

اثر اصلاح شیمیایی سطح بر چسبندگی آلیاژ NiTi برای ساخت یو کامپوزیت فلز / پلیمر هوشمند

ناهد حسن زاده نعمتی^{۱*}، سید خطیب الاسلام صدرنژاد^۲ و محمد تقی خراسانی^۳

۱- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده مهندسی پزشکی، تهران، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی و علم مواد، تهران، ایران

۳- دانشیار، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی، تهران، ایران

*hasanzadeh@srbiau.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۳/۲۷)

چکیده

اخیراً با توجه به روند رو به رشد استفاده از کامپوزیت‌های هوشمند NiTi/پلیمر در کاربردهای صنعتی و پزشکی، بهبود استحکام چسبندگی در فصل مشترک دو جزء سازنده توجه محققین زیادی را به خود جلب نموده است. اصلاح شیمیایی سطح یکی از راه‌های پیشنهادی است که در پژوهش حاضر در مورد کامپوزیت NiTi/سیلیکون بررسی شده است. نتایج آزمایش Pull-Out انجام شده بر نمونه‌ها نشان می‌دهد که استفاده از محلول‌های اسیدی و بازی H_2O_2 و NaOH می‌تواند اتصال بین زمینه پلیمری و نوارهای فلزی را به میزان ۱۱٪ افزایش دهد. تصاویر SEM و آنالیز EDS گرفته شده از سطح آلیاژ نشان می‌دهد حضور لایه تیتانات سدیم عامل افزایش استحکام چسبندگی بوده است. ایجاد لایه اکسیدی روی سطح هم اثری مشابه دارد و موجب افزایش استحکام چسبندگی از ۳۳۲/۹۰ به ۶۲۵/۵۸ کیلو پاسکال شده است. افزایش زبری سطح و اصطکاک در فصل مشترک در اثر اصلاح شیمیایی سطح فلز می‌تواند در ساخت کامپوزیت‌های هوشمند NiTi/سیلیکون برای استفاده در ماهیچه‌های مصنوعی مورد بهره‌برداری قرار بگیرد.

واژه‌های کلیدی:

اصلاح شیمیایی سطح، کامپوزیت هوشمند، سیلیکون، آلیاژ نیکل - تیتانیم.

۱- مقدمه

فصل مشترک بین SMA^۱ (آلیاژ حافظه‌دار) و زمینه و در نتیجه استحکام چسبندگی در ساختارهای کامپوزیتی تأثیر بسزایی در کارایی آن‌ها دارد. یکی از مهمترین مسائلی که می‌تواند کاربرد این کامپوزیت‌ها را محدود کند، گسستگی پیوند در فصل مشترک می‌باشد [۳]. مطالعات نشان داده است برای رسیدن به کامپوزیتی با کیفیت مناسب باید اتصالات شیمیایی و فیزیکی مناسبی در طول فصل مشترک بین زمینه و SMA برقرار گردد [۳]. این اتصالات باید به اندازه‌ای محکم باشد تا تنش‌ها و

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری فلز/پلیمر هوشمند عمدتاً به وسیله عملگرهای حافظه‌دار سیمی [۱] یا نوار [۲] شکل تقویت می‌شوند. همراه شدن خاصیت حافظه‌داری تقویت‌کننده‌های فلزی با خاصیت ویسکوالاستیسیته زمینه پلیمری این مواد مرکب را برای جایگزین شدن بافت‌های بیولوژیکی آسیب دیده مانند ماهیچه‌ها مستعد می‌سازد.

کاربردهایی مانند سیم‌های راهنما، ابزار آندوسکوپی و استنت‌ها نیز مورد توجه قرار گرفته است.

اصلاح شیمیایی سطح با استفاده از محلول‌های اسیدی، بازی و نیز ایجاد لایه اکسیدی سطحی با استفاده از حرارت دادن آلیاژ در اتمسفر کنترل نشده به منظور افزایش چسبندگی آلیاژ NiTi به زمینه سیلیکونی برای تهیه یک بیوکامپوزیت هوشمند فلز/ پلیمر در پژوهش حاضر مورد توجه قرار گرفته است. انتظار می‌رود این کامپوزیت‌ها به دلیل برخورداری بودن از خاصیت فعال‌کنندگی مربوط به بخش فلزی و ویسکوالاستیسیته مربوط به قسمت پلیمری بیشترین کارایی را در جایگزینی ماهیچه‌های آسیب دیده داشته باشند.

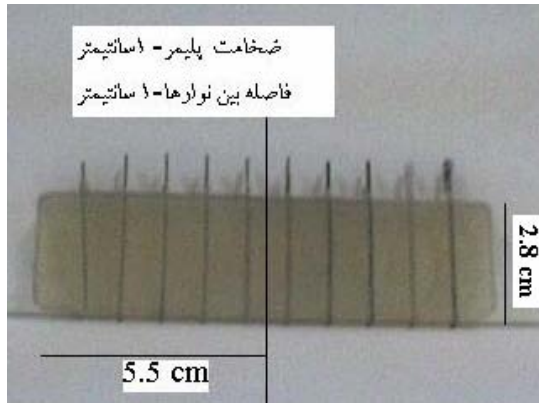
۲- مواد و روش تحقیق

قطعاتی به ابعاد $77 \text{ mm} \times 2 \times 40$ از آلیاژ صفحه‌ای سوپرالاستیک NiTi ساخت شرکت Memory-Metalle آلمان به وسیله وایر کات بریده شدند. سطح تمام نمونه‌ها با استن تمیز شدند تا از هر گونه آلودگی‌های آلی عاری گردند. این قطعات بعد از آنیل انحلالی به مدت ۱ h در دمای 850°C درجه سانتی‌گراد در خلأ 10^{-6} torr به چهار گروه تقسیم شدند. هیچگونه عملیات سطحی بر روی گروه اول نمونه‌ها انجام نشد (نمونه‌های خریداری شده از کارخانه سازنده که فقط تحت فرآیند آنیل انحلالی قرار گرفته بود). این نمونه‌ها با کد ۱ نامگذاری شدند. گروه دوم و سوم نمونه‌ها به مدت ۱۰ min با محلول شیمیایی کروم (۲ ml اسید فلئوئوریدریک ۴۰٪، ۴ ml اسید نیتریک ۴۰٪ و ۹۹۴ ml آب دیونیزه) [۱۱] پولیش شیمیایی گردیدند. سپس گروه دوم نمونه‌ها در محلول H_2O_2 ۳۰٪ با دمای 60°C درجه سانتی‌گراد و گروه سوم در محلول HNO_3 ۳۰٪ با دمای 60°C درجه سانتی‌گراد هر دو به مدت ۲۰ h غوطه‌ور شدند. سپس به مدت ۵ min با آب شستشو و در آن خشک شدند. نمونه‌های هر دو گروه در مرحله دوم بعد از قرارگیری در سود (۱/۲ M) در حال جوش به مدت ۲h، با آب شسته شده و سپس خشک شدند. نمونه‌های اخیر به ترتیب کد ۲ و ۳ نامیده شدند. نمونه‌های

کرنش‌های ایجاد شده در SMA به زمینه محاط منتقل گردد [۴]. در غیر این صورت چسبندگی ضعیف بین آلیاژ و زمینه موجب عدم انتقال تنش و گسستگی جزئی یا کامل آلیاژ از زمینه می‌شود که نهایتاً به ناکارآمدی کامپوزیت می‌انجامد [۵]. اما اگر میزان چسبندگی هم خیلی بالا باشد ترک ایجاد شده در خود رشته‌های تقویت‌کننده (SMA) رشد کرده و شکست ناگهانی در قطعه به وجود می‌آورد. لذا اگر استحکام چسبندگی قدری کاهش یابد انتشار ترک در زمینه با سرعت کمتری رخ خواهد داد [۶].

یکی از عوامل مؤثر بر چسبندگی زمینه به تقویت‌کننده‌های SMA آماده‌سازی سطح می‌باشد. اچ کردن با اسید، ایجاد پوشش پلیمری و ماسه پاشی از جمله این روش‌ها است. پین [۷] نشان داده است که سیم‌های NiTi ماسه پاشی شده در مقایسه با سیم‌های آماده شده با روش‌های دیگر چسبندگی بهتری به زمینه اپوکسی / گرافیت ایجاد می‌کند. چرا که کندگی مکانیکی با ایجاد زبری می‌تواند باعث افزایش چسبندگی شود [۵]. اما این روش آماده‌سازی در مورد ذرات میکرونی یا نانویی NiTi روش مناسبی نمی‌باشد. اضافه نمودن عامل‌های شیمیایی مانند گروه‌های سیلان به هنگام پلیمریزاسیون در این مورد می‌تواند راه حل مناسب‌تری باشد [۴]. همینطور مطالعات نشان داده است که علاوه بر موارد مذکور به کارگیری عوامل فعال‌کننده مانند سیلان‌ها و تیتانات‌ها در سطح، انجام عملیات‌های ترکیبی پایانی مثل تابش لیزر، پلاسما، کاشت یون، ایجاد سختی توسط گاز نیتروژن و فرآیندهای غیرفعال‌سازی شیمیایی از دیگر عوامل افزایش چسبندگی آلیاژ به زمینه می‌باشد [۵].

ترکیب نمودن آلیاژ NiTi با پلیمر علاوه بر ایجاد یک کامپوزیت هوشمند از رها شدن نیکل که عنصری سمی و سرطان‌زاست [۸] نیز جلوگیری می‌کند. کامپوزیت‌های ساخته شده از این طریق به شرط تهیه شدن از پلیمرهای منعطف و نرمی مانند سیلیکون که از زیست‌سازگاری مناسبی نیز برخوردار است [۹] قابلیت استفاده در ساخت ماهیچه مصنوعی [۱۰] مانند اسفنکترهای مصنوعی را داراست. همچنین ایجاد روکش‌های سیلیکونی بر آلیاژ NiTi در



شکل (۱): بلوک پلیمری حاوی نوارهای فلزی.



شکل (۲): نحوه بستن نمونه به فک دستگاه برای انجام
آزمون Pull-Out.

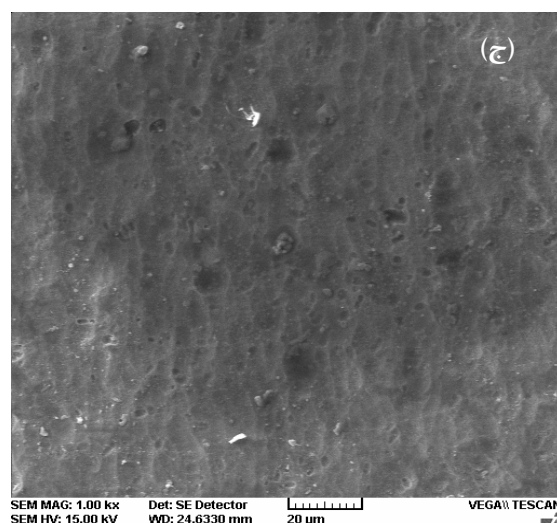
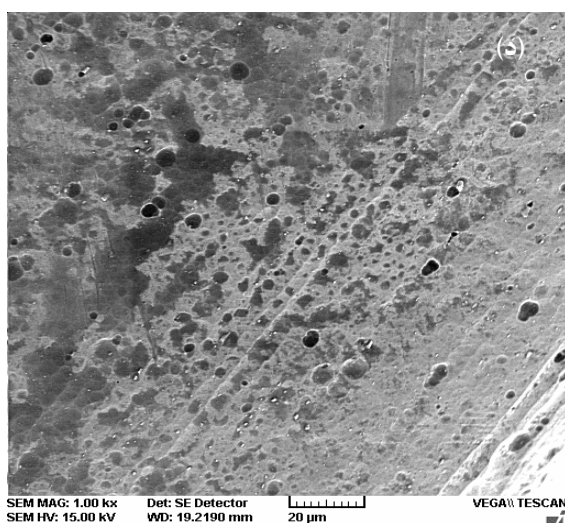
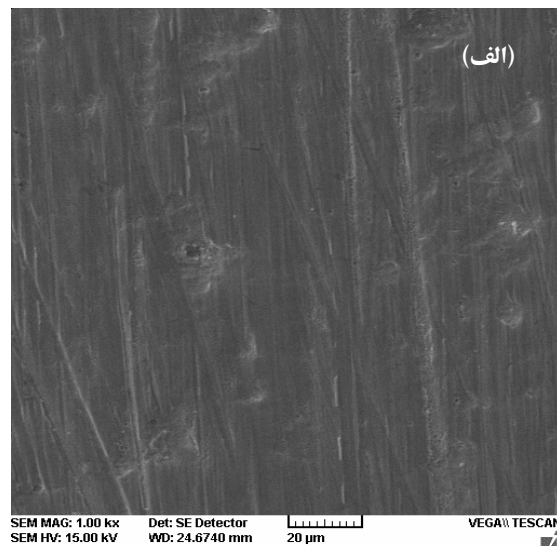
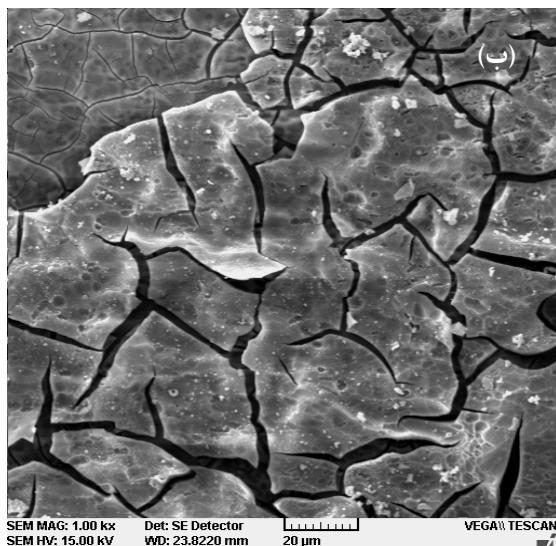
سطح تیتانیم و آلیاژهای آن بعد از قرارگیری در معرض پراکسید هیدروژن و سود، اکسیدی شده و ظاهری پوسته پوسته و طوسی رنگ پیدا می کند [۱۲]. این موضوع در شکل (۳-ب) که متعلق به نمونه کد ۲ می باشد، کاملاً نمایان است. لایه پولکی ایجاد شده لایه ای ترکنده و چسبنده است [۱۲] که می تواند افزایش چسبندگی ترکیبات کلسیم فسفاتی [۱۳] و پلیمری را به همراه داشته باشد. نتایج آنالیز EDS انجام شده بر روی آلیاژ که در جدول (۱) آمده است اکسیدی بودن پوسته های روی سطح را تأیید می نماید و همینطور نشان می دهد که از میزان نیکل سطح نسبت به حالت اصلاح نشده به شدت کاسته شده است. غوطه وری آلیاژ در اسید نیتریک و سپس در سود باعث شده است تا در سطح آن خلل و فرج هایی ایجاد شود که سطح را

گروه چهارم (کد ۴) به مدت ۲h در دمای ۳۵۰ درجه سانتی گراد در کوره تحت اتمسفر کنترل نشده حرارت دیدند و در دمای محیط سرد شدند تا سطح شان اکسیدی شود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM^۳ نمونه ها به وسیله میکروسکوپ مدل VEGA/TESCAN تهیه شدند. آنالیز عنصری زمینه و رسوبات موجود در نمونه ها نیز توسط دستگاه EDS^۴ ساخت شرکت RONTec آلمان مورد ارزیابی قرار گرفت.

تمام قطعات گروه های چهارگانه در پلیمر سیلیکون ۴۰۱/۶۰ ELASTOSIL[®] ساخت شرکت WACKER آلمان (حاوی ۰/۷٪ وزنی دی کومیل پروکسید) داخل قالب تهیه شده جای گرفتند تا در دمای ۱۷۰ درجه سانتی گراد و فشار ۱۵۰ kgf/cm^۲ به مدت ۱۵ min تحت فرآیند پرس داغ قرار بگیرند. بلوک پلیمری حاوی قطعات NiTi (شکل ۱) بعد از خارج شدن از قالب به مدت ۴ h در آن دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد پخت نهایی شدند. سپس قطعاتی به عرض ۱۰ mm از بلوک پلیمری با همان ضخامت که در وسط آن ها نمونه های فلزی قرار گرفته بودند، جدا شدند تا با استفاده از دستگاه کشش Gotech مدل TCS-۲۰۰۰ ساخت تایوان تحت آزمون Pull-Out قرار بگیرند. برای جلوگیری از اعمال هر گونه فشار به سطح پلیمر، نمونه ها با استفاده از یک قلاب فولادی به فک بالای دستگاه متصل شدند (شکل ۲) و سرفلزی بیرون مانده از بلوک سیلیکونی نیز به وسیله فک دیگر با سرعت ۵ mm/min از بلوک بیرون کشانده شد.

۳- نتایج و بحث

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از کد ۴-۱ نمونه ها در شکل (۳) آورده شده است. خراش های نمایان بر سطح نمونه در تصویر SEM از نمونه کد ۱ (شکل ۳-الف) در هنگام ساخت صفحه های آلیاژی توسط شرکت سازنده ایجاد شده است.



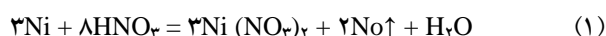
شکل (۳): تصویر SEM از نمونه‌های کد: (الف) ۱، (ب) ۲، (ج) ۳ و (د) ۴.



بر طبق رابطه (۲) یک لایه اکسید تیتانیم توسط اعمال محلول HNO_3 در سطح شکل می‌گیرد. سپس زمانی که آلیاژ در محلول NaOH در حال جوش قرار می‌گیرد، تیتانیم به شکل $\text{HTiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ در می‌آید. بار منفی هیدرات تیتانات ایجاد شده با یون‌های مثبت Na^+ واکنش داده و تیتانات سدیم را شکل می‌دهد. این لایه ایجاد شده آمورف بوده و کریستال‌های بسیار ریزی روی آن تشکیل می‌شود [۱۴]. فرورفتگی‌های ایجاد شده

ناهموار و اسفنجی نموده است (شکل ۳-ج). تخلخل‌های به وجود آمده میکرونی بوده و بین ۲ تا ۶ μm در شکل قابل شناسایی و تخمین است. این فرورفتگی‌ها که حاصل از پدیده خوردگی است می‌تواند باعث افزایش چسبندگی عوامل بیولوژیکی و شیمیایی گردد [۱۴].

وقتی آلیاژ در اسید نیتریک ۳۲/۵ درصد فرو برده می‌شود این نوع واکنش باعث حل شدن Ni در سطح NiTi و تشکیل اکسید تیتانیم توسط واکنش‌های زیر در سطح می‌گردد:



جدول (۱): نتایج آنالیز EDS نمونه‌های کد ۱-۳.

نوع عنصر	کد ۱	کد ۲	کد ۳
اکسیژن	-	۳۱/۰۱	۵/۲۲
تیتانیم	۴۹/۵۴	۴۴/۲۰	۴۶/۴۳
نیکل	۴۸/۴۲	۱۴/۸۴	۴۶/۵۰
سدیم	-	۵/۲۲	۲/۲۳

در اثر خوردگی آلیاژ ناشی از همجواری با اسید نیتریک مناسب‌ترین مکان برای تجمع سدیم موجود در محلول سود می‌باشد. این مناطق مناسب‌ترین محل برای جوانه‌زنی کریستال‌های هیدروکسی آپاتیت می‌باشد [۱۴].

مقایسه بین اشکال (۳-الف و ج) نشان می‌دهد که لایه اکسیدی اسفنجی ایجاد شده در اثر شناور شدن آلیاژ در اسید نیتریک و سود از خشن و زبر بودن سطح آلیاژ اولیه که فقط آیل شده کاسته است (صحت این برداشت را می‌توان از نتایج مندرج در جدول (۲) بررسی کرد).

شکل (۳-د) متعلق به سطح نمونه کد ۴ است که در اثر حرارت دیدن در اتمسفر کنترل‌نشده اکسیدی و زبر شده است.

نمودار نمونه^۵ نیروی چسبندگی / جابجایی آلیاژ NiTi به زمینه سیلیکونی در شکل (۴) آورده شده است. ماکزیم نیروی مشاهده شده در هر نمودار معرف نیروی چسبندگی است [۱۵]. مقادیر نیروها و نیز استحکام چسبندگی نمونه‌ها به زمینه پلیمری که از تقسیم نیروی چسبندگی بر سطح تماس فلز با پلیمر حاصل می‌شود، در جدول (۲) ذکر شده است. همانطور که مشاهده می‌شود استحکام چسبندگی نمونه کد ۲ نسبت به نمونه کد ۱ افزایش یافته است. این افزایش در نتیجه اصلاح شیمیایی نمونه‌های آلیاژی NiTi (کد ۲) با محلول H₂O₂ و سپس سود بوده که باعث ظهور گروه‌های کثیر Ti-OH و کاهش مقدار Ni₂O₃ و Na₂TiO₃ و باقی ماندن فاز NiTi به صورت خلل و فرج‌دار در زمان واکنش با NaOH در سطح آلیاژ حافظه‌دار می‌گردد [۱۳]. لایه اکسیدی تشکیل شده بر نمونه کد ۲ در دماهای بالا تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد پایدار است و می‌تواند در

دماها و رطوبت‌های بالا استحکام‌های بالای پیوندی ایجاد کند [۱۲]. لذا هنگام ترکیب شدن با سیلیکون تحت فرآیند پرس داغ و تشکیل کامپوزیت ماهیت خود را حفظ کرده، چسبندگی فلز به زمینه پلیمری را افزایش می‌دهد.

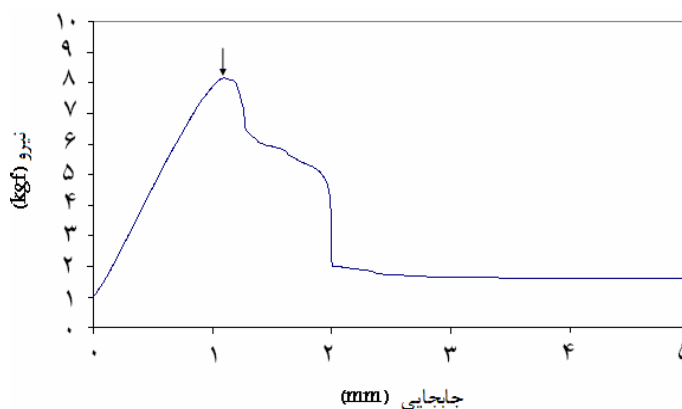
نتایج نشان داد که نرخ جوانه‌زنی آپاتیت روی سطح آلیاژی که چنین تاریخچه اصلاح سطحی را پشت سر گذاشته است با شکل‌گیری گروه‌های Ti-OH کنترل می‌شود. حضور عامل فعال OH روی سطح باعث ایجاد پیوند شیمیایی بین سطح و ترکیبات کلسیم فسفاتی موجود در SBF (محلول شبیه‌سازی شده بدن) می‌گردد [۱۳]. لذا می‌توان انتظار داشت که عامل‌های فعال گروه‌های Ti-OH که به عنوان یک فاکتور کلیدی به منظور تشکیل آپاتیت پذیرفته شده‌اند به وسیله واکنش دادن با زنجیره‌های پلیمری سیلیکون استحکام چسبندگی بین زمینه و تقویت‌کننده‌های فلزی را افزایش دهند.

حضور لایه‌های اکسیدی روی سطح به دلیل ایجاد زبری بالا چسبندگی بین فلز و زمینه را افزایش می‌دهد [۵]، اما در مورد نمونه کد ۲ با توجه به پوسته پوسته بودن لایه اکسیدی و سست بودن آن نقش کم رنگتری دارد.

غیر فعال‌سازی شیمیایی سطح مانند غوطه‌وری آلیاژ در اسید نیتریک نیز باعث پایداری لایه اکسیدی و مقاومت به خوردگی و افزایش استحکام چسبندگی می‌گردد [۱۶]. اما همانطور که در جدول (۲) نیز گزارش شده است کاهش زبری سطح در اثر خورده شدن برجستگی‌های آلیاژ اولیه (کد ۱) باعث شده است تا استحکام چسبندگی نمونه کد ۳ کاهش یابد (جدول ۲). چرا که کارآیی کامپوزیت‌ها به شدت تحت تأثیر توپوگرافی سطح و سطح نهایی آن می‌باشد [۱۷]. همجواری آلیاژ با HNO₃ باعث می‌شود تا یک لایه اکسید تیتانیم در سطح شکل گیرد. سپس زمانی که آلیاژ در محلول NaOH در حال جوش قرار می‌گیرد، تیتانیم به شکل HTiO₃·nH₂O در می‌آید. بار منفی هیدرات تیتانات ایجاد شده با یون‌های مثبت Na⁺ واکنش داده و تیتانات سدیم شکل می‌گیرد [۱۴]. این نتیجه توسط EDS انجام شده بر

جدول (۲): نیرو و استحکام چسبندگی نمونه‌های نواری مورد آزمایش.

کد نمونه	۱	۲	۳	۴
نیروی چسبندگی (N)	۵۱/۶۴	۵۷/۴۰	۴۷/۴۴	۹۷/۰۴
انحراف معیار	۲/۲۲	۱/۲۸	۱/۷۶	۳/۲۳
استحکام چسبندگی (kPa)	۳۳۲/۹۰	۳۷۰/۰۴	۳۰۵/۸۳	۶۲۵/۵۸



شکل (۴): نمودار نمونه جابجایی/نیرو حاصل از آزمون Pull-Out

نمونه کد ۴.

جدول (۳): نتایج مطالعه آماری و مقایسه‌ای (آزمون T-test) چسبندگی نوارهای NiTi با سطوح متنوع.

نمونه‌های مقایسه شده	۱ و ۲	۱ و ۳	۱ و ۴	۲ و ۳	۲ و ۴	۳ و ۴
اختلاف میانگین (N)	۵/۷۶	۴/۲۰	۴۵/۴۰	۹/۹۶	۴۰/۱۴	۴۹/۶۰
انحراف استاندارد معیار	۱/۲۸	۱/۴۲	۱/۹۶	۱/۰۹	۱/۹۵	۱/۸۴
مقدار P	۰/۰۰۴۲	۰/۰۲۵۳	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱
نتیجه	**	*	***	***	***	***

* از نظر مطالعه آماری قابل استناد است.

** از نظر مطالعه آماری خیلی قابل استناد است.

*** از نظر مطالعه آماری کاملاً قابل استناد است.

استحکام چسبندگی نمونه‌های کد ۲ و ۴ (جدول ۲) این مسأله را تأیید می‌نماید.

مقایسه بین استحکام چسبندگی نمونه‌های مختلف به زمینه پلیمری از طریق آزمون T-test و نرم‌افزار Graphpad Ware [۱۹] انجام شد که نتایج آن در جدول (۳) گزارش شده است. این نتایج تحلیل‌های انجام شده را تأیید می‌نماید.

مسأله مهم دیگری که در تولید کامپوزیت‌های پلیمری حاوی سیم‌های SMA باید به آن دقت نمود پلیمریزاسیون مناسب پلیمر

روی آلیاژ تأیید شده است. پیش‌بینی می‌شود در صورت صیقلی شدن سطح آلیاژ نمونه‌های کد ۲ و ۳ قبل از قرارگیری در محلول‌های اسیدی و بازی استفاده شده می‌توان افزایش چسبندگی در اثر اصلاح سطح را انتظار داشت.

حضور لایه‌های اکسیدی پوسته پوسته روی سطح آلیاژ که اتصال ضعیف‌تری را با فلز برقرار کرده است [۱]، باعث می‌شود تا استحکام چسبندگی در مقایسه با حالتی که اتصال لایه اکسیدی با سطح مستحکم‌تر است کم باشد [۱۸]. مقایسه مقادیر

- [3] C. K. Poon, L. M. Zhou and L. H. Yam, "Size Effect on the Optimum Actuation Condition for SMA-Composites", *Composites Structures*, Vol. 66, pp. 503-511, 2004.
- [4] N. A. Smith, G. G. Antoun, A. B. Ellis and W. C. Crone, "Improved Adhesion between Nickel-Titanium Shape Memory Alloy and a Polymer Matrix Via Silane Coupling Agents", *Composites A*, Vol. 35, pp. 1307-1312, 2004.
- [5] S. Rossi, F. Deflorian, A. Pegoretti, D. D'Orazio and S. Gialanella, "Chemical and Mechanical Treatments to Improve the Surface Properties of Shape Memory NiTi Wires", *J Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, pp. 2214-2222, 2008.
- [6] R. X. Zhang, Q. Q. Ni, T. Natsuki and M. Iwamoto, "Mechanical Properties of Composites Filled with SMA Particles and Short Fibers", *J Composites Structures*, Vol. 79, pp. 90-96, 2007.
- [7] JSN. Paine, WM. Jones and CA. Rogers, "Nitinol Actuator to Host Composite Interfacial Adhesion in Adaptive Hybrid Composites", In: *AIAA: 33rd Structural Dynamics and Materials Conference*, pp. 556-65, 1992.
- [8] L. El Meduar, P. Rocher, J. Brems and H. F. Hildbrand, "Electrochemical and Cytocompatibility Assessment of Nitinol Shape Memory Alloy for Orthodontic Use", *Biomolecular Engineering*, Vol. 19, pp. 153-160, 2002.
- [9] M. T. Khorasani, H. Mirzadeh and Z. Kermani, "Wettability of Porous Polydimethylsiloxane Surface: Morphology Study", *Applied Surface Science*, Vol. 242, pp. 339-345, 2005.
- [10] K. K. Safak and G. G. Adams, "Modelling and Simulation of an Artificial Muscle and its Application to Biomimetic Robot Posture Control", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 41, No. 4, pp. 225-243, 2002.
- [11] C. L. Chu, C. Y. Chung, Y. P. Pu and P. H. Lin, "Graded Surface Structure in Chemically Polished NiTi Shape Memory Alloy after NaOH Treatment", *Scripta Materialia*, Vol. 52, pp. 1117-1121, 2005.
- [12] P. Molitor, V. Barron and T. Young, "Surface Treatment of Titanium for Adhesive Bonding to Polymer Composites: a Review", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 21, pp. 129-136, 2001.
- [13] C. Cheng-Lin, Hu Tao, Zh. Jun, Pu Yue-Pu, Y. Li-Hong, D. Yin-Sheng, L. Ping-Hua, Ch. Janathan and Chu. Paul-K, "Effects of H₂O₂ Pretreatment on Surface Characteristics and Bioactivity of NaOH-Treated NiTi Shape Memory Alloy", *Nonferrous Met. SOC. China* pp. 1296-1300, 2006.
- [14] M. F. Chen, X. J. Yang, Y. Liu, S. L. Zhu, Z. D. Cui and H. C. Man, "Study on the Formation of an Apatite Layer on NiTi Shape Memory Alloy Using a Chemical Treatment Method", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 173, pp. 229-234, 2003.
- [15] N. A. Smith, G. G. Antoun, A. B. Ellis and W. C. Crone, "Improved Adhesion between Nickel-Titanium Shape Memory Alloy and a Polymer Matrix Via Silane Coupling Agents", *Composites A*, Vol. 35, pp. 1307-1312, 2004.

است. جلوگیری از نفوذ حباب هوا به داخل پلیمر لازمه انجام یک فرآیند پلیمریزاسیون خوب می‌باشد. مطالعات نشان داده است حضور و رشد ترک (در جهت شعاعی) در نمونه‌های حاوی حباب هوا قابل توجه‌تر می‌باشد. لازم به ذکر است نواحی حضور حباب هوا محل مناسبی برای تمرکز تنش و ایجاد ترک می‌باشد [۱]. در پژوهش حاضر همانطور که در شکل (۱) نیز پیداست حباب هوا در کامپوزیت ظاهر نشده است.

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- ایجاد لایه اکسیدی و همچنین گروه Ti-OH روی سطح در اثر غوطه‌وری آلیاژ در H₂O₂ و پیرو آن در NaOH باعث افزایش استحکام چسبندگی نوار NiTi به زمینه سیلیکونی شده است.
- ۲- کاهش زبری سطح نمونه‌ای که با اسیدنیتریک فرآوری شده بود علی‌رغم حضور لایه اکسیدی موجب کاهش چسبندگی آلیاژ به زمینه پلیمری شده است.
- ۳- اتصال مستحکم‌تر لایه اکسیدی به سطح آلیاژ (در مورد نمونه آتیل شده) نسبت به اتصال ضعیف‌تر لایه اکسیدی پوسته‌ای تشکیل شده روی سطح نمونه اصلاح شده با H₂O₂ باعث شده است تا استحکام چسبندگی به مراتب بالاتر باشد.
- ۴- اصلاحات شیمیایی سطح در تمام موارد به جز در مواردی که زبری کاهش یافته است موجب افزایش استحکام چسبندگی شده است.

۵- مراجع

- [1] K. T. Lau, A. W. L. Chan, S. Q. Shi and L. M. Zhou, "Debond Induced by Strain Recovery of an Embedded NiTi Wire at a NiTi-Epoxy Interface: Micro-Scale Observation", *Materials and Design*, Vol. 23, pp. 265-270, 2002.
- [2] N. Neuking, A. Abu-Zarifa and G. Eggler, "Surface Engineering of Shape Memory Alloy/Polymer-Composites: Improvement of the Adhesion between Polymers and Pseudoelastic Shape Memory Alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 481-482, pp. 606-611, 2008.

[19] T-test, Graphpad Software, <<http://www.graphpadware.com>, January 2009.

۶- پی نوشت

1- Shape Memory Alloy

2- Paine

3- Scanning Electron Microscopy

4- Energy Dispersive Spectroscopy

5- Typical

[16] M. Pohl, C. Heßing and J. Frenzel, "Electrolytic Processing of NiTi Shape Memory Alloys", Materials Science and Engineering A, Vol. 378(1-2), pp. 191-199, 2004.

[17] M. Es-Souni and H. Fischer-Brandies, "On the Properties of Two Binary NiTi Shape Memory Alloys. Effects of Surface Finish on the Corrosion Behaviour and in Vitro Biocompatibility", Biomaterials, Vol. 23, No. 14, pp. 2887-2894, 2002.

[18] S. K. Sadmezhaad, N. Hassanzadeh and R. Bageri, "Improved Adhesion of NiTi Wire to Silicone Matrix for Smart Composite Medical Applications", Materials and Design, Vol. 30, No. 9, pp. 3667-3672, 2009.