوم (TiC) در موضع اتصال وجود دارد. علاوه بر



جدول ۳- استحکام شکست جوشهای اصطکاکی (Ti6Al4V/(WC- Co).

استحکام شکست (MPa)	نوع اتصال
۲۵ (±۵)	Ti6Al4V/WC- 6 wt. Co
۱۶۰ (±۷)	Ti6Al4V/WC- 11 wt. Co
۲۷۰ (±۱۰)	Ti6Al4V/WC- 24 wt. Co

با توجه به معادله (۲) دیده می شود که با افزایش اختلاف ضرایب انبساط گرمایی فلز و سرامیک میزان تنشهای پسماند گرمایی در موضع اتصال افزایش می یابد.

با توجه به آنکه در مورد اتصالات Ti6Al4V/(WC-Co) نمونه های کاربید تنگستن - کبالت دارای ضریب انبساط گرمایی پایبتری می باشند جدول (۲)، لذا تنشهای پسماند گرمایی در قسمت محیطی موضع اتصال و به سمت زمینه کاربید تنگستن - کبالت از نوع کششی است. افزایش مقدار این تنشها به طور مؤثری می تواند سبب کاهش استحکام شکست اتصالات در ضمن آزمایش خمش سه نقطه ای شود. با توجه به آنکه اتصال Ti6Al4V/WC-6 wt.%Co دارای بیشترین اختلاف در ضرایب انبساط گرمایی است انتظار می رود که این اتصال دارای کمترین استحکام شکست باشد.

نتایج آزمایش خمش سه نقطه ای جدول (۳) بیانگر آن است که اتصال Ti6Al4V/WC-6 wt.%Co دارای کمترین استحکام شکست است. با افزایش درصد کبالت در زمینه کاربید تنگستن - کبالت به دلیل افزایش چقرمگی شکست آن و همچنین کاهش تنشهای پسماند گرمایی در موضع اتصال، استحکام شکست اتصالات بهبود می یابد. برای مثال چقرمگی شکست<sup>۱۴</sup> کاربید تنگستن - کبالت از  $1/6 \text{ MPa.m}^{1/2}$  تا  $2/6 \text{ MPa.m}^{1/2}$  افزایش یافته، وقتی که درصد کبالت آن از ۶ درصد وزنی به ۲۵ درصد وزنی رسیده است [۲۰]، لذا خواص چقرمگی شکست کاربید تنگستن - کبالت و چقرمگی Ti6Al4V تاثیر قابل ملاحظه ای بر کیفیت جوشهای اصطکاکی Ti6Al4V/(WC-Co) دارد.

کبالت تاثیر قابل ملاحظه ای بر افزایش استحکام شکست اتصالات دارد که ناشی از دو مورد زیر است:

۱- بررسیهای به عمل آمده در زمینه اتصال مواد انعطاف پذیر - ترد نشان می دهد که رشد ترک در فصل مشترک اتصال در ضمن آزمایشهای مکانیکی مستلزم پل زدن<sup>۱۱</sup> و تشکیل رباطهایی<sup>۱۳</sup> در ماده انعطاف پذیر است [۱۸]. افزایش درصد کبالت در زمینه کاربید تنگستن - کبالت باعث افزایش تعداد پل زدنها و لذا کند شدن سرعت رشد ترک خواهد شد. بنابراین استحکام شکست جوشهای اصطکاکی (Ti6Al4V/(WC-Co) با افزایش درصد کبالت موجود در زمینه کاربید تنگستن - کبالت افزایش خواهد یافت.

۲- در جوشکاری اصطکاکی مواد غیر مشابه، تنشهای پسماند کششی در قسمت محیطی اتصال و در زمینه ای با ضریب انبساط گرمایی پایین تر ایجاد می شود [۱۹]. در مورد اتصال دو ماده غیر مشابه به یکدیگر (برای مثال فلز/ سرامیک) رابطه زیر بیانگر میزان تنش گرمایی پسماند کششی در زمینه ای با ضریب انبساط گرمایی پایبتر است [۱۹]:

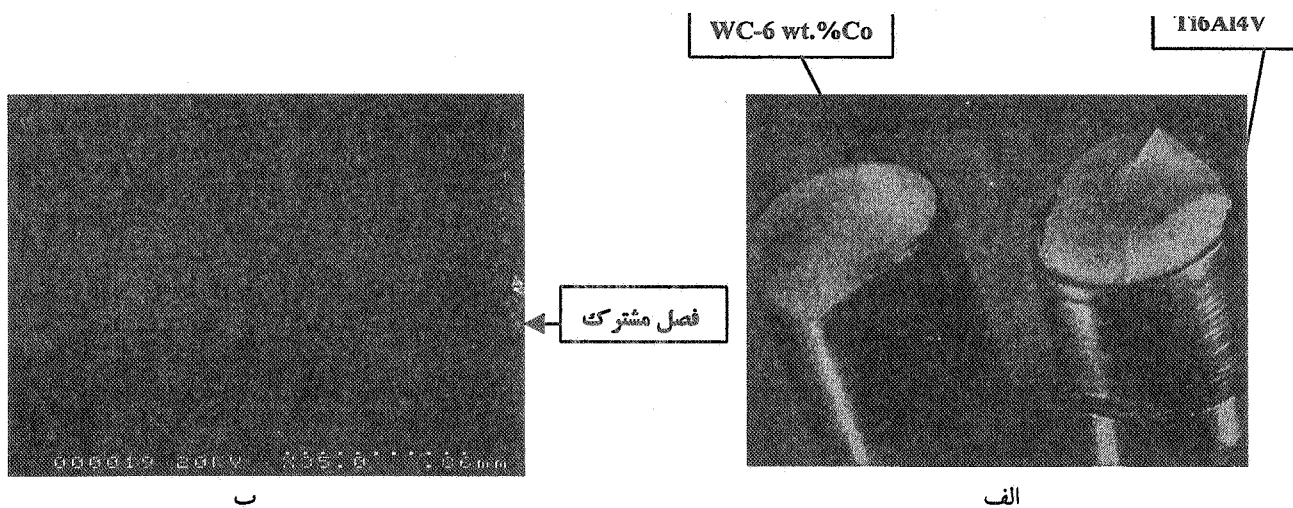
$$\sigma = \Delta\alpha \cdot \Delta T \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \quad (2)$$

$\sigma$  (MPa) : تنش پسماند گرمایی

$\Delta\alpha$  (m/m.°K) : اختلاف بین ضرایب انبساط گرمایی فلز و سرامیک

$\Delta T$  (°K) : اختلاف دما بین دمای اتصال و دمای محیط

$E_1$  و  $E_2$  (MPa) : مدول یانگ فلز و سرامیک



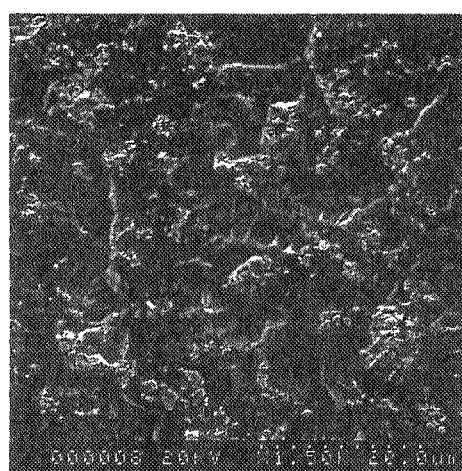
الف



ب



د



ج

شکل ۸ - جوش اصطکاکی WC-6 wt.%Co / Ti6Al4V

الف- سطوح شکست WC-6 wt.%Co و Ti6Al4V

ب- میکروگراف الکترونی نشان دهنده مسیر رشد ترک

ج- سطح شکست جوش اصطکاکی در سمت تیتانیوم (در قسمت شروع رشد ترک)

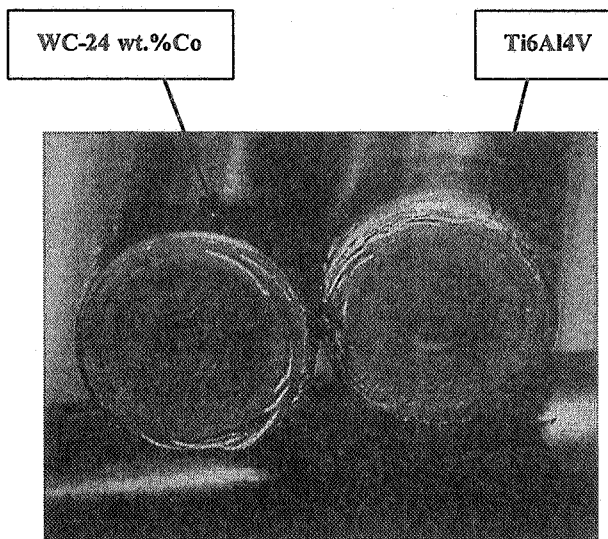
د- سطح شکست جوش اصطکاکی در سمت تیتانیوم (در قسمت نزدیک به مرکز اتصال).

به ترتیب در قسمت شروع ترک (قسمت محیطی اتصال) و در مرکز اتصال نشان داده شده است.

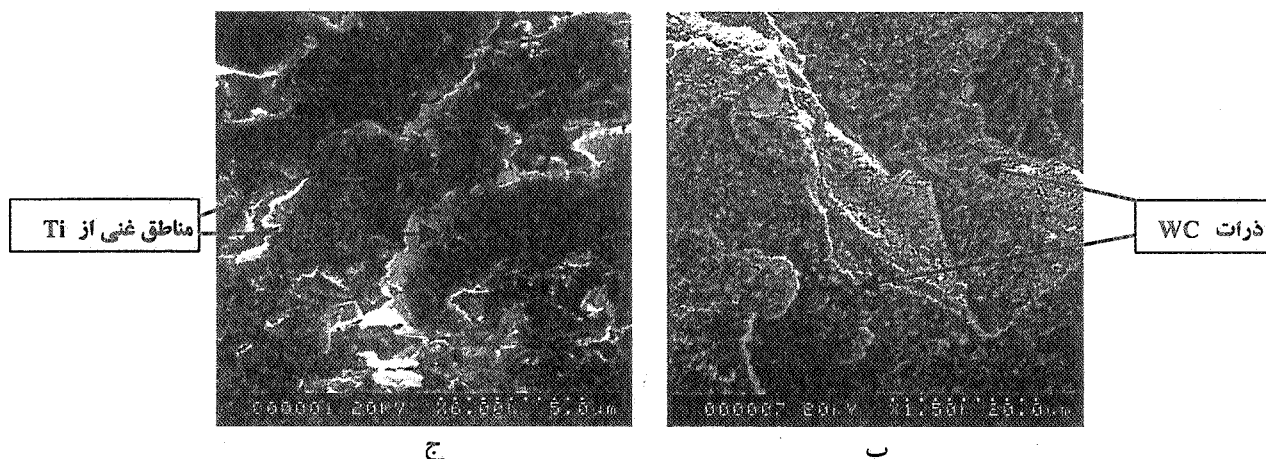
در مورد جوشهای اصطکاکی WC-11wt.%Co / Ti6Al4V و WC-24 wt.%Co / Ti6Al4V در ضمن آزمایش خمش، ترک در فصل مشترک اتصال جوانه زده و رشد می کند. در شکل (۹) سطوح شکست در سمت تیتانیوم و کاربید تنگستن - کبالت

۳-۳- بررسی سطوح و مقاطع شکست

در مورد جوشهای اصطکاکی WC-6wt.%Co / Ti6Al4V در ضمن آزمایش خمش مطابق شکل (۸-الف) و (۸-ب) ترک در فصل مشترک اتصال جوانه زده و سپس به سمت زمینه کاربید تنگستن - کبالت رشد می کند. در شکل (۸-ج) و (۸-د) سطح مقطع شکست جوش در سمت تیتانیوم



الف



ج

ب

شکل ۹- جوش اصطکاکی Ti6Al4V/WC-24 wt.%Co

الف- سطوح شکست Ti6Al4V و WC-24 wt.%Co

ب- سطح شکست جوش اصطکاکی در سمت تیتانیوم نشان دهنده حضور ذرات WC

ج- سطح شکست جوش اصطکاکی در سمت WC-24 wt.%Co نشان دهنده مناطق غنی از تیتانیوم.

ضرایب انبساط گرمایی، استحکام شکست اتصالات تیتانیوم با کاربید تنگستن - کبالت کاهش می یابد. با توجه به آنکه حداکثر مقدار تنشهای پسماند گرمایی از نوع کششی در قسمت محیطی موضع اتصال و به داخل زمینه کاربید تنگستن - کبالت می باشد، بنابراین انتظار می رود که منطقه شروع شکست (ایجاد ترک) در قسمت محیطی فصل مشترک اتصال

در مورد جوش اصطکاکی Ti6Al4V/WC-24 wt.%Co آورده شده است.

وجود تنشهای پسماند گرمایی تاثیر قابل ملاحظه ای بر استحکام شکست اتصالات مواد غیرمشابه و منطقه شروع ترک خواهد داشت. همان طور که در قبلا توضیح داده شده با افزایش میزان تنشهای پسماند گرمایی به دلیل افزایش اختلاف

آلیاژ Ti6Al4V با کاربید تنگستن - کبالت باشد. با توجه به شکل‌های (۸) و (۹) دیده می‌شود که در هنگام آزمایش خمش ترک در فصل مشترک اتصال جوانه زده و در مورد نمونه کاربید تنگستن - کبالت حاوی ۶ درصد وزنی کبالت به سمت زمینه کاربید رشد کرده در حالی که در مورد نمونه های کاربید تنگستن - کبالت حاوی ۱۱ و ۲۴ درصد وزنی کبالت در فصل مشترک رشد می‌نماید.

علت رشد ترک به سمت زمینه کاربید تنگستن - کبالت در اتصال Ti6Al4V/WC-6 wt.%Co را احتمالاً می‌توان ناشی از مقدار تنش پسماند کششی بیشتر این اتصال در زمینه کاربید تنگستن - کبالت در مقایسه با دو نوع اتصال دیگر یعنی آلیاژ Ti6Al4V با کاربید تنگستن - کبالت حاوی ۱۱ و ۲۴ درصد وزنی کبالت دانست (جدول (۲)). زیرا نمونه WC-6 wt.%Co دارای بیشترین اختلاف در ضرایب انبساط گرمایی با Ti6Al4V در مقایسه با دو نوع کاربید تنگستن - کبالت دیگر بوده و این مسئله به افزایش تنش پسماند گرمایی از نوع کششی در آن کمک می‌کند.

تمایل به آنکه در هنگام آزمایش خمش ترک در فصل مشترک باقی بماند و یا به داخل زمینه کاربید تنگستن - کبالت رشد کند بستگی به نسبت  $G_0/G_1$  دارد، جایی که  $G_0$  نرخ انرژی آزاد شده<sup>۱۵</sup> لازم برای پیچ خوردن ترک<sup>۱۶</sup> به داخل زمینه و  $G_1$  نرخ انرژی آزاد شده لازم برای توسعه ترک در فصل مشترک است. ترک در فصل مشترک باقی خواهد ماند اگر این نسبت بزرگتر از نسبت  $\Gamma_0/\Gamma_1$  باشد، جایی که  $\Gamma_0$  انرژی شکست زمینه و  $\Gamma_1$  انرژی شکست در فصل مشترک می‌باشد [۱۸]. با توجه به آنکه در جوش‌های اصطکاکی Ti6Al4V/WC-6 wt.%Co ترک در زمینه کاربید تنگستن - کبالت رشد کرده است لذا احتمالاً در این حالت  $G_0/G_1$  کمتر از  $\Gamma_0/\Gamma_1$  بوده، در حالی که جوش‌های اصطکاکی Ti6Al4V/WC-24 wt.%Co و Ti6Al4V/WC-11 wt.%Co نسبت  $G_0/G_1$  بزرگتر از  $\Gamma_0/\Gamma_1$  بوده است.

بررسی سطوح شکست جوش‌های اصطکاکی

Ti6Al4V/WC-6 wt.%Co در منطقه شروع ترک (قسمت محیط اتصال) در سمت تیتانیوم بیانگر شکست از نوع نرم است، زیرا وجود برخی گودالها<sup>۱۷</sup> و پارگیها<sup>۱۸</sup> بر روی سطح که از ویژگیهای شکست نرم است را می‌توان مشاهده کرد. به دلیل پدیده نفوذ و مخلوط شدن مکانیکی در ضمن جوشکاری اصطکاکی و با توجه به آنکه شروع شکست در فصل مشترک اتصال است، وجود ذراتی از WC را بر سطح تیتانیوم می‌توان مشاهده کرد. در مورد همین نمونه در مرکز جوش سطح شکستی ترد دیده می‌شود شکل (۸-د)، زیرا پس از آنکه ترک در قسمت محیطی اتصال جوانه زده است به سمت کاربید تنگستن - کبالت رشد نموده و قسمتی از آن بر سطح آلیاژ Ti6Al4V باقی مانده است. در این سطح شکست می‌توان:

- i) شکستی ترد در دانه های WC (ii) شکست در مرز دانه‌های WC-WC و WC-Co (iii) شکست نرم در فاز کبالت را مشاهده کرد.

بررسی سطوح شکست جوش‌های Ti6Al4V/WC-11 wt.%Co و Ti6Al4V/WC-24 wt.%Co در سمت تیتانیوم بیانگر شکست از نوع نرم می‌باشد شکل (۹-ب) و حضور ذراتی از WC بر سطح تیتانیوم را با بررسیهای میکروسکوپی و آنالیز EDX می‌توان تشخیص داد. بر سطح مقطع شکست همین نوع اتصالات در سمت کاربید تنگستن - کبالت می‌توان حضور مناطق غنی از تیتانیوم را مشاهده نمود شکل (۹-ج).

بنابراین در مورد جوش‌های اصطکاکی Ti6Al4V/WC-Co ترک در قسمت محیطی اتصال در فصل مشترک و احتمالاً در مناطق غنی از تیتانیوم جوانه زده و در مورد نمونه کاربید تنگستن - کبالت حاوی ۶ درصد وزنی کبالت به سمت زمینه کاربید در مورد نمونه های حاوی ۱۱ و ۲۴ درصد وزنی کبالت در فصل مشترک رشد کرده است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش ریز ساختار و استحکام شکست

Ti6Al4V/(WC-Co) در حدی بوده که نمونه تیتانیومی وارد منطقه تک فاز  $\beta$  شده است.

۴- استحکام شکست جوشها به طور برجسته ای با افزایش درصد کبالت موجود در کاربید تنگستن - کبالت افزایش می یابد. افزایش استحکام شکست با افزایش درصد کبالت ناشی از کاهش میزان تنشهای پسماند کششی در فصل مشترک اتصال به داخل زمینه کاربید تنگستن-کبالت است.

۵- در مورد جوشهای Ti6Al4V/WC-6 wt.%Co در طی آزمایش خمش، ترک در فصل مشترک اتصال جوانه زده و در WC-6 wt.%Co رشد می کند. در حالی که در جوشهای Ti6Al4V/WC-11 wt.%Co و Ti6Al4V/WC-24 wt.%Co ترک در فصل مشترک اتصال جوانه زده و رشد می کند.

جوشهای اصطکاکی Ti6Al4V/(WC-Co) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج اصلی این پژوهش عبارتند از:

۱- با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی می توان لایه ای از کاربید تنگستن کبالت را بر سطح آلیاژ Ti6Al4V به منظور بهبود خواص تریبولوژیکی آن ایجاد نمود. روش مذکور بسیاری از محدودیتهای روشهای متداول نظیر محدودیت ضخامت در روش اسپری گرمایی را ندارد.

۲- فصل مشترک جوشها به صورت صفحه ای بوده و آثاری از مخلوط شدن مکانیکی و نفوذ متقابل را می توان مشاهده کرد. ریز ساختار آلیاژ Ti6Al4V در مجاورت موضع اتصال مجموعه ای از فریت سوزنی و هم محور همراه با فاز بتاست.

۳- بررسیهای ریز ساختاری نشان می دهد که دما در فصل مشترک اتصال در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی

#### واژه نامه

- |                                 |                            |                         |
|---------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 1. thermal spray coatings       | 7. ploughing mechanism     | 13. ligaments           |
| 2. friction welding             | 8. fully plasticised layer | 14. fracture toughness  |
| 3. roughness                    | 9. transformed region      | 15. energy release rate |
| 4. scanning electron microscopy | 10. deformed region        | 16. crack kinking       |
| 5. three point bending test     | 11. reorientation          | 17. dimples             |
| 6. planar interface             | 12. bridging               | 18. tearing             |

#### مراجع

- Destefani, J. D., "Introduction to Titanium and Titanium Alloys," *Metals Handbook*, 10th Ed., Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, pp. 586-591, ASM, Metals Park, Ohio, 1992.
- Polmear, I. J., *Metallurgy and Materials Science Light Alloys*, Third Ed., pp.305-314, Arnold Press, 1995.
- Budinski, K. G., "Tribological Properties of Titanium Alloys," *Wear*, 151, pp. 203-217, 1991.
- Molinari, A., Straffellini, G., Tesi, B., and Bacii, T., "Dry Sliding Wear Mechanisms of the Ti6Al4V Alloy," *Wear*, 208, pp. 105-112, 1997.
- Provot, X., Burlet, H., Jeandin, M. Richard, C., Lu, J., and Manesse, D., "Comparative Studies of Microstructures Residual Stress Distributions and
- Wear Properties for HVOF and APS WC-Co Coatings of Ti6Al4V," *Proceedings of the 1993 National Thermal Spray Conference*, Anaheim, CA, pp. 159-166, 1993.
- شمعانیان، م.، جوشکاری اصطکاکی تیتانیوم/کاربید تنگستن - کبالت و ارزیابی خواص اتصال، رساله دکترای مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۰.
- Standard Practice for Metallographic Sample Preparation of Cemented Carbides, *Annual Book of ASTM Standards*, Part9, B665, pp. 550-551, 1982.
- Standard Method for Metallographic Determination of Microstructure in Cemented Carbides, *Annual Book of ASTM Standard*, Part 9, B657, pp. 541-544, 1982.

9. Lampman, S. "Wrought titanium and Titanium Alloys," *Metals Handbook*, 10th Ed., Vol.2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, pp. 586-591, ASM, Metal Park, Ohio, 1992.
10. Ashby, M. F., *Materials Selection in Mechanical Design*, Pergamon Press, New York, 1992.
11. Bahrani, A. S., "The Mechanics of Friction Welding," *Proceedings of International Conference Joining of Metals*, JOM 2, Heisigor, Denmark, PP.99-106, 1984.
12. Suh, N. P., *Tribophysics*, pp.265-270, Massachusetts Institute of Technology, Prentice-Hall INC., 1986.
13. Fuji, A., Ameyama, K., North, T. H., and Kimura, M., "Effect of Friction Welding on Characteristics of Pure Titanium/A5083 Aluminium Alloy Joint," *Materials Science Research International*, Vol.1, No.3, pp. 193-197, 1995.
14. Sun, D., Ren, Z., and Zhou, Z., "Microstructural Features of Friction-Welded Ti6Al4V joint," *Journal of Materials Science and Technology*, Vol.16, No.1, pp. 59-62, 2000.
15. Brookes, K. J. A., *Cemented Carbides for Engineers and Tool Users*, pp.52-53, International Carbide Data, 1983.
16. Zahi, Y., Maldonado, C., North, T. H., and Bendzsak, G. J., "Intermetallic Formation and Mechanical Properties in Dissimilar MMC/AISI 304," *Journal of Materials Science*, pp. 1-14, 1998.
17. Coltters, R. G., "Thermodynamics of Binary Metallic Carbides," *Material Science and Engineering*, Vol. 76, pp. 1-50, 1985.
18. Evans, A. G., Ruhle, M., Dalgleish, B. J., and Charalambides, P. G., "The Fracture Energy of Bimaterial Interface," *Materials Science and Engineering*, A126, pp. 53-64, 1990.
19. Kim, Y.C, Fuji, A. and North, T.H., "Characterisation of Residual Stress and Plastic Strain in AISI 304L Stainless Steel/Titanium Friction Welds," *Transaction of JWRI*, Vol.24, No.1, pp.121-125, 1995.
20. Nakamura, M. and Gurland, J., "The Fracture Toughness of WC-Co Two-Phase Alloys-a Preliminary Model," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 11A, pp. 141-146, 1980.
21. Murray, J. L., "Co-Ti Phase Diagram," *Binary Alloy Phase Diagrams*, Vol.2, pp. 803-809, 1986.