

استفاده از واکنش سنتز احتراقی ترکیب بین فلزی NiTi جهت اتصال فولاد به کاربید تنگستن

علی رضا کریمی^۱، ماندانا عادل^{۲*}، منصور سلطانی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۴، ش ص: ۱۱۴-۱۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۰)

چکیده

در این پژوهش امکان ایجاد اتصال فولاد - کاربید تنگستن با استفاده از روشی نوین بر پایه فرآیندهای سنتز احتراقی بررسی شده و مکانیزم اتصال مورد بحث قرار گرفته است. سامانه‌ای آزمایشگاهی با هدف گرمایش سریع نمونه و انجام واکنش سنتز تحت فشار و در اتمسفر محافظ طراحی و ساخته شد. بین قطعاتی استوانه‌ای شکل از فولاد و کاربید، لایه‌ای متشکل از مخلوط فشرده پودرهای عنصری نیکل و تیتانیوم به عنوان پودر واکنش‌گر و منبع تولید گرما در اتصال‌دهی مورد استفاده قرار گرفت. برای تهیه این لایه، پودر عناصر با توجه به نسبت مولی $Ni:Ti = 1:1$ توزین، مخلوط و به صورت قرص‌های خام به قطر ۱۲ mm فشرده شدند. از یک کوره القایی جهت گرمایش سریع مخلوط پودری فشرده نیکل - تیتانیوم و انجام واکنش گرمای سنتز احتراقی و تولید ترکیب بین فلزی NiTi بین قطعات مورد اتصال استفاده شد. پس از اتصال، نمونه‌ها به منظور مطالعات ریزساختاری و بررسی کیفیت اتصال در فصول مشترک NiTi/کاربید و NiTi/فولاد از وسط برش زده شده و متالوگرافی شدند. به منظور مشخصه‌یابی نمونه‌ها از آنالیز XRD و SEM-EDS استفاده شد. آنالیزهای انجام شده مؤید تشکیل NiTi به عنوان فاز اصلی در اثر انجام واکنش سنتز احتراقی در مخلوط پودری فشرده Ni+Ti بود. نتایج آنالیز عنصری نقطه‌ای، نفوذ عناصر تنگستن و کبالت در لایه‌ی اتصال NiTi و همچنین نفوذ متقابل تیتانیوم و نیکل را اثبات کرد. بررسی نقشه توزیع عناصر در فصل مشترک‌های اتصال، تجمع عناصر نیکل و تنگستن در فصل مشترک کاربید/ NiTi و عناصر تیتانیوم و آهن در فصل مشترک فولاد/ NiTi را به دلیل تشکیل پیوند در فصل مشترک‌ها در نتیجه‌ی دمای بالای فرآیند تأیید کرد. نتایج نشان داد که با استفاده از واکنش‌های سنتز احتراقی و ذوب موضعی محصول NiTi تشکیل شده، امکان برقراری اتصالی با کیفیت مناسب بین کاربید تنگستن و فولاد با استفاده از لایه واسط NiTi به دلیل نفوذ عناصر و تشکیل پیوند در فصل مشترک‌های اتصال و ایجاد چسبندگی میان اجزای اتصال وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: اتصال فولاد - کاربید تنگستن، سنتز احتراقی، واکنش گرمای، ترکیب بین فلزی NiTi.

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی - دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^۲ - استادیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^۳ - استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*-نویسنده مسئول مقاله: adelim@iust.ac.ir

پیشگفتار

برای برقراری اتصال بین مواد مختلف، فرآیندهای متعددی از جمله انواع روش‌های جوشکاری ارائه شده و در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. علیرغم سهولت ایجاد اتصال بین فلزات و آلیاژهای همسان، هنگامی که قطعات مورد اتصال تفاوت‌های قابل توجهی از نظر نوع، ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی با یکدیگر داشته باشند، اتصال دو قطعه با استفاده از روش‌های متداول جوشکاری مشکلات متعددی به همراه دارد. از این میان اتصال بین انواع آلیاژهای فلزی مانند فولاد و ترکیبات سرامیکی و سرامت‌ها که در صنایع ابزارسازی دارای اهمیت است با دشواری‌های فراوان روبروست. از جمله روش‌های نوین اتصال، اتصال به کمک واکنش‌های احتراقی است که ویژگی‌هایی مانند سرعت بالای انجام واکنش و در نتیجه ایجاد سریع اتصال، خلوص بالای محصولات تولید شده در فصل مشترک، انرژی مصرفی اندک، نرخ بالای تولید حرارت، تجهیزات نسبتاً ساده مورد استفاده و راندمان بالای فرآیند، آن را به‌عنوان روشی مناسب جهت اتصال موادی که از روش‌های معمول به سختی اتصال می‌یابند، مورد توجه قرار داده است [۱]. در روش سنتز احتراقی ترکیبات مختلف را می‌توان با استفاده از انرژی شیمیایی آزاد شده از واکنش بین عناصر تشکیل دهنده آن‌ها تولید کرد [۱ و ۲]. به دلیل دمای بسیار بالای تولید شده طی فرآیند اتصال احتراقی و طبیعت ناپایدار این فرآیند، اطلاعات اندکی در مورد خصوصیات سینتیکی و حرارتی و استحاله‌های فازی در حین احتراق وجود دارد. این موضوع نیاز به پژوهش بیشتر در این زمینه را نشان می‌دهد [۴]. اتصال احتراقی شباهت بسیاری به روش لحیم‌کاری سخت دارد و از هر دو روش جهت ایجاد اتصال در بین موادی که از روش‌های معمول قابل اتصال نمی‌باشند استفاده می‌شود. در لحیم‌کاری سخت مذاب ایجاد شده از طریق خاصیت مویینگی به اجزای اتصال نفوذ می‌کند و اتصال برقرار می‌شود. اشکال بزرگ این روش در اتصال مواد هتروژن (فولاد و سرامیک) این است که موادی که به عنوان پرکننده یا فیلر استفاده می‌شوند قادر به پوشاندن سطوح سرامیکی نیستند [۵]. همچنین این فرآیند طولانی است و نیاز به زمان کافی جهت انجام عملیات نفوذ دارد، در حالی که در اتصال توسط سنتز احتراقی بلافاصله پس از انجام واکنش در مدتی بسیار کوتاه، اتصال مورد نظر

برقرار می‌شود. با توجه به مزایای روش اتصال احتراقی، این روش می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای روش لحیم‌کاری در صنعت توسعه یابد [۶]. جهت ایجاد اتصال احتراقی، مخلوط پودری گرم‌زای فشرده شده را بین نمونه‌های مورد اتصال قرار داده و مجموعه‌ی مذکور درون سامانه طراحی شده برای اتصال قرار گرفته و عملیات اتصال در چند ثانیه انجام می‌شود. با انجام واکنش‌های سنتز احتراقی در مخلوط پودری، گرمای بسیار زیادی آزاد می‌شود که نتیجه آن گرم شدن محصولات واکنش و تشکیل موضعی فازهای مذاب در فصل مشترک اتصال می‌باشد که می‌تواند موجب اتصال محصول سنتز احتراقی به عنوان واسطه به هریک از قطعات مورد اتصال شود. روش‌های مورد استفاده برای سنتز احتراقی به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از: سنتز احتراقی حجمی (VCS)^۱ و سنتز احتراقی خود پیش رونده (SHS)^۲ [۱]. اتصال دهی احتراقی با استفاده از هر یک از این دو دسته، خود به روش‌های مختلفی براساس روش آغاز یا اشتعال واکنش، شکل فیزیکی مواد اتصال دهنده و روش‌های حرارت‌دهی به مخلوط گرم‌زای برای رسیدن به دمای احتراق تقسیم می‌شوند. انتخاب مخلوط پودری گرم‌زای مورد استفاده جهت اتصال با در نظر گرفتن دو هدف صورت می‌گیرد: (۱) ضریب انبساط حرارتی نمونه‌های مورد اتصال با مواد واکنشگر تا جایی که ممکن است به هم نزدیک باشند و (۲) قابلیت ترشوندگی سطوح اتصال توسط فازهای مذاب تولید شده طی فرآیند سنتز احتراقی مناسب باشد. در صورتی که ترکیب سنتز شده به‌عنوان واسطه‌ای مناسب برای اتصال عمل نکند، قطعات متصل شده با مشکل اختلاف در ضریب انبساط حرارتی و انفصال در فصول مشترک روبه‌رو خواهند شد. اختلاف زیاد در ضریب انبساط حرارتی دو ماده باعث تولید تنش‌های پسماند حرارتی بالا در فصل مشترک دو ماده حین فرآیند سرد کردن می‌شود [۱]. وجود تخلخل در اتصال می‌تواند خواص مکانیکی و استحکام اتصال را دچار مشکل کند. شرباکوف و همکاران او مطالعاتی در زمینه تأثیر لایه‌های مخلوط واکنشگر بر روی استحکام جوش انجام دادند

^۱ - Volume combustion synthesis

^۲ - Self-propagating, high-temperature synthesis

مواد اولیه جهت تهیه استوانه‌هایی به قطر ۱۲ میلی‌متر و ارتفاع ۲ میلی‌متر محاسبه شد. مقادیر مورد نیاز از پودرهای اولیه توزین شده و به مدت ۲۰ دقیقه درون یک هاون دستی مخلوط شدند. پس از آن مخلوط پودری همگن شده درون قالبی با قطر ۱۲ میلی‌متر ریخته شد و توسط یک دستگاه پرس هیدرولیک عمل فشرده‌سازی با نیروی تقریبی ۱۰۰ KN انجام شده و قرصی فشرده از مخلوط پودری با ارتفاع ۲mm و دانسیته نسبی در محدوده ۹۰-۸۰ درصد دانسیته تئوری تهیه گردید. پیش از برقراری اتصال احتراقی، توسط کاغذ سمباده ۸۰۰ زبری مختصری در سطوح اتصال در فولاد و کاربید ایجاد شد. به منظور بررسی امکان‌پذیری ایجاد اتصال بین نمونه‌های فولاد و کاربید، سامانه‌ای آزمایشگاهی که وظیفه‌ی در تماس قرار دادن اجزای مختلف اتصال، گرمایش سریع قرص گرم‌زای خام متشکل از عناصر نیکل و تیتانیوم و تأمین اتمسفر محافظ برای ایجاد اتصال بین دو قطعه فولاد و کاربید تنگستن را داشت، طراحی و ساخته شد. در این سامانه نمونه‌های فولاد و کاربید تنگستن و قرص واکنشگر بین آن‌ها درون قالب گرافیتی استوانه‌ای شکل قرار گرفته و مجموعه داخل لوله کوارتز به قطر داخلی ۳۸ mm قرار گرفت که جریانی از آرگون تا پایان فرآیند در آن برقرار بود. با اعمال حرارت توسط کوره‌ای القایی واکنش در مخلوط گرم‌زای انجام شد. استفاده از کوئل کوره القایی امکان گرمایش سریع جزء فولادی نمونه و همچنین قالب گرافیتی احاطه کننده اجزای مورد اتصال را فراهم کرد که این اجزا به نوبه خود حرارت لازم جهت شروع واکنش در مخلوط فشرده پودری را با انتقال سریع حرارت به آن تأمین کردند. تعبیه فنری جهت اعمال فشار محوری به سه جزء مورد اتصال همزمان با وقوع واکنش گرم‌زای، متراکم کردن محصول واکنش سنتز و بهبود تماس بین سطوح را میسر ساخت. با آزمایش‌هایی با ثوابت سختی مختلف، فنر با مقدار ثابت سختی kg/mm $K=3/63$ انتخاب و میزان فشردگی فنر (Δx) برحسب میلی‌متر با توجه به مقدار ثابت سختی آن به‌نحوی تنظیم شد که نیروی اعمالی به نمونه‌ها (F) برابر با ۳۰ kg باشد. حرارت‌دهی به نمونه‌ها توسط کوره القایی، فقط تا زمان شروع واکنش سنتز احتراقی صورت گرفت و به محض آغاز واکنش در مدت چند ثانیه، کوره خاموش شده

و در نهایت به این نتیجه رسیدند که کاهش ضخامت مخلوط پودری فشرده شده نتایج بهتری را بر روی خواص اتصال خواهد داشت [۷].

در تحقیق حاضر، پودرهای عناصر نیکل و تیتانیوم به عنوان عناصر اولیه مورد استفاده برای تولید ترکیب بین-فلزی NiTi در ناحیه فصل مشترک جهت اتصال‌دهی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. در دیاگرام تعادلی دو‌تایی Ni-Ti سه ترکیب بین‌فلزی NiTi، NiTi₂ و Ni₃Ti وجود دارد. از میان ترکیبات تعادلی این سیستم، فاز میانی NiTi با توجه به خاصیت حافظه‌داری، زیست-سازگاری و سوپرالاستیسیته بیشترین اهمیت را در صنعت داراست [۸]. هدف از انجام این پژوهش بررسی امکان-پذیری ایجاد اتصال فولاد - کاربید تنگستن با استفاده از فرآیند سنتز احتراقی جهت تشکیل NiTi بوده است. برای نخستین بار اعمال نیروی فشاری محوری همزمان با انجام واکنش‌های گرم‌زای جهت ترغیب اتصال مورد استفاده قرار گرفته است. برای ارزیابی مکانیزم اتصال اجزا به یکدیگر، نفوذ عناصر و پیوندهای تشکیل شده در فصول مشترک با استفاده از آنالیزهای عنصری و وریزساختاری بررسی شد. فشار اعمالی به نمونه‌ها همزمان با فرآیند اتصال‌دهی، چسبندگی مناسبی بین ترکیب بین‌فلزی NiTi و دو جزء مورد اتصال فراهم آورده، شرایط لازم برای ایجاد اتصالی با کیفیت مناسب را تأمین می‌کند.

مواد و روش‌ها

نمونه‌های استوانه‌ای شکل فولاد VCN-150 و کاربید سمانته (WC-8Co) با قطر ۱۲ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر به عنوان قطعات مورد اتصال و پودرهای نیکل و تیتانیوم تجاری به‌عنوان اتصال‌دهنده مورد استفاده قرار گرفتند. ترکیب شیمیایی فولاد VCN-150 و کاربید به ترتیب در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است. مشخصات پودرهای اولیه مورد استفاده نیز در جدول (۳) قابل مشاهده است. به منظور انجام واکنش سنتز احتراقی جهت اتصال قطعات فولاد و کاربید تنگستن به یکدیگر، نسبت مولی اختلاط پودر نیکل و تیتانیوم متناسب با ترکیب بین‌فلزی NiTi و برابر با ۱:۱ انتخاب شد. در ادامه برای دستیابی به قرص‌هایی استوانه‌ای شکل از مخلوط پودری نیکل و تیتانیوم، مقادیر عناصر پودری مورد نیاز از

متالوگرافی قرار گرفتند. پس از آن به منظور مشخصه‌یابی نمونه‌ها از دستگاه پراش پرتو ایکس مدل Bourevestnik-DRON8 با تابش Cuka ($\lambda = 1.5412 \text{ \AA}$) و میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN مدل VEGA III مجهز به طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) استفاده شد.

واکنش به صورت خودبخودی ادامه یافت. شکل (۱) تصویری شماتیک از اجزای تشکیل‌دهنده سامانه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. پس از ایجاد اتصال، نمونه‌ها به منظور بررسی‌های ریزساختاری توسط وایرکات مقطع طولی به ابعاد 22×12 زده شده و مورد آماده‌سازی

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد VCN-150

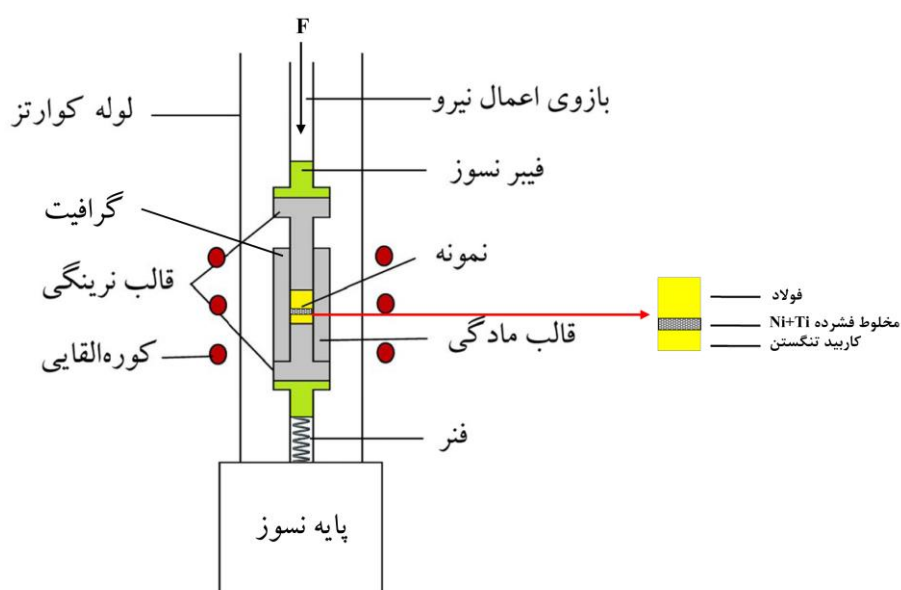
عنصر	C	Si	Mn	Mo	P	Cr	Ni
درصد وزنی	۰/۴	۰/۳	۰/۵	۰/۲۵	۰/۰۱	۱/۴	۱/۳

جدول ۲- ترکیب شیمیایی کاربید تنگستن (WC-8Co)

عنصر	W	Co	C	Fe	Ti	سایر عناصر
درصد وزنی	۸۲/۳	۴/۹۱	۱۱/۹۵	۰/۵	۰/۳۳	۰/۰۱

جدول ۳- مشخصات پودرهای عنصری نیکل و تیتانیم

ماده اولیه	اندازه ذرات پودر (μm)	درجه خلوص (%)
Ni	<۳	۹۹,۵
Ti	<۴۵	۹۹,۹



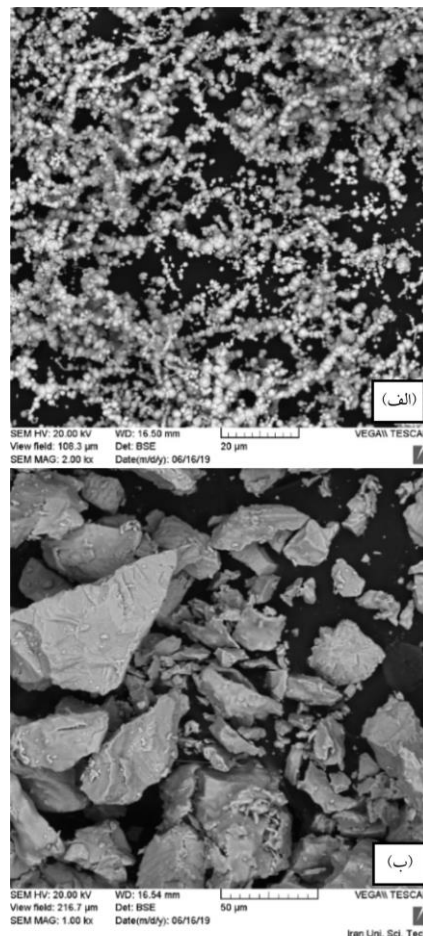
شکل ۱- شماتیک سامانه مورد استفاده برای اتصال

نتایج و بحث

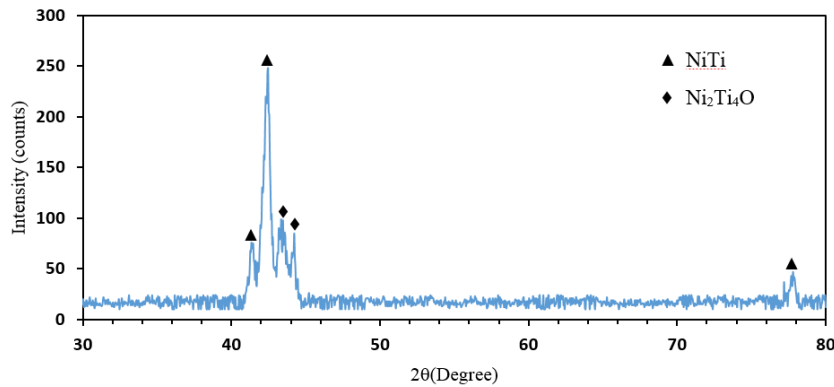
استاندارد (۸۹۹-۱۸) به عنوان فاز غالب و مقادیری فاز Ni_2Ti_4O (شماره کارت استاندارد ۶۹۴-۵) بود. با توجه به تشابه پیک‌های استاندارد دیفراکتومتری مربوط به Ni_2Ti_4O با ترکیب بین‌فلزی $NiTi_2$ (شماره کارت استاندارد ۸۹۸-۱۸) تشخیص قطعی فاز ثانویه تشکیل شده از روی آنالیز دیفراکتومتری میسر نیست. با این حال تحقیقات پیشین نشان داده است که به‌ویژه در صورت ریزدانه بودن نیکل و فراهم بودن سطوح برای اکسیداسیون، سطح ذرات پودر تا حدودی اکسید شده و ترکیبات اکسیدی تشکیل شده از جمله اکسید مخلوط Ni_2Ti_4O ، به عنوان مکان‌هایی برای جوانه‌زنی $NiTi_2$ عمل می‌کنند [۹]. با توجه به قابلیت بالای نیکل و تیتانیوم برای اکسیداسیون، حضور $NiTi_2$ در ریزساختار $NiTi$ اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. تشکیل فاز $NiTi_2$ علاوه بر قطعات $NiTi$ تولید شده به روش‌های مختلف متالورژی پودر، در ساختارهای ریختگی $NiTi$ نیز گزارش شده است [۱۱، ۱۰].

در شکل ۲ تصاویر SEM مربوط به پودرهای نیکل و تیتانیوم مورد استفاده جهت اتصال نمونه‌های فولاد و کاربید تنگستن نشان داده شده است. این پودرها پس از توزین در مقادیر محاسبه شده ($Ni: 0/62 \text{ gr}$, $Ti: 0/51 \text{ gr}$) جهت رسیدن به نسبت مولی $Ni:Ti=1$ ، به منظور تولید قرص‌هایی با اندازه مشخص پرس شده و در فرآیند اتصال‌دهی مورد استفاده قرار گرفتند. چنانکه اشاره شد در این تحقیق هدف بررسی امکان‌سنجی برقراری اتصال بین فولاد و کاربید تنگستن با استفاده از واکنش‌های سنتز احتراقی در قرص گرم‌مازا در شرایط بهینه دمایی همراه با نیروی فشاری اعمالی در راستای محور طولی اجزای اتصال می‌باشد.

به منظور شناسایی فازهای تشکیل شده در مخلوط پودری فشرده شده در حین اتصال، نمونه مقطع زده و آنالیز پراش اشعه ایکس بر روی آن انجام شد. نتایج به دست آمده (شکل ۳) نشانگر وجود فاز $NiTi$ (شماره کارت



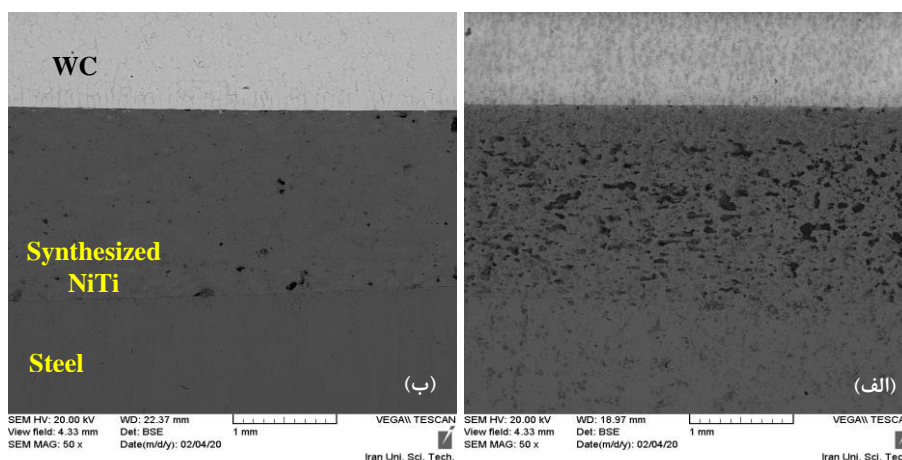
شکل ۲- تصاویر SEM پودرهای اولیه مورد استفاده در لایه اتصال، (الف) Ni (3μm)، (ب) Ti (45μm)



شکل ۳- آنالیز پراش اشعه ایکس قرص NiTi سنتز شده

در اثر مهاجرت اتمی نسبت داده شده است [۱۲]. اعمال فشار محوری به اجزاء در حال اتصال همزمان با رخ دادن واکنش و پیش از انجماد کامل محصول، همانطور که در قسمت (ب) از شکل ۴ مشخص است به حذف تخلخل در محصول و ایجاد تماس مطلوب بین سطوح کمک می‌کند. با وجود این در مرکز لایه اتصال در همه نمونه‌ها درجات متفاوتی از تخلخل مشاهده شد که این موضوع می‌تواند به دلیل متأخر بودن انجماد در منطقه مرکزی لایه اتصال و احتباس گازها و پرنشیدن این ناحیه توسط مذاب باشد. گرمایش سریع به نحوی که بدون حرارت‌دهی شدید اجزاء اتصال و بروز ذوب به‌ویژه در قطعه فولادی صرفاً قرص گرم‌مازا مشتعل شود موجب عدم بروز تخریب و اعوجاج در قطعات مورد اتصال و ایجاد فصل مشترکی یکپارچه می‌گردد.

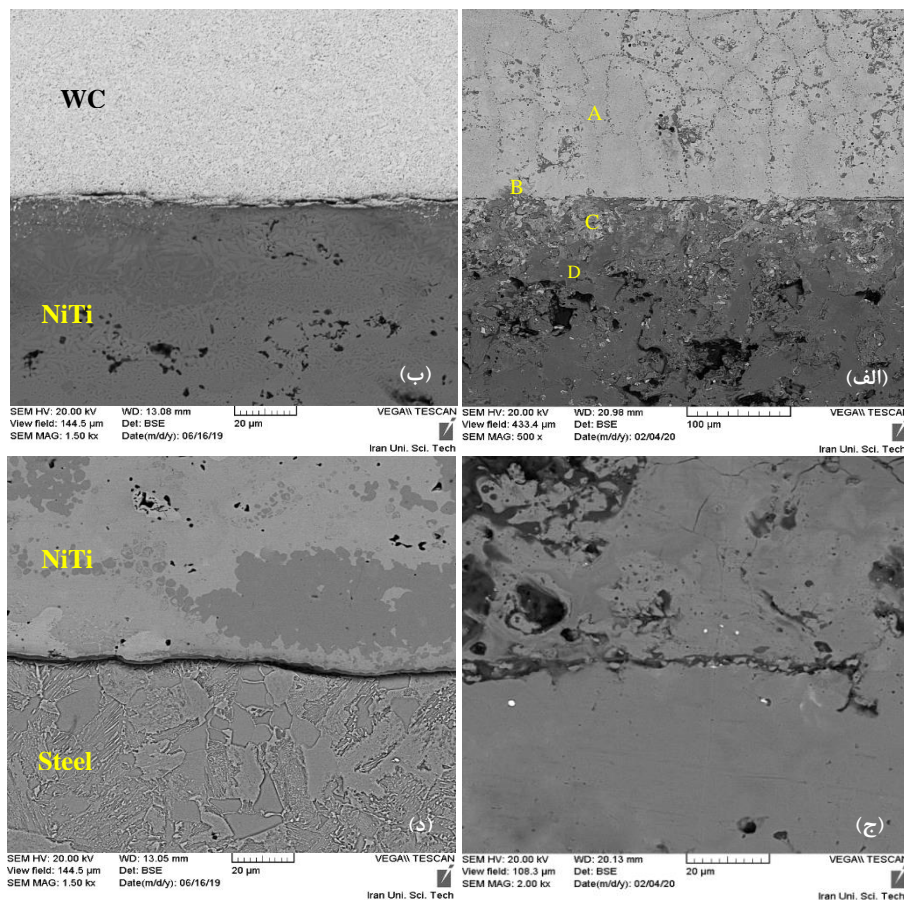
نمونه‌ها پس از اتصال‌دهی مقطع زده شده و متالوگرافی و پولیش شدند و پس از آن توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، تصاویری با بزرگنمایی‌های مختلف از فصل مشترک اجزا تهیه شد. در شکل ۴، تصاویر SEM فصول مشترک اجزای اتصال با لایه اتصال- دهنده قابل مشاهده است. در این تصویر به‌طور نمونه نشان داده شده است که در صورت کاهش ثابت سختی فتر نسبت به مقدار مورد استفاده در این آزمایش‌ها ($K=3/63 \text{ kg/mm}$) میزان تخلخل در لایه محصول افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد (شکل ۴ الف)). تخلخل ویژگی ذاتی محصولات سنتز احتراقی بوده و به عوامل مختلفی از جمله تخلخل اولیه پس از فشرده کردن مخلوط پودری، اختلاف حجمی مولی محصولات با عناصر اولیه، آزاد شدن گازهای جذب شده روی ذرات پودر واکنشگر در حین واکنش، تبخیر ناخالصی‌های فرار و همچنین اثر کرکندال



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی نشان‌دهنده اتصال NiTi سنتز شده به کاربید تنگستن و فولاد و تأثیر فشار اعمالی بر کاهش تخلخل در لایه اتصال، (الف) کاهش نیروی اعمالی (ب) افزایش نیروی اعمالی

استفاده از حالت خودپیشرونده (SHS) امکان فرار حفرات تشکیل شده و احتباس آن‌ها در فصول مشترک و وقوع انفصال در این نواحی وجود دارد. با تشکیل ناحیه‌ای واکنشی در سرتاسر فصل مشترک کاربید/ NiTi و نفوذ اجزاء کاربید در داخل فاز NiTi، در همه نمونه‌ها اتصالی یکپارچه با چسبندگی مناسب برقرار شده است. با توجه به مشکلات ترشوندگی کاربید توسط فیلرهای متداول در فرآیندهایی مانند لحیم‌کاری، لایه واسط NiTi می‌تواند به-عنوان یک پرکننده مناسب در این فرآیند مورد استفاده قرار گیرد. فصل مشترک فولاد/NiTi در این نمونه‌ها نیز اتصالی با کیفیت قابل قبول را نشان می‌دهد. بررسی میکروسکوپی لایه اتصال توسط SEM-EDS، وجود زمینه-ای از NiTi با درصد‌های متفاوت نیکل (فاز روشن در لایه میانی در شکل ۵ (د)) به همراه NiTi₂ (فاز تیره) را مشخص می‌کند.

با توجه به دمای بالای فرآیند سنتز احتراقی در این نمونه‌ها مذاب حاصل سیالیت کافی جهت پر کردن خلل و فرج ناشی از واکنش سنتز احتراقی در لایه اتصال و همچنین عیوب و برآمدگی‌های سطح اتصال در نمونه‌های کاربید تنگستن و فولاد را داراست. پدیده نفوذ متقابل عناصر در فصل مشترک‌های اتصال می‌تواند اتصالی با کیفیت مطلوب را نتیجه دهد. تصاویر میکروسکوپی مربوط به فصل مشترک‌های اتصال کاربید/ NiTi و فولاد/ NiTi نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش در شکل ۵ ارائه شده است. علیرغم حضور تخلخل در لایه سنتز شده، چنانکه در تصاویر میکروسکوپی این نمونه‌ها مشاهده می‌شود فصل مشترکی پیوسته و عاری از حفرات بزرگ بین NiTi و اجزای اتصال ایجاد شده است. تشکیل چنین فصل مشترکی به دلیل گرمایش یکنواخت و سریع قرص گرمازا و انجام واکنش سنتز احتراقی به صورت حجمی در سراسر قسمت‌های قرص است، در حالیکه در صورت



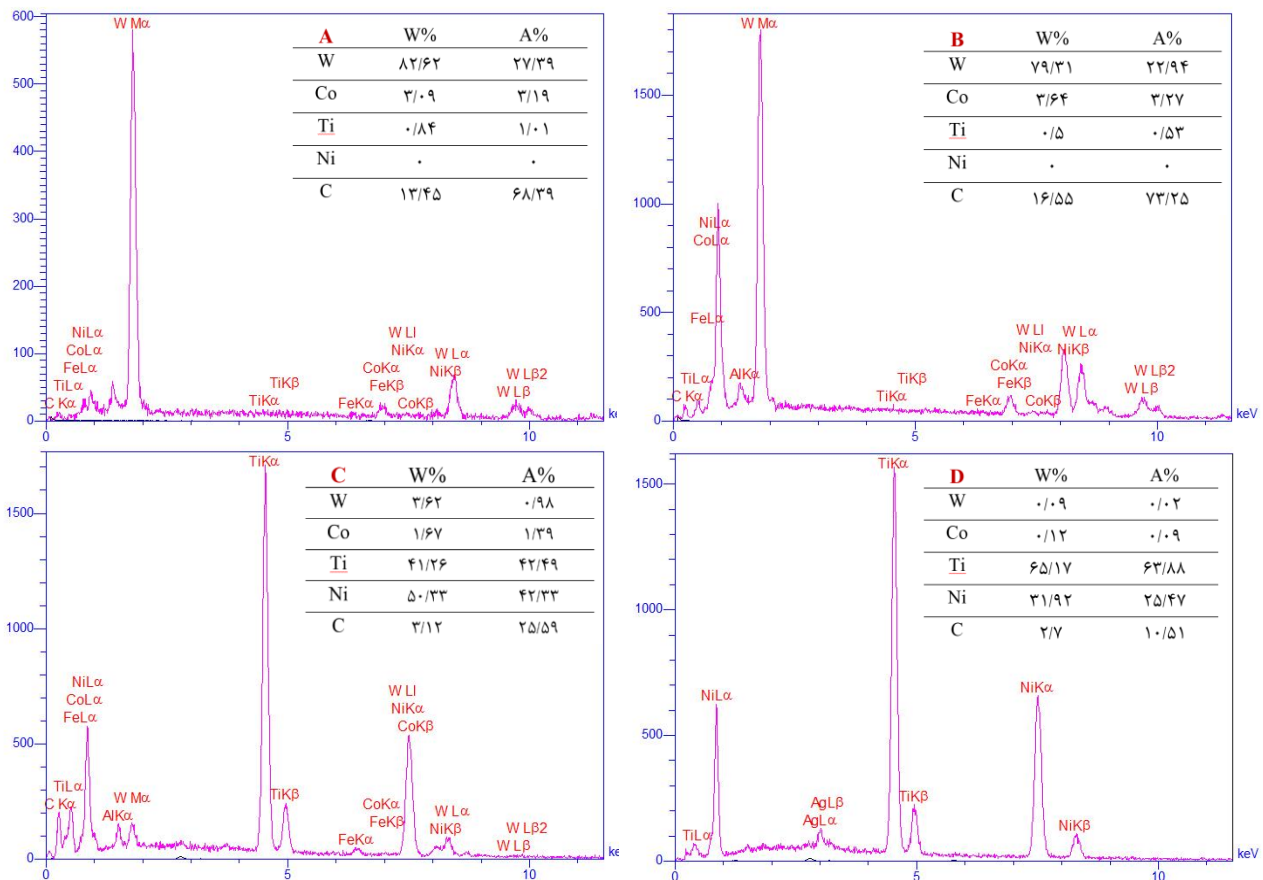
شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی نشان‌دهنده کیفیت چسبندگی در فصل مشترک (الف) و (ب) کاربید/ NiTi و (ج) و (د) فولاد/ NiTi

باعث افزایش استحکام اتصال می‌شود. در شکل ۸، نتیجه-ی آنالیز EDS خطی، ناحیه واکنشی مربوط به فصل مشترک کاربید را نشان می‌دهد. نفوذ عنصر W در لایه‌ی اتصال NiTi و همچنین نفوذ معکوس عناصر نیکل و تیتانیوم از لایه اتصال و تشکیل یک ناحیه نسبتاً وسیع واکنشی قابل مشاهده است. امتزاج این عناصر در نواحی مجاور فصل مشترک موجب بهبود اتصال در این فصل مشترک می‌شود.

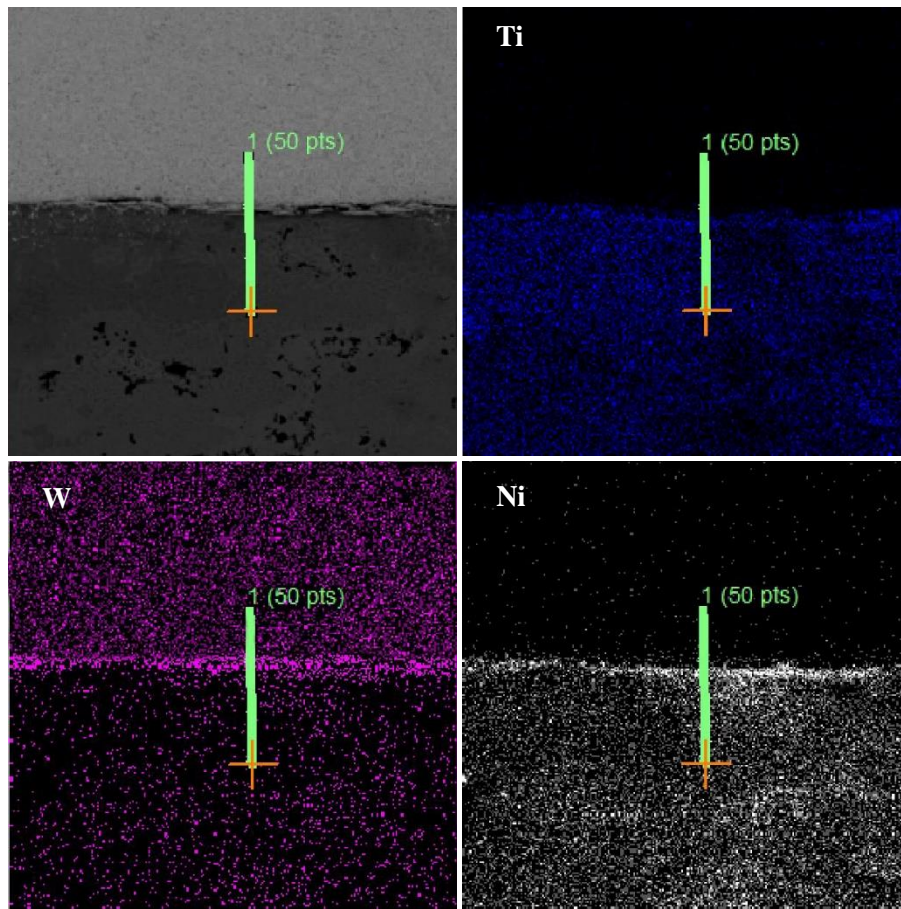
همچنین در شکل ۹ با بررسی نقشه توزیع عناصر در فصل مشترک فولاد/ NiTi شکل ۵ (د)، ملاحظه می‌شود که عنصر تیتانیوم به همراه آهن تجمع بیشتری را در فصل مشترک اتصال داشته است. در اینجا نیز تشکیل پیوند در فصل مشترک اتصال به دلیل دمای بالا و ذوب موضعی محصول و مهیا بودن شرایط مناسب جهت نفوذ و برقراری اتصال بوده است.

در شکل ۶ نتایج حاصل از آنالیز عنصری نقاط A، B، C و D مشخص شده در قسمت (الف) از شکل ۵ ارائه شده است. بررسی این نتایج نفوذ عنصر تنگستن و همچنین کبالت که به عنوان بایندر فلزی در فرآیند ساخت قطعات کاربیده‌های سمانته استفاده می‌شود [۱۳] در داخل فاز NiTi و همچنین نفوذ تیتانیوم در ناحیه کاربید تنگستن را اثبات می‌کند.

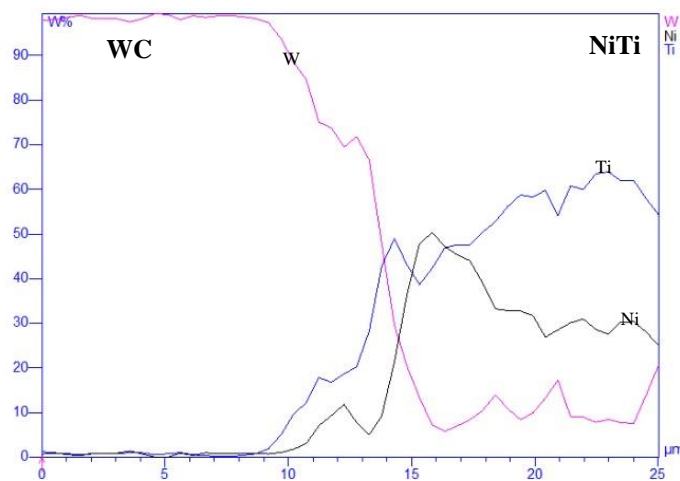
در شکل ۷ نتایج مربوط به نقشه پرتو ایکس توزیع عناصر در فصل مشترک کاربید/ NiTi شکل ۵ (ب) ارائه شده است. تجمع عناصر تنگستن و نیکل در این فصل مشترک که احتمالاً به دلیل تمایل بیشتر نیکل به تشکیل پیوند با عنصر تنگستن در دمای بالای فرآیند بوده است به خوبی قابل مشاهده است. تشکیل پیوند میان عناصر تشکیل دهنده اجزای اتصال در فصل مشترک اتصال به جهت بهبود نفوذ متقابل عناصر و شرایط چسبندگی،



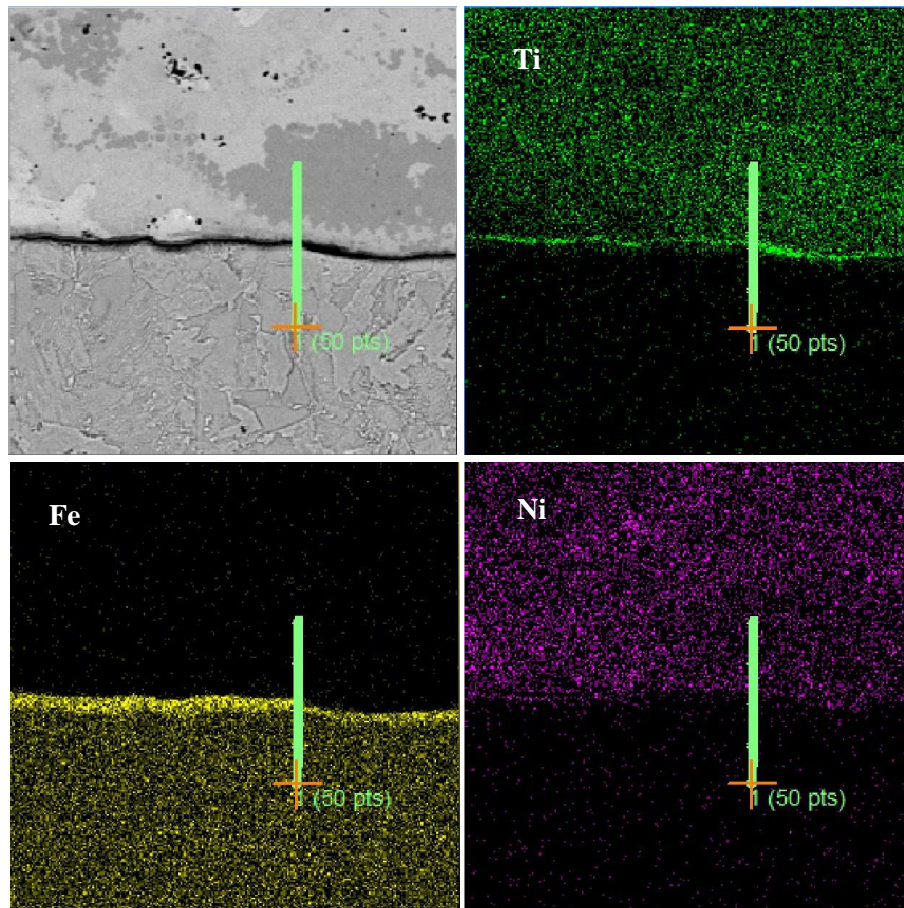
شکل ۶- آنالیز عنصری نقاط A، B، C و D در قسمت (الف) از شکل ۵



شکل ۷- نقشه اشعه ایکس توزیع عناصر در فصل مشترک کاربید / NiTi در قسمت (ب) از شکل ۵



شکل ۸- نتیجه‌ی آنالیز EDS خطی از فصل مشترک کاربید / NiTi در قسمت (ب) از شکل ۵



شکل ۹- نقشه اشعه ایکس توزیع عناصر در فصل مشترک فولاد/ NiTi در قسمت (د) از شکل ۵

قطعات مورد اتصال و NiTi سنتز شده، نهایتاً موجب اتصالی نسبتاً یکپارچه بین سه قطعه می‌گردد.

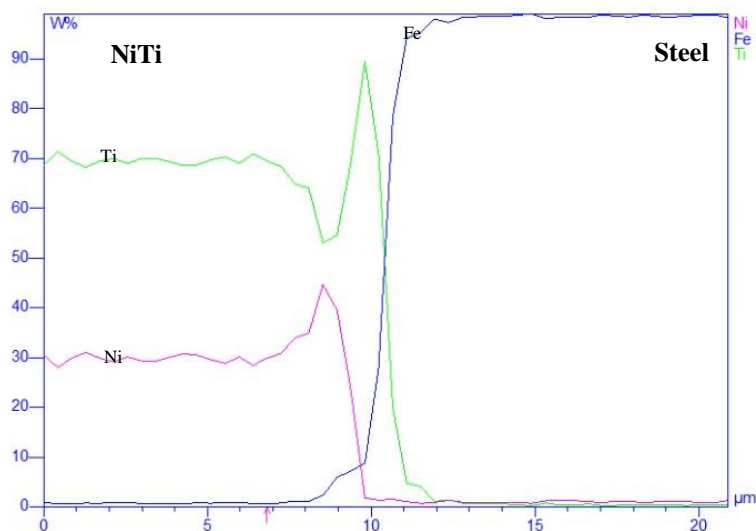
نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از اصول فرآیند سنتز احتراقی امکان برقراری اتصال بین قطعات استوانه‌ای شکل از کاربید تنگستن (WC-8Co) و فولاد VCN-150، با استفاده از قرصی متشکل از مخلوط گرمای Ni+Ti مورد بررسی قرار گرفت. سه قطعه مورد اتصال درون قالبی گرافیتی تحت گرمایش سریع القایی قرار گرفتند. همزمان با وقوع واکنش سنتز احتراقی در قرص واسطه و تشکیل فاز NiTi، افزایش دما و تشکیل فازهای مذاب موجب پیوند بین اجزای اتصال گردید. اعمال فشار همزمان با انجام واکنش موجب کاهش تخلخل پیش از انجماد کامل محصول واکنش و ایجاد فصل مشترک‌هایی یکپارچه به-ویژه بین NiTi و قطعات کاربید سمانته شد، که نشان می-دهد این فاز طی فرآیند سنتز می‌تواند به‌طور مؤثری نقش

کم بودن خلل و فرج و یکپارچگی فصل مشترک به-ویژه در اتصال کاربید تنگستن به NiTi، نشان‌دهنده امکان‌پذیری استفاده از NiTi به‌عنوان واسطه اتصال قطعات غیرهمجنس فولاد-کاربید است. شکل ۱۰ آنالیز EDS خطی مربوط به این فصل مشترک را نشان می‌دهد. نفوذ آهن به سمت NiTi در این تصویر نیز مشاهده می-شود. به دلیل وجود گرادیان‌های غلظت نیکل و تیتانیوم بین دو قسمت، مهاجرت این عناصر به سمت فصل مشترک آغاز شده، ولی نفوذ کامل نشده و موجب انباشتگی نسبی این عناصر در پشت فصل مشترک شده است. دلیل این امر می‌تواند ساختار فریتی-پرلیتی فولاد VCN باشد که امکان محدودی را برای نفوذ عناصر جانشین فراهم می‌کند. بر مبنای نتایج به‌دست آمده، می-توان نتیجه گرفت که فرآیند سنتز احتراقی با تولید حرارت زیاد و تأمین دمای بسیار بالا، تشکیل فازهای مذاب و پیوند بین اجزا، ایجاد ترشوندگی مناسب سطوح و فراهم کردن بستری مناسب برای نفوذ متقابل عناصر بین

سنتز شده وقوع اتصال را امکان پذیر می کند. دمای بالای فرآیند سنتز احتراقی، سیالیت مناسب مذاب تشکیل شده در لایه اتصال در تماس با کاربید و فولاد و ترشوندگی مناسب سطوح اتصال با مذاب NiTi به دلیل عملیات سطحی انجام شده روی سطوح اتصال قبل از فرآیند اتصال دهی، منجر به کاهش تخلخل در لایه اتصال و چسبندگی و نفوذ در هر دو فصل مشترک و نهایتاً برقراری اتصالی قابل قبول بین قطعات غیرهمجنس فولاد و کاربید تنگستن گردید.

پرکننده (فیلر) را ایفا کند. نتایج حاصل از پراش اشعه ایکس نشان دهنده تشکیل فاز NiTi در قرص سنتز شده بود. همچنین نتایج مربوط به آنالیز EDS نیز تشکیل فاز NiTi به عنوان فاز غالب و فاز NiTi₂ به عنوان فاز ثانویه را تأیید کرد. نتایج آنالیز EDS خطی و نقشه توزیع عناصر در فصل مشترک های اتصال این نمونه، نشان داد که ایجاد اتصال در فصل مشترک کاربید/NiTi به دلیل نفوذ عناصر کبالت و تنگستن در ترکیب NiTi سنتز شده و نفوذ عناصر نیکل و تیتانیوم به سمت مقابل است. همچنین در فصل مشترک NiTi / فولاد، نفوذ آهن به سمت NiTi



شکل ۱۰- نتیجه‌ی آنالیز EDS خطی از فصل مشترک فولاد/NiTi در قسمت (د) از شکل ۵

References:

[1] A. S. Mukasyan, J. D. E. White, "Combustion Joining of Refractory Materials" *Int. J. Self. Propag. High Temp. Synth.* 2007, 16(3), 154–168.

[۲] م، بدرلو، س. ع. طیبی فرد، م. ذاکری، سنتز نانو کامپوزیت (MoSi₂-20%TiC) به روش سنتز احتراقی خود گستر فعال شده مکانیکی (MASHS)، مواد نوین، دوره ۷، شماره ۲۵، پاییز ۱۳۹۵، ص ۸۶-۷۱.

[۳] آ، کریمی، ح. بهاروندی، ح. عبدی زاده، بررسی تأثیر مقدار و منبع کربن بر سنتز نانوساختار Ti₂AlC به

روش سنتز خود احتراقی دما بالا، مواد نوین، دوره ۸، شماره ۲۹، پاییز ۱۳۹۶، ص ۶۸-۵۷.

[4] H. Kalantari, M. Adeli, M. R. Aboutalebi, "Investigation of the Effect of Foaming Agent on the Fabrication of NiTi Foams Using the Self-Propagating, High-Temperature Synthesis Process", *Met. Mater. Trans. B.* 2019, 50, 2566–2573.

[5] I. Voiculescu¹, V. Geanta, H. Binchiciu, D. Iovanas, R. Stefanoiu, "Dissimilar Brazed Joints between Steel

and Tungsten Carbide”, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 209 (2017) 1-7.

[6] A. Elrefaey, A. Monem, W. Tillmann. “Microstructure and Mechanical Properties of Brazed Titanium/Steel Joints” J. Materials Sci. 2007, 42(23), 9553-9558.

[7] V. A. Shcherbakov, “SHS Welding of Hard Alloy and Steel”, Key Eng. Mater. 2002, 217, 215-218.

[8] N. Farjam, M. Nematollahi, M. Taheri-Andani, M. J. Mahtabi, M. Elahinia, “Effects of Size and Geometry on the Thermomechanical Properties of Additively Manufactured NiTi Shape Memory Alloy”, Int. J. Adv. Manuf. Tech. 2020, 107, 3145–3154.

[9] H. C. Yi, J. J. Moore, “Combustion Synthesis of TiNi Intermetallic Compounds, Part III Microstructural

Characterization”, J. Mater. Sci. 1992, 27, 5067-5072.

[10] E. Dong, W. Yu, Q. Cai, L. Cheng, Z. Ning, J. Shi, “High-Temperature Deformation Behavior of TiNi-Nb Hypoeutectic Alloy”, Mater. Sci. Eng. A. 2019, 764, 138228.

[11] C. Velmurugan, V. Senthilkumar, P. S. Kamala, “Microstructure and Corrosion Behavior of NiTi Shape Memory Alloys Sintered in the SPS Process”, Int. J. Min. Met. Mater., 2019, 26, 1311-1321.

[12] K. Morsi, “The Diversity of Combustion Synthesis Processing: A Review”, J. Mater. Sci., 2012, 47, 68-92.

[13] B. Ma, X. Wang, C. Chen, D. Zhou, P. Xu, X. Zhao, “Dissimilar Welding and Joining of Cemented Carbides”, Metals 2019, 9, 1-21.