مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1397، دوره 18، شماره 01، ص‌ص 131-140

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تأثیر پوشش Al_2O_3-TiO_2 نانوساختار بر عملکرد پارچه‌های الیاف کولار

روح‌اله رحمانی‌فرد[1*]، داود عالی‌پور[2]

1- استادیار، مهندسی نانوفناوری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی نانوفناوری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
* تهران، صندوق پستی 1684613114، rahmanifard@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 26 شهریور 1396
پذیرش: 16 آذر 1396
ارائه در سایت: 15 دی 1396

کلید واژگان:
پوشش نانوساختار آلومینا – تیتانا
اسپری حرارتی
ضربه سرعت بالا
الیاف کولار

چکیده

در این تحقیق پوشش Al_2O_3 - 13%wt.TiO_2 از پودرهای اولیه نانومتری بر پارچه با الیاف کولار با استفاده از فرایند پاشش پلاسما اتمسفری (APS) رسوب داده شد. بررسی‌های ساختاری با استفاده از روش‌های XRD و FESEM معرف حضور دو ناحیه متفاوت در ساختار پوشش بود: یک ناحیه کاملاً ذوب شده، عمدتاً از دانه‌های با میانگین اندازه 85 نانومتر با ترکیبی از $\gamma-Al_2O_3$ و تیتانیم حل شده و ناحیه دیگر شامل ذراتی نیمه ذوب که از ساختار $\alpha-Al_2O_3$ پودر اولیه نیز برخوردار بود. بررسی آزمون‌های مکانیکی نشان‌دهنده بهبود خواص مکانیکی پارچه‌های پوشش یافته بود. نتایج به‌دست آمده از آزمون استحکام کششی پارچه، قبل و بعد از پوشش‌دهی نشان داد که اعمال فرایند پوشش‌دهی پاشش پلاسما اتمسفری می‌تواند استحکام پارچه را به مقدار 60% افزایش دهد. نتایج آزمون ضربه سرعت بالا (V_{50}) بر پارچه‌های پوشش یافته با الیاف کولار نیز به خوبی نشان داد که حد بالستیکی نمونه‌ها افزایش چشمگیری داشته است. نتایج این آزمون نشان داد که اعمال پوشش نانو ذرات سرامیکی روی پارچه‌های الیاف کولار می‌تواند باعث حذف تعدادی از لایه‌های الیاف به کاررفته و در نتیجه کاهش وزن صفحات زرهی با حفظ سطح تهدید مربوطه گردد.

Effect of nanostructured Al_2O_3-TiO_2 Coating on performance of Kevlar Fabric

Roohollah Rahmanifard*, Davood Alipour

Department of Nanothechnology Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
* P.O.B .1684613114, Tehran, Iran, rahmanifard@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 September 2017
Accepted 07 December 2017
Available Online 05 January 2018

Keywords:
Al_2O_3-TiO_2 coating
Thermal Spray
High velocity impact
Kevlar Fabric

ABSTRACT

Since woven fabrics have uniqe characteristrics such as light weight, flexibility, high strength, etc. and they are also capable to be improved for mechanical properties by nano thechnology, it is expectal to gain more efficient composite using intrinsic properties of the ceramic nanoparticles and proper coating method. The uniqe properties of the nanoparticles such as high elastic modulus, high strength to weight ratio etc. as well as participating in defeat mechanisms agains external loadings, can be of the factors reinforcing the textiles. Al_2O_3-13%TiO_2 coatings were deposited on Kevlar Fabric substrates from nanostructured powders using atmospheric plasma spraying (APS). A complete characterization of the feedstock confirmed its nanostructured nature. Coating microstructures and phase compositions were characterized using SEM, and XRD techniques. The microstructure comprised two clearly differentiated regions. One region, completely fused, consisted mainly of nanometer-sized grains of α-Al_2O_3 with dissolved Ti^{+4}. The other region, partly fused, retained the microstructure of the starting powder and was principally made up of nanometer -sized grains of γ-Al_2O_3, as confirmed by FESEM. Coatings were in average slightly lower than the values for nanostructured coating. The results of tensile testing on kevlar fabrics before and after coating showed that APS could improve tensile strength up to 60%. High velocity impact test (V_{50}) performed on coated fabrics well indicated that their ballistic limit experienced a significant increase. In addition, the results of V_{50} showed revealed that APS can decrease final weight of new composite panel compared to plain polyetylen panel with identical protection level.

1- مقدمه

یکی از مهم‌ترین الیاف مورد استفاده در جلیقه‌های ضدگلوله الیاف آرامیدی[1] بوده که دارای استحکامی 5 برابر فولاد هم وزن خود هستند. این الیاف با توجه به هزینه مناسب تولید صنعتی از کاندیداهای مطرح در ساخت کامپوزیت‌های ضدگلوله به شمار می‌روند. در این راستا اولین جلیقه‌های چند لایه کولار در سال 1971 توسعه داده شد. درپی توسعه این الیاف در دهه 1980 ارتش آمریکا به صورت عمده به جلیقه‌های ضدگلوله و همچنین کلاه‌های[2] ساخته شده از کولار مجهز شد. در سال 1991 طی جنگ خلیج فارس استفاده از لوازم حفاظت بالستیک ساخته شده از کولار بالاخص کلاه باعث کاهش چشمگیر تلفات در عملیات طوفان صحرا گردید. در سال 2004 میلادی نیروی نظامی آمریکا از ترکیب سرامیک و کولار برای ساخت صفحات سخت استفاده نمود. هدف از این کار افزایش مقاومت پارچه‌های ضدگلوله در

[1] Aramids

[2] Personnel Armor Systems for Ground Troops (PASGT)

Please cite this article using:
R. Rahmanifard, D. Alipour, Effect of nanostructured Al_2O_3-TiO_2 Coating on performance of Kevlar Fabric, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 01, pp. 131-140, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Archive of SID
www.SID.ir

برابر گلوله‌های کالیبر بیشتر یا سرعت بالاتر بود، علاوه‌بر این استفاده از این الیاف در ترکیب با مواد سرامیکی نظیر ترکیبات اکسید آلومینیوم باعث می‌شد در مقایسه با مواد دیگر به وزن کمتری دست یافت [1].

دستیابی به زرهی سبک‌تر بدون ایجاد خلل در عملکرد بالستیکی از مهم‌ترین اهداف در ساخت ادوات زرهی انفرادی است، زیرا این امر باعث بهبود چابکی و کاهش خستگی سرباز شده که هر دو فاکتور در افزایش کارایی رزمی بسیار مهم است. در این راستا محققان در تلاش هستند که از استراتژی‌های نوینی برای برآورده نمودن نیازهای متناقض زره‌پوش (حفاظت بیشتر و وزن کمتر) استفاده کنند. خط‌مشی اصلی در تحقیقات بالستیکی بر توسعه و کاربرد موادی متمرکز بوده که دارای خواص ارتقاء یافته‌ای نظیر استحکام، سختی و چقرمگی باشند. این خط‌مشی منجر به بهبود قابل توجهی در عملکرد بالستیکی شده است، با این حال در جهت کاهش وزن چندان موفق عمل نکرده است [1]. از استراتژی‌های نسبتاً موفق استفاده از پارچه‌های کامپوزیتی بوده و در این راستا تحقیقات گسترده‌ای در زمینه پوشش‌دهی پارچه‌های کولار با مواد مختلف جهت کاربردهای بالستیکی انجام گرفته است.

پوشش‌های سرامیکی معمولاً پوشش‌های اکسیدی دیرگدازی هستند که بر بسترهای پلیمری آلی حساس به دما به روش اسپری حرارتی پوشش داده می‌شوند. این پوشش‌ها بسترهای پلیمری آلی حساس به دما را قادر خواهند ساخت تا با حفظ انعطاف‌پذیری، قابلیت مقاومت در برابر خراشیدگی و مقاومت در برابر ضربه سرعت بالا (سطوح تهدید) را ارتقاء دهند.

1-1- بررسی پارچه‌های آرامیدی

در این بخش به بررسی انواع الیاف آرامیدی، پارچه کولار، کاربرد پارچه‌های آرامیدی با پوشش سرامیکی، تحقیقات انجام گرفته در این زمینه و شرح مسأله پرداخته می‌شود.

1-1-1- الیاف آرامیدی

اولین الیاف آلی با استحکام و مدول کششی بالا که به عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های پیشرفته مورد استفاده قرار گرفت الیاف پلی‌آمید آروماتیکی یا الیاف آرامیدی بودند. آرامیدها به دلیل خواص مکانیکی بالاتر نسبت به سایر الیاف مصنوعی به سرعت جایگزین الیاف فلزی گردیدند که در صنایع مختلف مانند هوافضا، دریایی، خودرویی و نظامی استفاده می‌شد. این الیاف علاوه‌بر این‌که خواص مکانیکی بهتری نسبت به الیاف فلزی و الیاف شیشه (در حالت وزن برابر) داشتند مقاومت بالایی در برابر حرارت و شعله نیز از خود نشان می‌دادند و باعث گردید حوزه کاربرد وسیعی پیدا کنند. عبارت «آرامید» به الیافی اطلاق می‌گردد که دارای یک زنجیره طولانی از پلی‌آمید مصنوعی بوده و در آن حداقل 85% از پیوندهای آمیدی مستقیماً به دو حلقه آروماتیکی متصل شده‌اند [2]. با تعریف ارائه شده خانواده آرامیدها الیافی مانند کولار، نامکس، تکنورا، تیجین کانکس، توآرون و... را دربرمی‌گیرد [3].

1-1-2- کولار

کولار[1] نام اختصاری پلی پارا فنیلن دی آمین- ترفتالامید[2] از خانواده الیاف پلی‌آمید آروماتیکی بوده و با همین عنوان تجاری توسط شرکت دوپونت[3] تولید و عرضه می‌گردد. استفاده از کولار به دلیل خواص منحصر به فرد روزبه‌روز در حال افزایش بوده و گسترش وسیعی شامل می‌شود. وجود حلقه‌های فنیلی در ساختار این الیاف باعث افزایش خواص ویژه آن از جمله پایداری حرارتی، مقاومت ضربه و مدول بالای اولیه آن شده است [4].

الیاف کولار به دلیل ساختار منظم، پیوندهای بین مولکولی (واندروالس و هیدروژنی) و ممانعت فضایی حلقه‌های آروماتیک از آرایش‌یافتگی بالایی (81%-75%) برخوردار هستند و در انواع متنوعی یافت می‌شود [6,5].

1-2- کاربرد پارچه‌های آرامیدی با پوشش‌های سرامیکی

در محصولات جدید برای برطرف کردن نیازها از کامپوزیت نمودن چند ماده استفاده می‌شود که ممکن است حتی خواص متضاد داشته باشند. یکی از مزایای استفاده از پوشش‌های سرامیکی مقاومت به سایش بالای آن‌هاست. پارچه‌های دارای پوشش سرامیکی مشخصه‌های مثبت زیرلایه و پوشش سرامیکی را به همراه دارد. از جمله این خواص انعطاف‌پذیری، استحکام چسبندگی، سختی بالا، مقاومت به سایش، خواص بیومکانیکی[4] و الکتروفیزیکی هستند. الیاف کولار به دلیل مقاومت بالا نسبت به شوک‌های مکانیکی کاربردهای زیادی در صنایع نظامی و ورزشی دارند. در ساخت جلیقه و خودروهای ضدگلوله و نیز لباس‌های محافظ برای رانندگان ماشین‌های مسابقه کاربرد دارند. اعمال پوشش سرامیکی بر این الیاف باعث شده تا امکان استفاده از این مواد در کابین هواپیماهای جنگی، تانک‌ها و نفربرها فراهم گردد. برای مثال هواپیمای حمل و نقل ناتو[5] C-130 از زره سرامیکی در اطاقک خلبان استفاده می‌کند که از جنس کولار/ سرامیک است.

یکی از پرکاربردترین روش‌های اعمال پوشش در صنعت پاشش پلاسما اتمسفری[6] (APS) است که علاوه‌بر هزینه‌های کمتر دارای سرعت بالای پوشش‌دهی نیز است. این روش مناسب برای ایجاد پوشش‌های دیرگداز و مقاوم به سایش و خوردگی با کیفیتی مناسب است. با استفاده از این روش پوشش‌های سرامیکی نظیر Al_2O_3، TiO_2، ZrO_2، $3Al_2O_32SiO_2$، AlSi و یا ترکیبی از آن‌ها به عنوان پوشش سد حرارتی مقاوم به سایش و مقاوم در برابر ضربات سرعت بالا بر فلزات مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پوشش‌های Al_2O_3/TiO_2 یکی از ترکیباتی است که به صورت وسیعی توسط روش پاشش پلاسمایی روی زیرلایه فلزی رسوب داده می‌شوند. معمولاً در این پوشش‌ها TiO_2 در حالت خالص و یا به عنوان یک جز آلیاژی با اکسیدهای دیگری مانند Al_2O_3 و Cr_2O_3 به کار می‌رود [8,7].

1-3- تحقیقات انجام گرفته روی پارچه‌های با الیاف کولار

در تحقیقی که توسط لی[7] و همکاران در سال 2003 انجام شد، مقاومت بالستیکی (سرعت 244 متر بر ثانیه) پارچه‌های کولار آغشته به سیال سفت‌شونده برشی (ذرات سیلیکا و مایع اتیلن گلایکول) را بررسی کردند. سیال سفت شونده برشی[8](STF) سیالی غیرنیوتونی بوده که ویسکوزیته کمی در تنش برشی پایین داشته و در تنش برشی بالا ویسکوزیته بسیار زیادی از خود نشان می‌دهد. برای نشاندن سیال STF روی پارچه ابتدا این محلول توسط اتانول رقیق شده و پارچه به محلول نهایی آغشته می‌شود. سپس پارچه آغشته شده به مدت 20 دقیقه در دمای 80 درجه سانتی‌گراد در آون خشک می‌شود تا حلال اتانول آن از بین برود. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت نفوذ بالستیک پارچه کولار آغشته به STF افزایش یافته است. آن‌ها دریافتند

[1] Kevlar
[2] Poly Para Phenylene Di Amin-Terephthalamide
[3] DuPont

[4] Biomechanics
[5] NATO C-130
[6] Atmosferic Plasma Spray
[7] Lee
[8] Shear Thickening Fluid

Archive of SID

که این افزایش مقاومت به دلیل تأثیر مایع نیست، چرا که استفاده از مایع بدون ذرات سیلیکا منجر به کاهش استحکام پارچه شده است؛ بنابراین ذرات سیلیکا به عنوان یک تقویت‌کننده مناسب برای کاربرد بالستیکی عمل می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که جذب انرژی چهار لایه کولار آغشته شده با STF با ضخامت 8 میلی‌متر برابر 14 لایه پارچه خالص است. به نظر می‌رسد که افزایش عملکرد پارچه‌های آغشته به STF در اثر افزایش اصطکاک بین لیف‌هاست [9].

اگرس[1] و لی در سال 2004 تأثیر وجود سیال حاوی ذرات سیلیکا و پلی‌اتیلن گلایکول را بر پارچه‌های بافته کولار و نایلون بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که حضور سیال (حاوی ذرات سیلیکا و پلی‌اتیلن گلایکول) در پارچه‌های کولار و نایلون بافته باعث افزایش مقاومت به ضربه می‌شود. تعداد لایه‌ها در پارچه‌های آغشته برای مقاومت یکسان کمتر از تعداد لایه‌ها در پارچه‌های غیرآغشته است. آن‌ها نشان دادند که 12 لایه پارچه آغشته به سیال، مقاومت یکسانی با 15 لایه پارچه غیرآغشته خواهد داشت [10].

در تحقیق دیگری توسط تان[2] و همکاران در سال 2005 مقاومت بالستیکی پارچه‌های آرامیدی توارون آغشته به سوسپانسیون ذرات سیلیکا در آب[3] بررسی شد. آن‌ها حد بالستیکی و انرژی بالستیکی ویژه یک، دو، چهار و شش لایه پارچه آغشته شده با غلظت سوسپانسیون سیلیکای صفر، 20، 40 و 60 درصد وزنی را با پارچه خالص مقایسه نمودند [11].

کالمن[4] و همکاران نیز در سال 2007 رفتار نفوذ ذرات خشک، سیالات غلیظ شونده برشی و سوسپانسیون غلیظ ذرات را بر پارچه کولار بررسی کردند [12].

در تحقیق دیگری در سال 2012 توسط ابوطالب و همکاران مقایسه‌ای میان کامپوزیت کولار/ اپوکسی-پودرAl_2O_3 با کامپوزیت‌های تولید شده توسط دیگر محققین نظیر کولار/ پلی‌استر، کولار/ اپوکسی، شیشه/ اپوکسی صورت گرفت. در این تحقیق هر کدام از لایه‌های پارچه به ترتیب درون مخلوط رزین و پودر آلومینا غوطه‌ور گردیده و توسط برس و غلتک به مخلوط آغشته می‌شود، سپس لایه بعدی روی لایه پیشین قرار گرفته و در نهایت یک غلتک به منظور حذف حباب هوا روی مجموعه آن‌ها کشیده می‌شود. در این مقاله انرژی جذب و حد بالستیک نمونه‌ها پس از برخورد پرتابه تفنگ گازی اندازه‌گیری شد و با نتایج تئوری مقایسه گردید. نتایج به دست آمده بهبود در عملکرد مواد کامپوزیتی تقویت شده برای دستیابی به کاربرد ضدگلوله را نشان می‌دهد [13].

نتایج اعمال STF روی پارچه کولار توسط ماژومدار[5] و همکاران در سال 2013 حاکی از آن است که با افزایش فشار پد میزان سیلیکای جذب شده توسط پارچه کاهش می‌یابد [14].

رامادهان[6] و همکاران در سال 2013 از رزین پلی‌استر و سرامیک آلومینا بر کولار استفاده نمودند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد که ضخیم‌ترین لایه کمترین تأثیرپذیری را از ضربه گلوله داشته است [15].

1-4- شرح مسأله

بزرگ‌ترین عیب جلیقه‌های مقاوم در برابر گلوله، وزن بالای آن‌ها برای کاربردهای طولانی مدت است، در حال حاضر کاربری کامپوزیت‌هایی متشکل از سرامیک‌ها به صورت چیدمان بر مجموعه الیاف پرس شده و الیاف پشتی است که این ساختار باعث می‌شود جلیقه‌ها بتوانند در برابر پرتابه‌های بالستیکی با سطح تهدید کلاس IIIA، III وIV مطابق با استاندارد NIJ 01.01.04 مقاومت نمایند. با این حال یکی از مشکلات جدی این ساختار وزن بالای جلیقه است. در این تحقیق تلاش شده است با اعمال نانوذرات سرامیکی روی الیاف کولار از طریق بهبود خواص مکانیکی و بالستیکی الیاف، تعداد لایه‌های الیاف به کار رفته در سطح تهدید ثابت را کاهش و در نتیجه وزن کلی را کاهش داد.

2- مواد و روش‌ها

این بخش شامل معرفی مواد مورد استفاده در فرایند پوشش‌دهی، اعمال پوشش‌های سرامیکی روی پارچه به روش پاشش پلاسمایی، مشخصه‌یابی نانوپودرها و پوشش سرامیکی، بررسی مورفولوژی و آنالیز سطح، آزمون استحکام کششی پارچه و آزمون بالستیک با دستگاه تفنگ گازی است که هر کدام نیز دارای زیر بخش‌های مرتبط است.

2-1- معرفی مواد مورد استفاده در فرایند پوشش‌دهی

این بخش به معرفی زیرلایه، پوشش اتصال و سرامیک‌های مورد استفاده در لایه فوقانی پوشش می‌پردازد.

2-1-1- زیر لایه (بستر)

در این تحقیق از پارچه با الیاف کولار به عنوان زیرلایه استفاده شد. قطعات پارچه با ابعاد $31\times27\ cm^2$ به شکل مستطیل توسط دستگاه اره نواری برش خورده و برای انجام پوشش دهی بر فیکسچری از جنس فولاد نصب شد. پارچه نباید هیچ گونه آلودگی داشته باشد. پارچه برش خورده توسط چسب بر فیکسچر استوانه‌ای با قطر 9 cm و ارتفاع 55 cm تثبیت شده و بر میز دوار قرار گرفت.

2-1-2- پوشش اتصال

جهت چسبندگی مناسب بین لایه فوقانی و زیرلایه و ایجاد یک بستر سد نفوذی از پوشش اتصال استفاده شد، بدین منظور از پودر مس با نام تجاری Alloy-NR 2903 استفاده شد که دارای شکل کروی و اندازه ذره 50-5 میکرون است. این پودرها محصول شرکت پلاسما تکنیک[7] از کشور سوئیس بوده و به روش اتمایزینگ گازی تولید می‌شوند.

2-1-3- سرامیک‌های مورد استفاده در لایه فوقانی پوشش

مواد مورد استفاده در لایه فوقانی پوشش شامل نانوذرات $\alpha-Al_2O_3$ با میانگین اندازه ذره 50nm ساخت شرکت مرک- آلمان[8] با درصد خلوص 99.9% و نانوذرات TiO_2 با نام تجاری P-25 و میانگین اندازه ذره 10nm ساخت شرکت ایوونیک دگوسا- آلمان[9] (آناتاس 80%، روتایل 20% و خلوص 99%) بود. ترکیب مورد استفاده در پوشش شامل 87% آلومینا آلفا و 13% دی‌اکسید تیتانیوم (Al_2O_3–13%TiO_2) بود که با استفاده از روش اسپری خشک به گرانول‌هایی با اندازه 45-5 میکرون جهت استفاده در دستگاه پوشش‌دهی تبدیل شدند.

2-2- اعمال پوشش‌های سرامیکی روی پارچه به روش پاشش پلاسمایی

[1] Egres
[2] Tan
[3] Silica colloidal water suspension
[4] Kalman
[5] Majumdar
[6] Ramadhan
[7] Plasma-Technik AG; Switzerland
[8] Merk-Germany
[9] Ivonic Degussa-Germany

www.SID.ir
Archive of SID

سوختن پارچه به علت دمای بالای مواد ذوب شده و پاشیده شدن بر سطح زیرلایه یکی از معایب پوشش‌دهی به روش پاشش پلاسما اتمسفری روی الیاف و پارچه‌هاست، که برای رفع آن از سه روش خنک‌کاری پارچه، ایجاد آستری پیش از اعمال پوشش سرامیکی و همچنین ترکیب ماده پوشش با مواد دیگر برای کاهش دمای ذوب ماده پوشش استفاده می‌شود. در این تحقیق روش‌های فوق مورد استفاده قرار گرفت. در روش اول از خنک‌کاری توسط جریان هوای اتمسفر و در راه حل دوم از پوشش اتصال[1] استفاده شد. که در این پروژه از پودر مس بدین منظور استفاده گردید. راه حل سوم استفاده از ترکیباتی بود که با اکسید آلومینیوم ترکیب شده و تشکیل ترکیب یوتکتیک با دمای کمتر می‌دهند که در این مورد می‌توان به دی‌اکسید تیتانیوم اشاره کرد [16].

برای انجام فرایند پوشش‌دهی از دستگاه پاشش پلاسمایی اتمسفری شرکت پلاسما تکنیک مدل A-3000S ساخت کشور سوئیس استفاده شد. این دستگاه مجهز به تفنگ F4–MB و سیستم تزریق پودر Twin 10-C ساخت شرکت سولزر- متکو[2] است. ترکیبی از گازهای آرگون و هیدروژن به عنوان گاز کار برای تشکیل پلاسما به کار گرفته شد. از گاز آرگون به منظور تثبیت قوس در نازل و از گاز هیدروژن برای افزایش آنتالپی و ایجاد دمای بالاتر پلاسما استفاده می‌شود، همچنین برای انتقال ذرات پودری از منبع تغذیه پودر به مشعل پلاسما و از گاز آرگون به عنوان گاز حامل استفاده شد [17,16].

زیرسامانه پوشش‌ها شامل پوشش سرامیکی (لایه فوقانی)، پوشش اتصال (لایه میانی) و بستر پلیمری آلی (زیرلایه) است که دو لایه پوشش بر زیرلایه قرار می‌گیرد. این لایه‌ها شامل یک لایه فلزی پوشش اتصال و یک لایه سرامیکی فوقانی شکل گرفته بر زیرلایه است که از چسبندگی لازم برخوردارند. ترکیب پوشش اتصال به گونه‌ای طراحی شده است که چسبندگی لازم بین زیرلایه و پوشش فوقانی را مهیا خواهد کرد که منجر به تشکیل پیوند بین زیرلایه و لایه فوقانی می‌شود، که از نظر مکانیکی مستحکم و سد مؤثری در برابر اکسیژن است. شکل 1 طرحواره‌ای از ساختار چند لایه پوشش اعمال شده را نشان می‌دهد.

2-3- مشخصه‌یابی نانوپودرها و پوشش سرامیکی

به منظور مشخصه‌یابی فازها و اندازه بلور نانو پودرهای تأمین شده، همچنین بررسی پایداری فازی پوشش بعد از فرایند پوشش دهی، آنالیز پراش پرتو

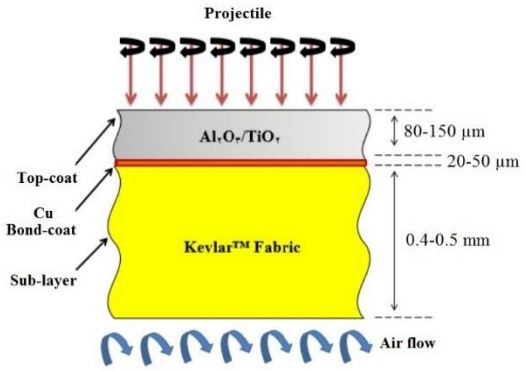


Fig. 1 Shematic image of the applied coating.

شکل 1 طرحواره‌ای از پوشش اعمالی شده

[1] bond coat
[2] Sulzer- Metco; Switzerland

ایکس با لامپ مسی با طول موج 1.54 $^{\circ}A$ و با اندازه گام 0.04 توسط دستگاه زیمنس مدل D5000 انجام شد. جهت بررسی دقیق ریزساختار پوشش سرامیکی و اطمینان از وجود نواحی نانومقیاس در پوشش، متالوگرافی و آماده‌سازی سطحی نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM E1920 صورت گرفت. برای این منظور از پارچه‌های پوشش داده شده نمونه‌هایی با ابعاد $2\square 2\ cm^2$ برش داده شد و از قسمت سطح مقطع عرضی پس از فرایند مانت کردن، سنباده‌زنی با استفاده از سنباده‌های شماره 180 تا 2400 و پولیش با استفاده از ذرات الماس با اندازه µm 3-6 و ذرات آلومینا با اندازه µm 0.04-0.06 تهیه گردید.

2-4- بررسی مورفولوژی و آنالیز سطح

برای مشاهده مقاطع عرضی و پوشش موجود در تار و پود پارچه، نحوه نفوذ و جذب پودر ذوب شده در داخل پارچه و بررسی نحوه توزیع نانو ذرات در روی الیاف‌های منسوج، با بزرگ‌نمایی‌های مورد نیاز از مجموعه زیرلایه، فصل مشترک و پوشش نهایی از دستگاه میکروسکوپ الکترونی استفاده شد.

برای استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی[3] ابتدا نمونه‌ها در ابعاد بسیار کوچک ($1cm^2$) بریده شد. برای دستیابی به تصویری با وضوح مناسب ابتدا بر سطح نمونه‌های آماده شده به وسیله دستگاه پوشش‌دهنده یونی (کندوپاش) به مدت 5 دقیقه پوششی از طلا به ضخامت 30nm داده شد. در ادامه تصویر SEM از نمونه‌های پوشش داده شده جهت تصویرسازی سطح پوشش تهیه شد [18].

2-5- آزمون استحکام کششی پارچه

آزمون استحکام کششی به منظور آگاهی از افت و یا عدم افت پارچه بعد از پوشش‌دهی انجام می‌گیرد. برای این کار مطابق استاندارد ISIRI 1147-1 پارچه‌ای به طول 200 میلی‌متر و عرض 50 میلی‌متر آماده شد و در دستگاه کشش با سرعت 100 میلی‌متر بر دقیقه کشیده شد. به منظور بررسی میزان اثر پوشش بر خواص استحکامی پارچه الیاف کولار، آزمایش کشش بر نمونه بدون پوشش در مقایسه با نمونه‌های پوشش یافته نیز انجام گرفت. برای انجام آزمایش استحکام کششی از دستگاه زوئیک[4] مدل Z100 ساخت کشور آلمان مطابق شکل 2 استفاده شد.

Fig. 2 Tensile test equipment.

شکل 2 دستگاه تست کشش

[3] FESEM
[4] Zwick

www.SID.ir
Archive of SID

2-6- آزمون بالستیک با دستگاه تفنگ گازی

آزمون‌های بالستیک برای تعیین حد بالستیک نمونه‌ها مطابق استاندارد Mil-Std-662F (تست بالستیک V_{50}) انجام شد. انرژی جذب شده (E_{target}) توسط سیستم الیاف به محض ضربه توسط رابطه (1) به دست می‌آید [19].

$$E_{\text{target}} = \frac{1}{2} m_{\text{p}} (v_{\text{i}})^2 \quad (1)$$

که m_p وزن پرتابه و v_i سرعت ضربه در حد بالستیک است. برای سیستم الیاف که در آن پرتابه به طور کامل نفوذ کرده، انرژی جذب شده توسط رابطه (2) به دست خواهد آمد.

$$E_{\text{target}} = \frac{1}{2} m_{\text{p}} (v_{\text{i}}^2 - v_{\text{r}}^2) \quad (2)$$

v_r سرعت باقی‌مانده است (برای سیستمی که گلوله کاملاً نفوذ کرده و امکان خروج دارد v_r داریم). با توجه به این‌که در این آزمون سرعت باقی‌مانده صفر است (گلوله متوقف می‌گردد) برای محاسبه انرژی جذب شده فقط از رابطه (1) استفاده شده است [19].

از دستگاه تفنگ گازی برای انجام آزمایش‌های ضربه سرعت بالا مانند برخورد و نفوذ در گستره متنوعی از سرعت‌های برخورد استفاده می‌شود. در انواع مختلف این دستگاه امکان قراردهی پرتابه در این دستگاه به شکل سرپر امکان‌پذیر و طرح شماتیکی از دستگاه تفنگ گازی در شکل 3 نشان داده است.

سرعت حد بالستیک مبنا مطابق با استانداردNATO STANAG 2920 تعیین شد. وزن پرتابه برابر 1.1 گرم بود و سرعت‌های پرتابه بین 300- m/s 1400 انتخاب گردید.

3- تحلیل نتایج

در این بخش ساختار و مورفولوژی پوشش، تعیین ترکیب فازی محصولات، خواص استحکامی و بررسی رفتار پوشش سرامیکی نانوساختار Al_2O_3/TiO_2 در آزمون ضربه سرعت بالا مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

3-1- ساختار و مورفولوژی پوشش

شکل 4 تصویر ماکروسکوپی از مورفولوژی پوشش توسط دستگاه میکروسکوپ نوری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 4 قابل مشاهده است اثر پستی و بلندی بستر به خوبی بر سطح پوشش نمایان است. با توجه به این شکل پوشش نانوذرات سرامیکی بر سطح پارچه به طور یکنواخت اعمال شده و همچنین نمای تار و پود (پستی و بلندی) پارچه نیز به طور قابل توجه‌ای حفظ و قابل رویت است که همین عامل تأییدکننده یکنواختی پوشش روی سطح زیرلایه است.

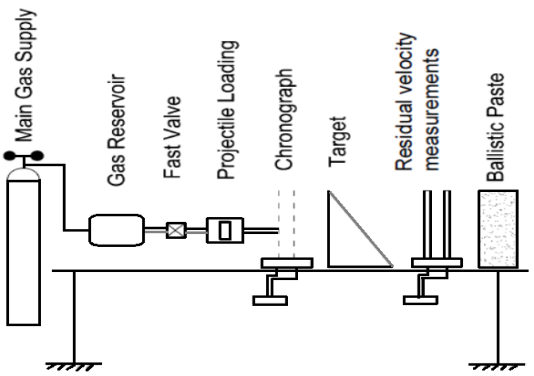


Fig. 3 Shematic image of the gas gun equipment.

شکل 3 طرح شماتیکی از دستگاه تفنگ گازی

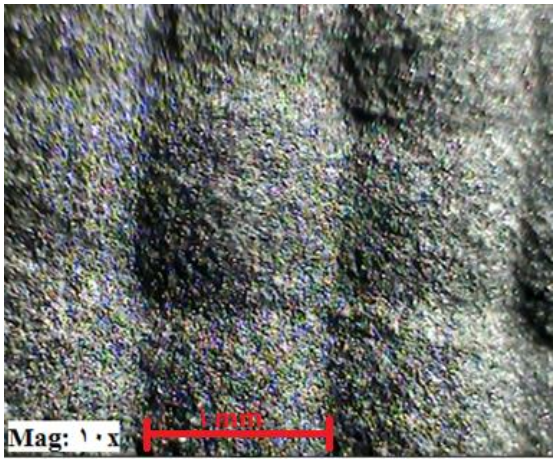


Fig. 4 Optical microscopy image of the coating surface

شکل 4 تصویر میکروسکوپ نوری از سطح پوشش

شکل 5 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از پوشش متراکم Al_2O_3/TiO_2 را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل 5-a مشاهده می‌شود قسمت A بخش پوشش یافته و قسمت B بستر یا خود الیاف را نمایش می‌دهد. در شکل‌های یاد شده قسمت پایین عکس‌ها مربوط به تار و پود الیاف کولار است. شکل 5-b,c بخش پوشش یافته الیاف کولار را در بزرگ‌نمایی‌های بالاتر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است قسمت عمده پودرهای پاشش‌یافته در حالت ذوب شده به سطح پوشش می‌رسند؛ بنابراین اسپلت‌های مذاب بخش اصلی تشکیل‌دهنده ساختار پوشش است. این موضوع در سایر تحقیقات انجام گرفته بر مواد دیگر با استفاده از پاشش پلاسما نیز گزارش شده است [20]. همان‌طور که در شکل 5-c مشاهده می‌شود پوشش به شکل پیوسته، یکنواخت و در هم تنیده است. عدم یکنواختی که در سطح پوشش دیده می‌شود به دلیل انعطاف‌پذیری و نبود صلبیت زیرلایه است.

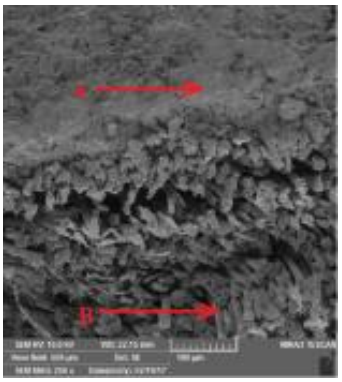
شکل 5-d الگوی طیف‌سنجی تفکیک انرژی (EDS)[1] از ناحیه نشان داده شده در شکل 5-c را نشان می‌دهد. با استفاده از این طیف وجود ذرات آلومینیوم و تیتانیوم روی سطح نمونه اثبات و عناصری مانند اکسیژن و سیلیسیم نیز شناسایی و درصد آن‌ها مشخص شده است. شدت پیک عنصر آلومینیوم حاکی از درصد بالای آلومینیوم در پوشش است. حضور عنصر سیلیسیم روی سطح را می‌توان به ناخالصی موجود در پودر نانوذرات Al_2O_3 نسبت داد که مقدار آن ناچیز و به صورت کاملاً یکنواخت روی سطح توزیع شده است.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مربوط به نمونه الیاف بهینه پوشش‌یافته توسط Al_2O_3/TiO_2 در شکل‌های 6 و7 قابل مشاهده است. در شکل 6-a تصویر حاصل از الکترون‌های برگشتی[2] و در شکل 6-b تصویرحاصل از الکترون‌های ثانویه[3] نشان داده شده است. طبق اندازه‌گیری‌های انجام گرفته روی شکل 6، میانگین اندزه نانوذرات Al_2O_3/TiO_2 روی سطح بستر 85nm به دست آمد. تصاویر شکل 7 نیز توزیع مناسبی از ذرات آلومینیوم، تیتانیوم و اکسیژن را بر سطح نشان می‌دهد. حضور این ذرات با اندازه حدودا برابر سایز اولیه آن‌ها به خوبی نشان می‌دهد که بخشی از ذرات اسپری شده به صورت ذوب نشده بر سطح پوشش قرار می‌گیرند؛ بنابراین ترکیب پوشش مشتمل بر اسپلت‌های ذوب شده و

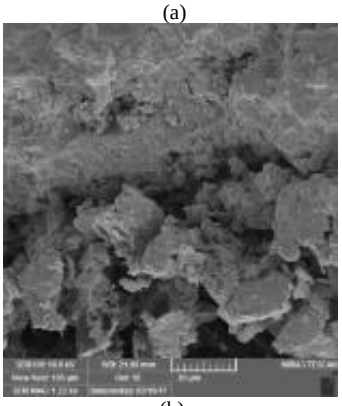
[1] Energy Dispersive Spectroscopy
[2] Backscattered electron (BSE)
[3] Secondary electron (SE)

Archive of SID

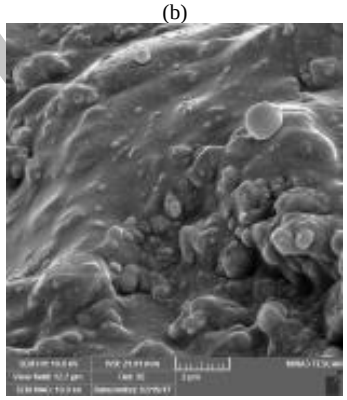
www.SID.ir



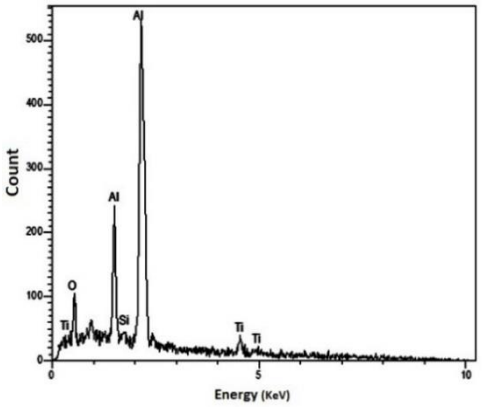
(a)



(b)



(c)

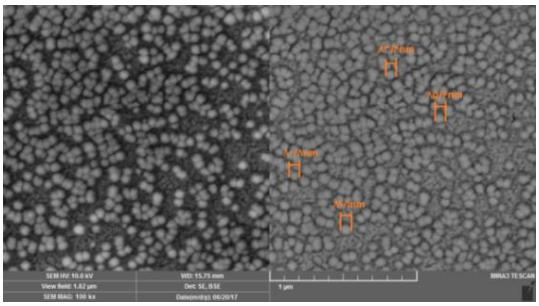


(d)

Fig. 5 FESEM image of the coating surface at a magnification of a- 250X, b- 1.22KX, c- 10KX and d- EDS analysis related to the coating surface

شکل 5 تصاویر FESEM مربوط به سطح پوشش یافته با بزرگ‌نمایی: الف- 250 X، ب- 1.22 kX، ج- 10kX، د- تصویر EDS

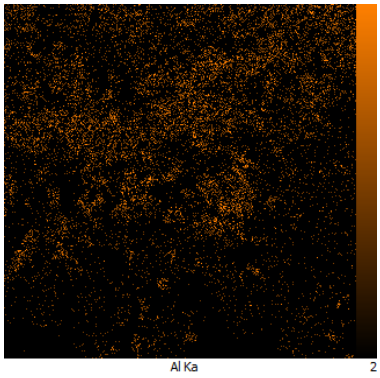
ذرات ذوب نشده است.



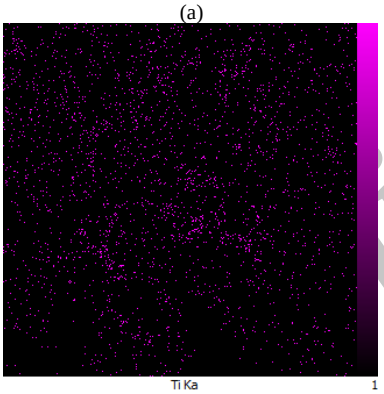
(b) (a)

Fig. 6 FESEM image of coating fabric using: a- back scatter electron, b- secondary electron

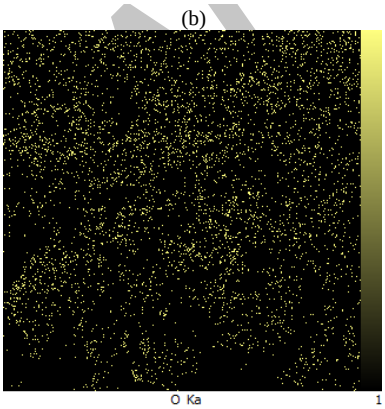
شکل 6 تصویر FESEM الیاف پوشش‌یافته با استفاده از: الف- الکترون‌های برگشتی روبشی، ب- الکترون‌های ثانویه



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 EDS map image showing element distribution of: a- Al, b- Ti, c- O on the coating surface.

شکل 7 تصویر نقشه EDS از پراکندگی عناصر: الف- آلومینیم، ب- تیتانیم، ج- اکسیژن در سطح پوشش

شکل 8 تصویر نمونه پوشش نانوساختار Al_2O_3/TiO_2 که به همراه یک

Archive of SID
www.SID.ir

پوشش اتصال Cu بر پارچه با الیاف کولار به وسیله دستگاه پلاسما اسپری رسوب داده شده است را نشان می‌دهد. اتصال مناسب بین پوشش فوقانی Al_2O_3/TiO_2 و پوشش میانی مس بر زیرلایه در این شکل به خوبی قابل مشاهده است. با این که دمای ذوب Al_2O_3 و TiO_2 به ترتیب بالای $2000^{\circ}C$ و $1800^{\circ}C$ است [21]، ولی به دلیل استفاده از سه عامل اتمسفر هوا، پوشش اتصال مس و ترکیب آلومینا و تیتانیا هیچ‌گونه آسیبی به پارچه نرسیده است. برای ارزیابی دقیق‌تر تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی از سطح مقطع نمونه پوشش‌یافته انجام شده است.

تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع با بزرگ‌نمایی 500 برابر در شکل 8 نشان داده شده است. در این شکل سه قسمت به تفکیک مشخص شده است، قسمت الف که نمایانگر پوشش فوقانی یا همان پوشش سرامیکی Al_2O_3-13%wt.TiO_2 است، قسمت ب که نمایانگر پوشش اتصال یا همان پوشش مس بوده و قسمت ج که نمایانگر زیرلایه متشکل از الیاف کولار است. همانطور که ملاحظه می‌گردد در پوشش فوقانی لایه‌ای کاملاً یکنواخت از پوشش Al_2O_3/TiO_2 بر پوشش اتصال قرارگرفته است. علاوه‌بر این مشاهده می‌شود که پوشش اتصال بطور قابل توجهی با الیاف کولار (زیرلایه) امتزاج داشته و نفوذ مناسبی در بین الیاف ایجاد کرده و همین عامل سبب چسبندگی مناسب بین زیرلایه و پوشش فوقانی شده است.

با بررسی‌های دقیق در شکل 8 دیده می‌شود که هیچ‌گونه جدایشی بین پوشش اتصال و پارچه وجود ندارد و مدور بودن سطح مقطع الیاف نشان‌دهنده عدم هرگونه سوختگی در الیاف را نشان می‌دهد. همچنین در شکل 8-b مشاهده می‌گردد که ذرات پوشش اتصال به درون الیاف پارچه به خوبی نفوذ کرده است. نفوذ ذرات پوشش اتصال به داخل پارچه دو مزیت را به همراه دارد؛ نخست این‌که موجب چسبندگی بیشتر پوشش اتصال و در نهایت پوشش فوقانی به زیرلایه می‌شود؛ و دوم این‌که موجب افزایش تنش برشی پارچه می‌شود. در این تحقیق بر طبق استاندارد برای روش پاشش پلاسما اتمسفری فاصله مشعل تا زیرلایه حدود 10cm انتخاب شد. انتخاب فواصل بیشتر یا کمتر از 10cm عموماً با مشکلاتی همراه است. در فواصل بیشتر از 10cm نرخ رسوب پودر روی زیرلایه کاهش یافته و میزان مصرف پودر افزایش می‌یابد، علاوه‌بر این در فواصل زیاد ذرات ذوب شده پودر باید مسیر بیشتری را طی کرده و همین امر موجب کاهش دمای پودر نزدیک سطح زیرلایه و موجب می‌شود چسبندگی خوبی بین پوشش و زیرلایه صورت نگیرد. در فواصل کمتر از 10cm سبب سوختن زیرلایه (همان پارچه) شده است که در نتیجه مانع از دستیابی به خواص مورد انتظار خواهد شد.

با توجه به مقاطع دایره‌ای با رنگ خاکستری تیره که در ناحیه b از شکل 8-b قابل مشاهده است عدم تغییر شکل و عدم سوختگی الیاف کولار و همچنین نفوذ مناسب پوشش اتصال در زیرلایه نشان‌دهنده رعایت فاصله مناسب پوشش‌دهی در فرایند پاشش پلاسما اتمسفری با فاصله 10cm بوده است.

نوع و میزان مصرف گاز از دیگر پارامترهای تأثیرگذار در فرایند پاشش پلاسمای اتمسفری است. ترکیبی از گازهای آرگون و هیدروژن به عنوان گاز کار برای تشکیل پلاسما به‌کار گرفته شد. از گاز آرگون به منظور تثبیت قوس در نازل و از گاز هیدروژن جهت افزایش آنتالپی و ایجاد دمای بالاتر پلاسما استفاده شد.

3-2- تعیین ترکیب فازی محصولات

شکل 9-a طیف پراش اشعه ایکس مخلوط پودر نانوذرات Al_2O_3/TiO_2 پیش

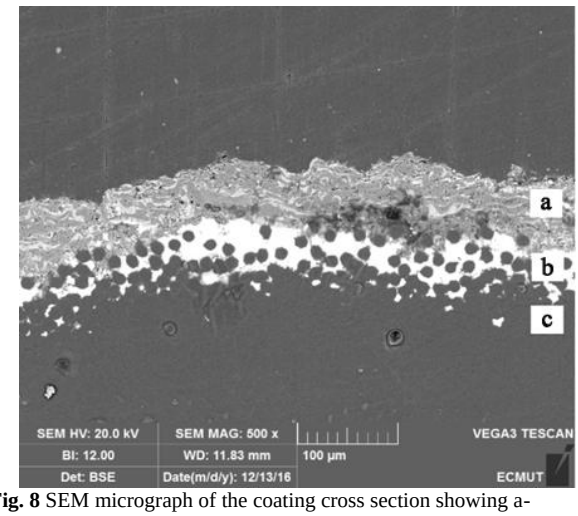


Fig. 8 SEM micrograph of the coating cross section showing a- Alumina-titana coating, b- Cu bond layer and c- Kevlar substrate

شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع نمونه پوشش یافته شامل نواحی الف- آلومینا- تیتانیا، ب- مس، ج- الیاف

از فرایند پوشش‌دهی و شکل 9-b طیف پراش اشعه ایکس برای نمونه پوشش‌یافته توسط نانوذرات Al_2O_3/TiO_2 را نشان می‌دهد. در این تصاویر فازهای α و γ مرتبط با نانوساختار کریستالی آلومینا و فازهای کریستالی آناتاس و روتایل متعلق به نانوذرات تیتاناست. همان‌طور که ملاحظه می‌شود پس از انجام فرایند پاشش قسمتی از نانوذرات آلومینا، فاز α حفظ و بخش دیگر آن به فاز γ تغییر فاز یافته است.

نتایج نشان می‌دهد که انجام فرایند پاشش تأثیری بر ساختار کریستالی TiO_2 ندارد، به طوری که تغییر فاز آناتاس به روتایل به طور کامل انجام شده است. به گونه‌ای که در الگوی پراش اشعه ایکس نشان داده شده در شکل 9-b پیک‌های مربوط به TiO_2 آناتاس دیده نمی‌شوند.

با توجه به نمودار XRD هیچ گونه پیک جدیدی مبنی بر واکنش بین نانوذرات Al_2O_3 و TiO_2 و تشکیل فاز جدید در طیف پراش اشعه ایکس مشاهده نمی‌شود. علاوه‌بر این شدت پیک در صفحات (104)، (113)، (111) و (116) به ترتیب در زوایای 2θ = 35، 43، 57، 60° که مربوط به فاز α -Al_2O_3 است و در شکل 9-b در نمونه پوشش‌یافته در مقایسه با نمونه پودری اولیه کاهش یافته است که با توجه به ایجاد پیک‌های جدید مربوط به γ -Al_2O_3 در صفحات (111)، (400)، (511) و (440) به ترتیب در زوایای 2θ = 37.5، 47.5، 67، 70° می‌توان نتیجه گرفت که ساختار آلومینا از فاز α به γ به دلیل شرایط حرارتی مناسب ایجاد شده در روش پاشش پلاسمای اتمسفری تغییر یافته است. همچنین فاز کریستالی تیتانیا با ساختار روتایل در صفحات (110) و (200) به ترتیب در زوایای 2θ = 23 و 38° دارای پیک است. حضور پیک‌های مربوط به ساختارهای α-Al_2O_3 و γ-Al_2O_3 و TiO_2 روتایل[1] تأییدکننده موقعیت‌های ادعا شده در تصاویر سطح مقطع حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی بر نمونه پوشش شده با نانوذرات Al_2O_3/TiO_2 به روش پاشش پلاسمای اتمسفری است. به منظور اندازه‌گیری کریستال‌ها از معادله شرر[2] و با استفاده از عرض پیک در نصف ماکزیمم[3] به صورت رابطه (3) استفاده شد [22].

$$d = \frac{K\lambda}{\beta\cos\theta} \qquad (3)$$

[1] Rutile
[2] Scherrer
[3] Full Width at Half Maximum

Archive of SID
www.SID.ir

در رابطه (3)، d اندازه کریستال، K فاکتور شکل ظاهری برابر 0.9، λ طول موج پرتو ایکس ساطع شده از لامپ مس (CuKα) برابر 1.5406 A°، β مقدار FWHM برحسب رادیان است. طبق بررسی‌های انجام شده FWHM بزرگ نشان‌دهنده کریستال با اندازه کوچک و بالعکس است. اندازه کریستال‌ها در محدوده پیک‌های 55°، 47.5، 43، 35 = 2θ برای نمونه پوشش شده مطابق رابطه (1) به ترتیب در حدود 129، 93، 92، 112 انگسترم محاسبه شده است.

3-3- خواص استحکامی

آزمون استحکام کششی به منظور آگاهی از افت و یا عدم افت خواص استحکامی پارچه بعد از عمل پوشش انجام می‌گیرد. با توجه به نمودار تنش-کرنش گردآوری شده در شکل 10 ملاحظه می‌گردد که نمونه پارچه کولار بدون پوشش از استحکام کششی برابر با 250 Mpa برخوردار است. این درحالی است که استحکام کششی برای نمونه پوشش یافته 400 Mpa به دست آمد که افزایش 60 درصدی را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود استحکام پارچه با انجام فرایند پوشش‌دهی افزایش می‌یابد. با این حال درصد ازدیاد طول برای پارچه پوشش‌یافته نسبت به پارچه بدون پوشش حدود 31% کاهش نشان می‌دهد که چون در جلیقه‌های ضد گلوله این امر محدودیتی حاصل نمی‌کند، بنابراین نمی‌تواند با مشکلی همراه باشد.

همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود برای نمونه‌های پوشش داده شده، با افزایش درصد ازدیاد طول تا اندازه‌ای افزایش استحکام کششی را خواهیم داشت و پس از آن با ادامه افزایش یافتن ازدیاد طول کاهش استحکام

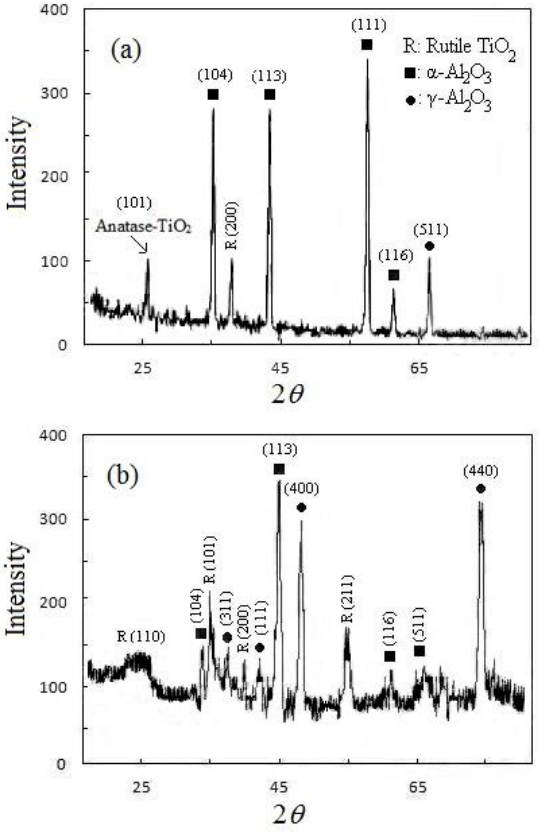


Fig. 9 XRD pattern for: a- Al_2O_3/13%wt.TiO_2 powder, b- coatinted sample.

شکل 9 نمودار XRD الف- برای پودر اولیه Al_2O_3/13%wt.TiO_2 و ب-نمونه پوشش یافته

کششی مشاهده می‌شود. این موضوع بیانگر این مطلب است که نانوذرات سرامیکی در منافذ الیاف نفوذ کرده و تا میزان بالایی در برابر نیروی کشش مقاومت نموده و با کشیده شدن بیش از اندازه الیاف پیوستگی و چسبندگی ذرات بر الیاف به تدریج خاصیت خود را از دست می‌دهد. در تحقیق انجام شده توسط کالمن و همکاران نیز به نقش سختی ذره در پارچه‌های پوشش‌یافته اشاره شده است [12].

بنابراین با توجه به نتایج می‌توان ادعا نمود که روش پاشش پلاسمای اتمسفری سبب افزایش استحکام کششی به دلیل تغییر فاز مناسب در ساختار کریستالی نانوذرات آلومینا و تیتانیا طبق تصاویر پراش اشعه ایکس شده است. همچنین افزایش استحکام کششی تأییدکننده نتایج حاصل از پوشش و توزیع یکنواخت نانوذرات براساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از نمونه پوشش شده به روش پاشش پلاسما اتمسفری است.

4-3- بررسی رفتار پوشش سرامیکی نانوساختار Al_2O_3/TiO_2 در آزمون ضربه سرعت بالا (V_{50})

از آن‌جایی که در نظر است پارچه‌های کولار جایگزین بخشی از لایه‌های پلی‌اتیلن در پانل‌های پلیمری شود و این کار باعث کاهش وزن سازه خواهد شد، به نظر می‌رسد استفاده از پارچه‌های با الیاف کولار پوشش‌یافته با استحکام بالاتر می‌تواند تعداد لایه‌های کولار به کار رفته را کاهش داده و موجبات کاهش وزن بیشتری را در پانل پلیمری فراهم آورد.

پوشش‌دهی الیاف کولار با ذرات سرامیکی می‌تواند مقاومت پارچه‌هایی مثل آرامید را در برابر ضربه افزایش دهد. این نکته قابل توجه است که ماده پوشش داده شده با ایجاد پل بین الیاف مانع از گسیختگی و لغزش الیاف ماده مرکب می‌شود؛ بنابراین با انتخاب ماده‌ای مناسب و روشی مناسب به منظور پوشش‌دهی آن می‌توان به خواص بالستیکی بالا دست یافت. هنگام ورود نفوذکننده به پارچه نیروی معکوسی به وسیله پارچه بر نفوذکننده اعمال می‌گردد و حرکت‌های کرنشی در منطقه برخورد در طول الیاف به سوی لبه پارچه منتقل می‌گردند. الیاف موجود در پارچه خشک در محل تقاطع الیاف، به علت فقدان اصطکاک ما بین نفوذکننده و الیاف دچار لغزش می‌شوند و نفوذکننده با کنار زدن الیاف از میان آن‌ها عبور می‌کند. هنگامی که نیرویی به سطح پارچه پوشش‌دار وارد می‌گردد نانوذرات موجود در سطح پارچه در نقطه برخورد تجمع نموده و از طریق افزایش اصطکاک مانع سرخوردن الیاف می‌شوند. نانوذرات موجود در ماده پوشش داده شده از طریق قرار گرفتن بین الیاف و منافذ موجود پارچه در محل تقاطع دو نخ نیز می‌تواند نقش مهمی در

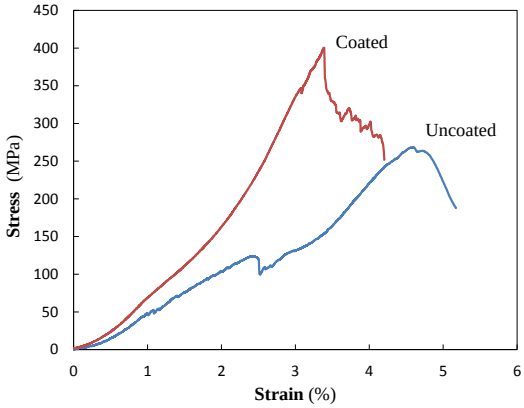


Fig. 10- Stress-strain curve a- uncoated Kevlar b- coated Kevlar

شکل 10 نمودار تنش- کرنش برای پارچه‌های کولار پوشش‌یافته

Archive of SID

www.SID.ir

جهت افزایش اصطکاک (ارتباط بین الیاف) داشته باشند. نفوذکننده در نمونه الیاف پوشش داده شده با افزایش گرانروی هنگام اعمال نیرو مواجـه می‌شـود که این امر موجب کاهش سرخوردن فیلامنت‌های موجود در الیـاف و لغـزش کمتر الیاف شده و بیشتر سبب پاره کردن الیاف و سپس عبور از سطح پارچه می‌شود. این امر موجب اتلاف انرژی بیشتر از نفوذکننده می‌شود.

پارچه با الیاف کولار برای قابلیت‌های ضد انفجار و ضد ترکش مورد استفاده قرار می‌گیرد. با روش پوشش‌دهی پلاسما بر الیاف کولار و جایگزین کردن لایه‌های پوشش داده شده کولار به جای لایه‌های پلی‌اتیلن در پانل‌های پلیمری به نظر می‌رسد می‌توان تعداد لایه‌های الیاف پلی‌اتیلن در پانل پلیمری را کاهش داد که این عامل کمک به کاهش وزن در محصول نهایی خواهد کرد. در عین حال قابلیت مقاومت پارچه با الیاف کولار توسط فرایند پوشش‌دهی با ذرات سرامیکی به روش پاشش پلاسما اتمسفری در برابر ضربات سرعت بالا افزایش می‌یابد.

در تحقیق حاضر نمونه‌های پوشش داده شده از الیاف کولار با ابعاد 28□23 سانتی‌متر مربع و دو لایه مورد آزمون ضربه سرعت بالا قرار گرفته و نتایج مقاومت بالستیک برای نمونه‌های حاوی 2 لایه کولار پوشش یافته به ثبت رسیده است. در ضمن تصویری از نحوه قرارگیری پارچه‌های کولار پوشش‌یافته و جهت برخورد پرتابه به سطح پوشش سرامیکی در شکل 11 نشان داده شده است.

در حال حاضر پانل‌های پلیمری مورد استفاده براساس دانسیته از تعداد حدود 78 لایه از جنس پلی‌اتیلن استفاده می‌شوند. با توجه به فرایند پوشش‌دهی نانوذرات سرامیکی اعمال شده بر پارچه با الیاف کولار تعداد مختلفی از لایه‌های الیاف کولار پوشش‌یافته به همراه لایه‌های پلی‌اتیلن براساس استاندارد STANAG 2920 تحت آزمون بالستیک قرار گرفتند. بدین منظور چگالی سطحی نمونه‌ها از حاصل جمع چگالی الیاف کولار پوشش یافته و لایه‌های پلی‌اتیلنی براساس تعداد لایه‌های به‌کار رفته محاسبه شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده برای چگالی سطحی هر لایه الیاف کولار پوشش‌یافته برابر $0.113\ g/cm^2$ و برای چگالی سطحی هر لایه الیاف پلی‌اتیلنی برابر $0.026\ g/cm^2$ است.

برای تعیین این‌که چه تعداد لایه کولار جایگزین لایه‌های پلی‌اتیلنی شود، اولین مرحله از تست ترکش با تعداد 4 لایه کولار پوشش‌یافته و 4 لایه از الیاف پلی‌اتیلنی براساس استانداردSTANAG 2920 آغاز شد. در این تست جهت شلیک پرتابه مطابق با شکل 11 انجام گرفت. مراحل بعدی آزمون ضربه سرعت بالا در جدول 1 نشان داده شده است.

حد بالستیک این نمونه‌ها همراه با چگالی سطحی آن‌ها در مقایسه با نمونه مرجع (حاوی 78 لایه پلی‌اتیلن) در جدول 1 و شکل 12 آورده شده است. حد بالستیک با افزایش تعداد لایه‌ها به ویژه افزودن لایه‌های با الیاف کولار پوشش‌یافته به تناسب افزایش می‌یابد.

در نهایت در مرحله ششم آزمون با جایگزینی نیمی از لایه‌های الیاف پلی‌اتیلن با هشت لایه کولار پوشش داده شده، حد بالستیک مورد قبول منطبق با استاندارد حاصل گردید. نکته قابل توجه این‌که کامپوزیت به دست آمده کامپوزیت هیبریدی بوده و کاهش حدود 5.7 درصدی در چگالی سطحی این کامپوزیت در مقایسه با پانل تمام پلی‌اتیلنی می‌تواند به کاهش قابل توجهی در وزن پانل کامپوزیت هیبریدی منجر شود.

با توجه به بررسی‌های انجام شده در مقاله [13] و نتایج آزمون‌های صورت گرفته می‌توان ادعا کرد که استحکام کششی پارچه‌های پوشش‌دهی شده به روش پاشش پلاسما اتمسفری افزایش یافته و با میزان جذب انرژی ضربات و پرتابه‌های سرعت بالا توسط کامپوزیت‌های هیبریدی حاصل شده رابطه مستقیم دارد.

در واقع هرچه استحکام کششی افزایش یابد، با افزایش مقاومت بین الیاف و لایه‌ها، انرژی پرتابه بیشتری توسط کامپوزیت هیبریدی جذب می‌شود. با ضخامت پوشش‌دهی یکسان با رسیدن به ترکیب مناسب پوشش‌دهی خاصیت بالیستیکی پانل‌ها بهبود می‌یابد و میزان جذب انرژی نیز افزایش می‌یابد.

در پژوهش‌های پیشین انجام شده توسط محققین آزمون V_{50} (تست ترکش) با حد بالستیک 150 تا 160 متر بر ثانیه برای دانسیته سطحی 404 تا 886 گرم بر مترمربع انجام شد، در این پروژه با توجه به این‌که دانسیته سطحی مقدار کمی رشد داشته است، اما مقاومت کامپوزیت هیبریدی در برابر حد بالستیک تا میزان 600 متر بر ثانیه ارتقا یافته که این موضوع نشان‌دهنده این است که مقاومت در برابر ضربه سرعت بالا توسط پارچه با الیاف کولار پوشش‌یافته نسبت به الیاف پلی‌اتیلن افزایش یافته، علاوه‌بر این آزمون‌های شلیک مطابق استاندارد NIJ 01.01.04 نیز بر پارچه با الیاف کولار صورت پذیرفته که آزمون‌های انجام شده در پروژه حاضر فراتر از تحقیقات پیشین انجام شده در مقالات متعدد بوده و این نمایانگر این است که جذب انرژی توسط پانل‌های کامپوزیتی هیبریدی متشکل از الیاف کولار پوشش‌یافته بیشتر از پانل‌های فقط با الیاف پلی‌اتیلن است، در نتیجه پانل‌های کامپوزیتی حاصله با توجه به داشتن تکنولوژی پوشش‌دهی پلاسما اسپری با مواد نانوساختار و هیبریدی نمودن آن‌ها موجب ارتقا قابلیت مقاومت بالستیکی خواهد شد.

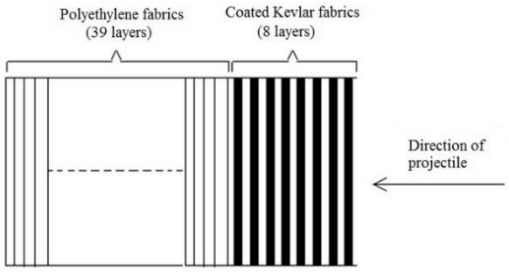


Fig. 11 Schematic image showing how a combination of Kevlar and PE layers is arranged in a panel

شکل 11 طرحواره‌ای از ترتیب قرارگیری الیاف کولار و پلی‌اتیلن در یک پانل

جدول 1 نتایج بالستیک پانل‌های ساخته شده ار تعداد لایه‌های مختلف الیاف پلی‌اتیلن و کولار

Table 1 Balistic results related to the panels containing different Kevlar and PE layers.

مرحله	تعداد لایه		حد بالستیک (m/s)	جذب انرژی (J)	چگالی سطحی (g/cm^3)
	کولار پوشش یافته	الیاف پلی‌اتیلن			
مرجع	0	78	600	198	2.028
1	4	4	200	22	0.556
2	5	5	250	34.4	0.695
3	5	10	300	49.5	0.825
4	6	10	400	88	0.938
5	7	20	500	137.5	1.311
6	8	39	600	198	1.918

www.SID.ir
Archive of SID

1, pp. 417–424, 2004.
[5] A. M. Hindeleh, S. M. Abdo, Effects of annealing on the crystallinity and microparacrystallite size of Kevlar 49 fibres, *Polymer*, Vol. 30, No. 2, pp. 218–224, 1989.
[6] T. M. Wu, J. Blackwell, Effect of thermal annealing on the structure of Technora and Kevlar polyamide fibers, *Polymer Research*, Vol. 4, No. 1, pp. 25–32, 1997.
[7] X. Q. Cao, R. Vassen, D. Stoever, Ceramic materials for thermal barrier coatings, *European Ceramic Society*, Vol. 24, No. 1, pp. 1–10, 2004.
[8] X. Lin, Y. Zeng, S. W. Lee, C. Ding, Characterization of alumina–3 wt.% titania coating prepared by plasma spraying of nanostructured powders, *European Ceramic Society*, Vol. 24, No. 4, pp. 627–634, 2004.
[9] Y. S. Lee, E. D. Wetzel, N. J. Wagner, The ballistic impact characteristics of Kevlar woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid, *Materials Science*, Vol. 38, No. 13, pp. 2825–2833, 2003.
[10] R. G. Egres Jr, Y. S. Lee, J. E. Kirkwood, K. M. Kirkwood, E. D. Wetzl, N. J. Wagner, Liquid armor: protective fabrics utilising shear thickening fluids, *Proceedings of the 4th International Conference of Safety and Protective Fabrics*, Pittsburg, October 26-27, 2004.
[11] V. B. C. Tan, T. E. Tay, W. K. Teo, Strengthening fabric armour with silica colloidal suspensions, *Solids Structures*, Vol. 42, No. 5, pp. 1561–1576, 2005.
[12] D. P. Kalman, J. B. Schein, J. M. Houghton, C. H. N. Laufer, E. D. Wetzel, N. J. Wagner, Polymer dispersion based shear thickening fluid-fabrics for protective applications, *Proceeding of SAMPE*, Baltimore, MD, June 3-7, 2007.
[13] A. R. A. Talib, L. H. Abbud, A. Ali, F. Mustapha, Ballistic impact performance of Kevlar-29 and Al 2 O 3 powder/epoxy targets under high velocity impact, *Materials & Design*, Vol. 35, pp. 12–19, 2012.
[14] A. Majumdar, B. S. Butola, A. Srivastava, An analysis of deformation and energy absorption modes of shear thickening fluid treated Kevlar fabrics as soft body armour materials, *Materials & Design*, Vol. 51, pp. 148–153, 2013.
[15] A. A. Ramadhan, A. R. A. Talib, A. S. M. Rafie, R. Zahari, High velocity impact response of Kevlar-29/epoxy and 6061-T6 aluminum laminated panels, *Materials & Design*, Vol. 43, pp. 307–321, 2013.
[16] R. Gadow, K. Von Niessen, Ceramic coatings on fiber woven fabrics, *26th Annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures: A: Ceramic Engineering and Science Proceedings*, Vol. 23, Issue 3, pp. 277–285, 2002.
[17] R. Gadow, K. Von Niessen, Lightweight ballistic with additional stab protection made of thermally sprayed ceramic and cermet coatings on aramide fabrics, *Applied Ceramic Technology*, Vol. 3, No. 4, pp. 284–292, 2006.
[18] S. Brzeziński, D. Kowalczyk, B. Borak, M. Jasiorski, A. Tracz, Applying the sol–gel method to the deposition of nanocoats on textiles to improve their abrasion resistance, *Applied Polymer Science*, Vol. 125, No. 4, pp. 3058–3067, 2012.
[19] M. R. Ahmad, W. A. Wan Yunus, J. Salleh, A. Samsuri, Performance of natural rubber coated fabrics under ballistic impact, *Malaysian Polymer Journal*, Vol. 24, pp. 39–51, 2007.
[20] W. B. Gong, C. K. Sha, D. Q. Sun, W. Q. Wang, Microstructures and thermal insulation capability of plasma-sprayed nanostructured ceria stabilized zirconia coatings, *Surface Coatings Technology*, Vol. 201, No. 6, pp. 3109–3115, 2006.
[21] P. Mohan, B. Yao, T. Patterson, Y. H. Sohn, Electrophoretically deposited alumina as protective overlay for thermal barrier coatings against CMAS degradation, *Surface Coatings Technology*, Vol. 204, No. 6, pp. 797–801, 2009.
[22] A. Behzadnia, M. Montazer, A. Rashidi, M. M. Rad. Sonosynthesis of nano TiO_2 on wool using titanium ispropoxide or butoxide in acidic media producing multifunctional fabric, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 21, pp.1815-1826, 2014.

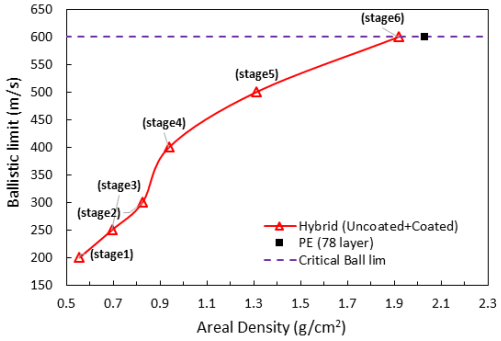


Fig. 12 Balistic limit as a function of surface density for different specimens given in table 1

شکل 12 حد بالستیک برحسب چگالی سطحی برای نمونه‌های اشاره شده در جدول 1

4- نتیجه‌گیری

با توجه به آنالیز XRD تغییر ساختار آلومینا از فاز α به γ به دلیل شرایط حرارتی مناسب ایجاد شده در روش پاشش پلاسمای اتمسفری حاصل شد، این درحالی است که هیچ‌گونه پیک جدیدی مبنی بر واکنش بین نانوذرات Al_2O_3 و TiO_2 و تشکیل فاز جدید در طیف پراش اشعه ایکس مشاهده نشد.

نتایج حاصل از آنالیز FESEM بیانگر توزیع یکنواختی از آلومینا و تیتانا در سطح پوشش بوده که حاوی ذرات نانومتری با اندازه میانگین 85 نانومتر بود. نتایج آزمون کششی بر نمونه‌های پوشش یافته و بدون پوشش نیز حکایت از افزایش 60% استحکام پارچه‌های کولار بود. بر طبق نتایج آزمون ضربه سرعت بالا (V_{50}) نیز با جایگزینی تعداد 8 لایه پارچه کولار پوشش‌یافته با 39 لایه از الیاف پلی‌اتیلن می‌توان وزن پانل‌های پلیمری حاوی 78 لایه الیاف پلی‌اتیلن را به مقدار 13% کاهش داده، علاوه‌بر این‌که سطح تهدید یکسانی به دست خواهد آمد.

5- مراجع

[1] G. Di Girolamo, F. Marra, C. Blasi, E. Serra, T. Valente, Microstructure, mechanical properties and thermal shock resistance of plasma sprayed nanostructured zirconia coatings, *Ceramics International*, Vol. 37, No. 7, pp. 2711–2717, 2011.
[2] N. P. Sahu, D. K. Khande, G. C. Patel, P. K. Sen, S. K. Bohidar, Improvements in glass fibre and estabilising comparison with carbon fibre, *Applied Science and Engineering Research*, Vol. 4, No. 1, pp. 31–35, 2015.
[3] M. Jassal, S. Ghosh, Aramid fibres-An overview, *Fibre & Textile Research*, Vol. 27, pp. 290-306, 2002.
[4] J. W. Downing, J. A. Newell, Characterization of structural changes in thermally enhanced Kevlar-29 fiber, *Applied Polymer Science*, Vol. 91, No.

Archive of SID

www.SID.ir