



ساخت پوشش نانوکامپوزیتی شفاف فوق آبدوست PMMA-SiO₂

حمیده شاهرودی^۱، محمدرضا واعظی^{۱*}، اکبر اسحاقی^۲، اصغر کاظمزاده^۳

^۱ پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین دشت، البرز، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، ایران

^۳ پژوهشکده نیمه‌هادی‌ها، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین دشت، البرز، ایران

چکیده در این پژوهش، فیلم نانوکامپوزیت فوق آبدوست شفاف PMMA-SiO₂ به روش غوطه‌وری روی زیرلایه شیشه ای اعمال گردید. سپس نمونه‌ها در دماهای ۱۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس آنیل شدند. از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM)، طیف سنج پراش انرژی اشعه ایکس (EDS)، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، طیف سنج UV-VIS و تحلیل گر زاویه تماس آب، به ترتیب برای بررسی مورفولوژی، درصد عناصر، زبری سطح، خواص نوری و آبدوستی نانوکامپوزیت استفاده شد. طیف عبور پوشش نشان داد که شفافیت زیرلایه شیشه با فیلم نانوکامپوزیت PMMA-SiO₂ کاهش نیافت و بدون تغییر ماند. علاوه بر این، نتایج ترشوندگی برای نمونه های آنیل شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، کاهش زاویه تماس زیرلایه را از ۳۴/۱ درجه به حدود صفر درجه نشان داد.

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۳۹۸/۱۱/۰۱

دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۰۵/۰۷

پذیرش قطعی: ۱۳۹۹/۰۶/۱۶

کلیدواژه‌ها:

فوق آبدوست

پوشش

نانوکامپوزیت

سیلیکا

JAMT: Vol. 9, No. 2, (Summer 2020), 1-8

Fabrication of PMMA-SiO₂ Super-Hydrophilic Transparent Nanocomposite Coating

Hamideh Shahroudi¹, Mohammadreza Vaezi^{1*}, Akbar Eshaghi², Asghar Kazemzadeh³

¹ Department of Nano-Technology and Advanced Materials, Materials and Energy Research Center, MeshkinDasht, Alborz, Iran

² Faculty of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Shahin Shahr, Esfahan, Iran

³ Department of Semiconductors, Materials and Energy Research Center, MeshkinDasht, Alborz, Iran

Paper History:

Received: 2020-01-21

Revised in revised form: 2020-07-28

Accepted: 2020-09-07

Keywords:

Super-Hydrophilic

Coating

Nano-Composite

Silica

Abstract

In this study, PMMA-SiO₂ transparent superhydrophilic nanocomposite film was applied by immersion method on glass substrate. Then the samples were annealed at 100 and 500 °C. Field emission scanning electron microscope (FE-SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), atomic force microscope (AFM), UV-VIS spectrometer, and water contact angle analyser were used to study the morphology, elements percentage, surface roughness, and optical and hydrophilic properties of nanocomposites. The coating transmission spectra showed that the transparency of the glass substrate did not decrease with PMMA-SiO₂ nanocomposite film and remained unchanged. In addition, the wettability results for the annealed samples at 500 °C showed a decrease in the contact angle of the substrate from about 34.1° to about 0°.

*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، البرز، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، تلفن: ۰۲۶-۳۶۲۸۰۰۴۰، دورنگار: ۰۲۶-۳۶۲۰۱۸۸۸

پیام نگار: m_r_vaezi@merc.ac.ir

۱- مقدمه

نانوکامپوزیت‌های آلی- معدنی با ساخت "پوشش‌های هوشمند" توسعه بیش‌تری در زمینه‌ی پوشش‌های فوق آبدوست پیدا کرد. تحقیقات بیش‌تر نشان داد که خواص مکانیکی این پوشش‌ها به اندازه کافی با افزودن ذرات نانو مقیاس بهبود یافت این در حالی است که خواص آبدوستی آن‌ها حفظ شده است [۳].

در این پژوهش پوشش نانوکامپوزیتی PMMA-SiO₂ به روش غوطه وری روی زیرلایه شیشه اعمال گردید و شفافیت و خواص آبدوستی نمونه‌ها بررسی شده است.

۲- روش تحقیق

۱-۲- مواد و تجهیزات

در این پژوهش، پودر پلی متیل متاکریلات، حلال دی متیل فرم آمید، اسید سولفوریک و محلول هیدروژن پر اکسید ۳۰ درصد از شرکت Merck؛ نانو پودر سیلیکای آمورف، با اندازه‌ی ۲۰-۳۰ نانومتر، از شرکت نانو مواد تحقیقاتی آمریکا (US- Nano) با خلوص ۹۸ درصد و زیرلایه شیشه با اندازه ۲۵/۴ × ۷۶/۲ میلی‌متر تهیه شد. تجهیزات مورد استفاده شامل همزن مغناطیسی مجهز به سیستم گرما، حمام فرا صوت شرکت Retsch GmbH ساخت آلمان، کوره شرکت Exciton ساخت ایران است.

۲-۲- آماده سازی زیرلایه

ابتدا برای حذف چربی و آلودگی، زیرلایه‌ها با آب و مواد شوینده شسته شده، سپس در دمای محیط خشک شدند. در ادامه به منظور ایجاد گروه‌های هیدروکسیل بر روی سطح، زیرلایه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در محلول پیرانا (H₂SO₄: H₂O₂) 3:1 قرار گرفته و پس از شست و شو با آب دیونیزه در دمای محیط خشک شد [۴].

۲-۳- ساخت پوشش

برای ساخت پوشش ابتدا محلول ۱ درصد وزنی پلی متیل متاکریلات با حل شدن مقدار تعیین شده‌ای از پودر در حلال دی متیل فرم آمید تهیه شد [۵]. برای اینکه فرآیند حل شدن به طور کامل رخ دهد این محلول در دمای ۱۰۰ درجه

در سال‌های اخیر طراحی و ساخت پوشش‌های فوق آبدوست و ضد مه برای استفاده در کاربردهای مختلف مانند مواد نوری توسعه یافته است. این پوشش‌ها به طور مؤثری عبور نور را افزایش داده، در نتیجه منجر به افزایش راندمان ابزارهای نوری مانند سلول‌های خورشیدی، صفحه نمایش‌ها، عینک‌ها، لنزها و پریسکوپ‌ها می‌شوند. فوق آبدوستی یک قابلیت ترشوندگی^۱ ویژه است که سطوحی با خواص خود تمیز شونده‌ی و ضد مه ایجاد می‌کند. این سطوح به جای ایجاد قطره آب با زاویه تماس^۲ بالا یک لایه‌ی نازکی از آب روی سطح ایجاد می‌کند؛ از این رو از پراکندگی نور توسط قطرات آب جلوگیری شده و خواص ضد مه ایجاد می‌گردد. دو روش برای رسیدن به سطوح فوق آبدوست وجود دارد. روش اول، استفاده از مواد فوتو کاتالیستی با اثر فوتوالقایی مانند اکسید تیتانیم است که تحت اشعه‌ی فرا بنفش یا مرئی از آبدوست به فوق آبدوست تبدیل می‌شوند. روش دوم، ساخت سطح فوق آبدوست از طریق ایجاد زبری در سطح مواد آبدوست (WCA<90) مانند الگوی لیتوگرافی و تشکیل سطوح میکرو متخلخل است [۱].

بررسی‌های وانگ^۳ و همکارانش نشان داد که تابش فرا بنفش، سطح آبدوست TiO₂ را به یک سطحی با آمفیلیک^۴ بالا تبدیل می‌کند. خاصیت آمفیلیک باعث ایجاد خواص ضد مه و خود تمیز شونده‌ی بر روی زیرلایه شیشه شد [۲]. پوشش‌های ضد مه ساخته شده با نانو ذرات TiO₂ از جمله ترکیباتی است که دارای مشکل عدم ماندگاری طولانی مدت می‌باشد و در اثر قطع تابش‌های فرابنفش خاصیت ضد مه آن‌ها کاهش می‌یابد. پوشش‌های فوق آبدوست بر پایه پلی اورتان در اغلب موارد به عنوان پوشش‌های ضد مه شفاف استفاده شده است. به دلیل ساختار قطبی این پلیمرها، جذب آب نسبتاً بالا ایجاد می‌شود. این اتفاق منجر به تورم پوشش بعد از قرار گرفتن در معرض آب می‌شود. سختی خراش پایین پلی اورتان یک مشکل برای اکثر کاربردهاست. با گذشت زمان مسیر

¹ Wettability

² Water Contact Angle (WCA)

³ Wang, R.

⁴ Amphiphilic

مشخصات نمونه‌ها به همراه شماره‌گذاری آن‌ها در جدول ۱ قابل مشاهده است. از این پس در تحلیل نتایج از این شماره‌گذاری استفاده می‌شود.

۲-۵- روش‌های مشخصه‌یابی

از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدان FESEM, TESCAN MIRA3, Czech Republic جهت بررسی مورفولوژی پوشش و توزیع نانو ذرات در زمینه و همچنین برای بررسی وضعیت توزیع عناصر از آشکار ساز EDS این ابزار استفاده شد. از میکروسکوپ نیروی اتمی از شرکت NT-MDT مدل ENTEGRA AFMNT-MDT در حالت غیر تماسی جهت بررسی زبری نمونه‌ها استفاده شد. جهت تعیین میزان عبور و جذب نمونه‌ها از دستگاه طیف سنج UV-vis ساخت شرکت PG Instruments انگلستان استفاده شد. برای اندازه‌گیری زاویه تماس، قطره آبی به حجم ۴ میکرو لیتر توسط میکرو پیپت بر سطح نمونه قرار داده شد و بلافاصله تصویر برداری انجام گردید. تصاویر با استفاده از دوربین صنعتی DFK 23U618 USB 3.0 رنگی با کمک لنز 2X گرفته شده‌اند. نتایج با نرم افزار اختصاصی سازنده این ابزار مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری زاویه تماس قطره آب از سه نقطه مختلف صورت گرفت و متوسط آن گزارش شد.

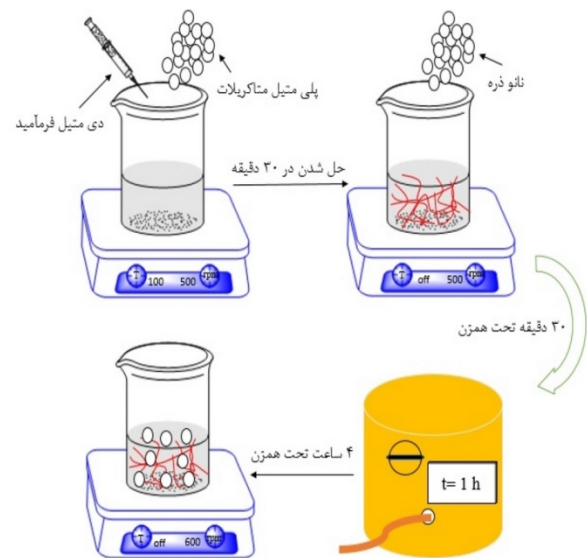
۳- نتایج و بحث

تصویر الکترونی فیلم PMMA خالص سطح صاف و یکنواختی را نشان داده است [۷].

شکل ۲-الف تصویر میکروسکوپ الکترونی نانو فیلم آئیل شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. طبق شکل، سطح نانوکامپوزیت PMMA-SiO₂ غیر یکنواخت است و ذرات تجمع یافته در برخی نواحی وجود دارد. می‌توان گفت وجود نانو ذرات سیلیکا در فیلم نانوکامپوزیت، مورفولوژی سطح را تحت تأثیر قرار داده است [۸].

علاوه بر این نانو حفراتی در فیلم مشاهده شده است. این حفرات ممکن است در حین پخت در نانو فیلم ایجاد شده باشد. وجود حفرات باعث افزایش نیروی موینگی شده و مانند لوله موین عمل کرده و در نهایت خواص ترشوندگی نانو فیلم را تحت تأثیر قرار داده است [۶].

سلسیوس و همزمان به مدت ۳۰ دقیقه تحت همزدن مغناطیسی قرار گرفت. پس از گذشت ۳۰ دقیقه محلول کاملاً شفاف که نشان دهنده‌ی حل شدن کامل پودر پلیمری در حلال است، بدست آمد. در مرحله‌ی بعد ۰/۵ درصد وزنی از نانو ذرات به محلول فوق افزوده شد تا نانوکامپوزیت پلیمری ۰/۵ درصد وزنی تهیه شود. با هدف پراکندگی بهتر نانو ذرات در زمینه، پس از افزودن نانو ذرات، محلول حاصل به مدت ۳۰ دقیقه تحت همزن مغناطیسی قرار گرفت. سپس ۱ ساعت تحت امواج فرا صوت (حمام فرا صوت) و مجدداً به مدت ۴ ساعت تحت همزن مغناطیسی قرار گرفت [۶]. بعد از اتمام این مراحل محلول آماده پوشش دهی است. شماتیکی از این مراحل در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. شماتیک آماده سازی محلول نانوکامپوزیت

۲-۴- پوشش دهی

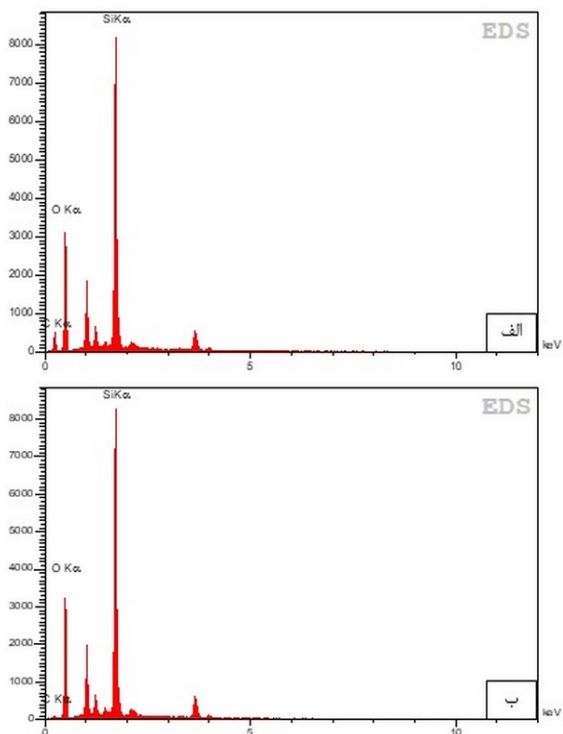
زیرلایه‌های آماده شده در محلول فوق به مدت ۵ ثانیه غوطه‌ور شده و در دمای محیط به مدت ۱۲ ساعت قرار گرفتند تا خشک شوند [۶].

جدول ۱. کد گذاری نمونه‌ها و مشخصات آن‌ها

شماره نمونه	مشخصات نمونه
۱	نانوکامپوزیت آئیل شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس
۲	نانوکامپوزیت آئیل شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس

شکل ۲-ب تصویر میکروسکوپ الکترونی نانو فیلم آنیل شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. انباشتگی‌هایی از نانو ذرات که برآمدگی‌های با مقیاس نانو را ایجاد کرده‌اند، در شکل قابل مشاهده است. این انباشتگی‌ها ساختار نانوکامپوزیت را نشان می‌دهند [۷]. زبری‌های نانو مقیاس سطحی خشن را برای فیلم ایجاد کرده که باعث افزایش خواص آبدوستی فیلم خواهد شد [۹].

شکل ۲-ب تصویر میکروسکوپ الکترونی نانو فیلم آنیل شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. انباشتگی‌هایی از نانو ذرات که برآمدگی‌های با مقیاس نانو را ایجاد کرده‌اند، در شکل قابل مشاهده است. این انباشتگی‌ها ساختار نانوکامپوزیت را نشان می‌دهند [۷]. زبری‌های نانو مقیاس سطحی خشن را برای فیلم ایجاد کرده که باعث افزایش خواص آبدوستی فیلم خواهد شد [۹].



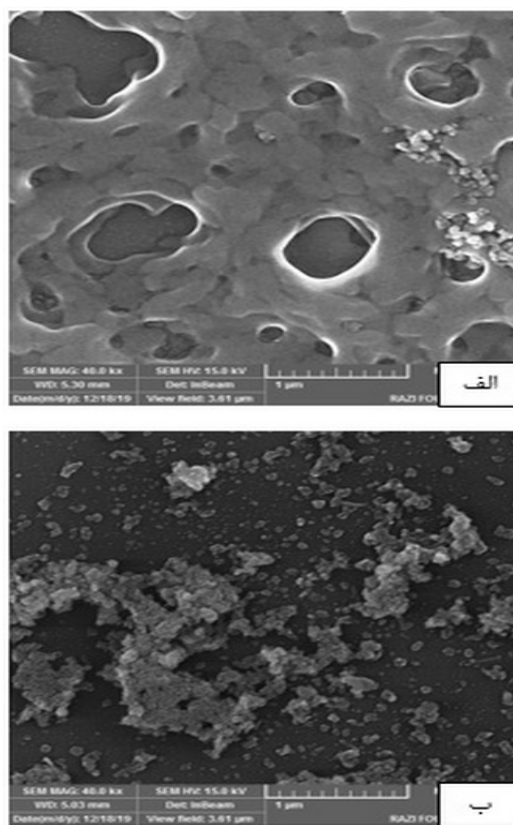
شکل ۳. آزمون EDS نانوکامپوزیت آنیل شده در دمای الف) ۱۰۰ درجه سلسیوس (نمونه‌ی شماره ۱) و ب) ۵۰۰ درجه سلسیوس (نمونه‌ی شماره ۲)

جدول ۲. درصد عناصر موجود در نانوکامپوزیت آنیل شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس (نمونه‌ی شماره ۱)

درصد وزنی	نوع عنصر
۱۹/۶۷	کربن
۲۸/۰۲	سیلیسیم
۵۲/۳۱	اکسیژن

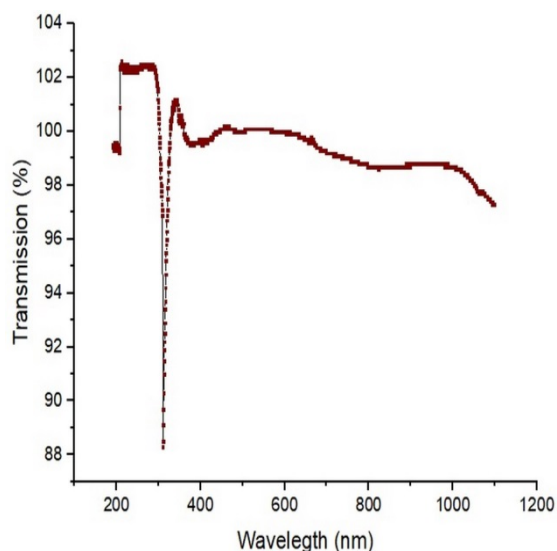
شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی نشر میدان با بزرگنمایی ۴۰۰۰۰ برابر برای نانوکامپوزیت آنیل شده در دمای الف) ۱۰۰ درجه سلسیوس (نمونه‌ی شماره ۱) و ب) ۵۰۰ درجه سلسیوس (نمونه‌ی شماره ۲) را نشان می‌دهد

نتایج آزمون EDS برای نمونه‌های آنیل شده در دمای ۱۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج حاصله از این آزمون برای نمونه‌های آنیل شده در دمای ۱۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب در جدول ۲ و ۳ قابل مشاهده است. این نتایج کاهش چشم‌گیر مقدار کربن را در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. علاوه بر این مقدار سیلیسیم و اکسیژن به مقدار اندکی افزایش یافته است. کاهش مقدار کربن می‌تواند ناشی از سوختن پلیمر در دمای

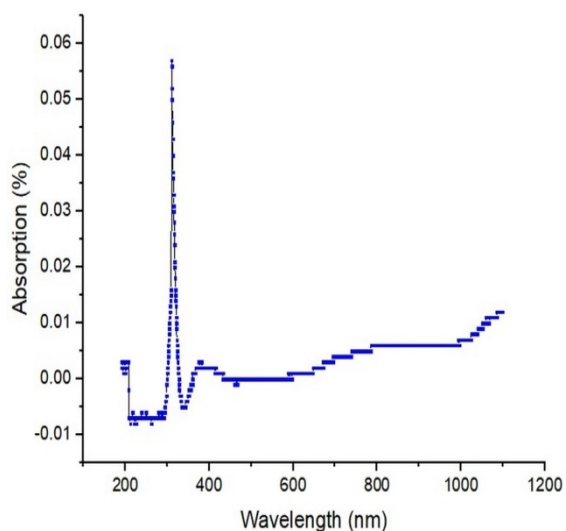


شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی نشر میدان با بزرگنمایی ۴۰۰۰۰ برابر برای نانوکامپوزیت آنیل شده در دمای الف) ۱۰۰ درجه سلسیوس (نمونه‌ی شماره ۱) و ب) ۵۰۰ درجه سلسیوس (نمونه‌ی شماره ۲) را نشان می‌دهد

نتایج آزمون EDS برای نمونه‌های آنیل شده در دمای ۱۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج حاصله از این آزمون برای نمونه‌های آنیل شده در دمای ۱۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب در جدول ۲ و ۳ قابل مشاهده است. این نتایج کاهش چشم‌گیر مقدار کربن را در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. علاوه بر این مقدار سیلیسیم و اکسیژن به مقدار اندکی افزایش یافته است. کاهش مقدار کربن می‌تواند ناشی از سوختن پلیمر در دمای



شکل 4. طیف عبور نانوکامپوزیت آنیل شده در دمای 500 درجه سلسیوس (نمونه‌ی شماره 2)



شکل 5. طیف جذب نانوکامپوزیت آنیل شده در دمای 500 درجه سلسیوس (نمونه‌ی شماره 2)

بر طبق شکل 4 و 5 می‌توان میزان بازتاب نمونه را محاسبه کرد. با توجه به این که میزان عبور زیرلایه مرجع 100 درصد و میزان جذب آن صفر درصد در نظر گرفته شده است؛ میزان بازتاب زیرلایه مرجع در طول موج 550 نانومتر، 4/5 درصد است. همچنین میزان بازتاب پوشش در طول موج 550 نانومتر، 4/4 درصد محاسبه شده است. این به معنی کاهش 0/1 درصدی میزان بازتاب پوشش نسبت به زیرلایه مرجع است. از آنجایی که مقادیر گزارش شده بسیار ناچیز بوده، می‌توان گفت میزان جذب و عبور پوشش و زیرلایه مرجع با هم برابرند.

جدول 3. درصد عناصر موجود در نانوکامپوزیت آنیل شده در دمای 500 درجه سلسیوس (نمونه‌ی شماره 2)

درصد وزنی	نوع عنصر
7/09	کربن
35/11	سیلیسم
57/81	اکسیژن

جدول 4. میزان زبری نمونه‌ها در دمای آنیل 500 درجه سلسیوس

مشخصات نمونه	زبری (RMS)
زیرلایه (بدون آنیل)	0/49
پوشش پلیمری	5/7
پوشش نانوکامپوزیت	19/6

این مقدار زبری در فیلم نانوکامپوزیت تأثیر چشم‌گیر بر قابلیت ترشوندگی سطح دارد که در ادامه بحث می‌شود. طیف عبور نانوکامپوزیت آنیل شده در دمای 500 درجه سلسیوس در محدوده طول موج 100 تا 1200 نانومتر در شکل 4 ارائه شده است. در این آزمون از زیرلایه شیشه (به جای هوا) بعنوان مرجع استفاده شده است. یعنی میزان عبور نمونه‌ها به جای مقایسه با میزان عبور هوا، با میزان عبور زیرلایه‌ی شیشه‌ای سنجیده شده است. میزان عبور نمونه در طول موج 550 نانومتر، 100/1 درصد نسبت به زیرلایه‌ی مرجع است. این بدین معنی است که پوشش به میزان 0/1 درصد عبور بیش‌تری نسبت به زیرلایه مرجع از خود نشان داده است. طیف جذب نانوکامپوزیت آنیل شده در دمای 500 درجه سلسیوس در محدوده طول موج 100 تا 1200 نانومتر در شکل 5 ارائه شده است. در این آزمون از زیرلایه شیشه (به جای هوا) بعنوان مرجع استفاده شده است. یعنی میزان جذب نمونه به جای مقایسه با میزان جذب هوا، با میزان جذب زیرلایه‌ی شیشه‌ای سنجیده شده است. میزان جذب نمونه در طول موج 550 نانومتر، صفر درصد نسبت به زیرلایه‌ی مرجع است. این بدین معنی است که جذب پوشش با جذب زیرلایه مرجع برابر است.

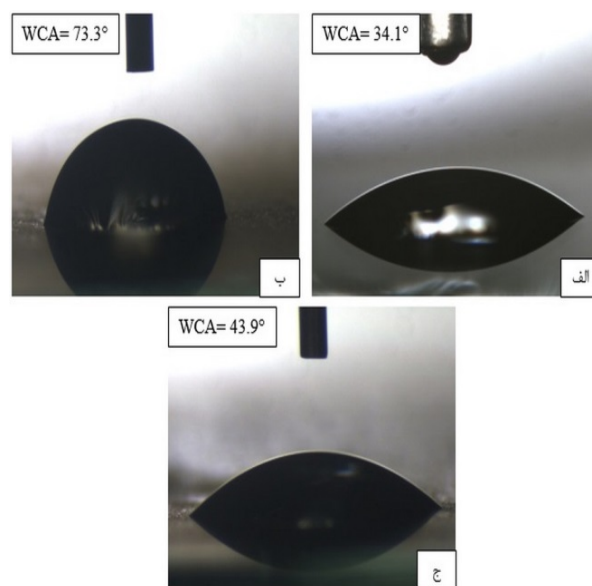
تخریب حرارتی پلیمر به مونومرهایی است که خواص آبدوستی دارند [۱۳، ۱۲]. علاوه بر این افزایش زبری سطح در عملیات آنیل باعث کاهش زاویه تماس نانوکامپوزیت شده است.

فوق آبدوستی فیلم نانوکامپوزیت PMMA-SiO₂ به مورفولوژی سطح و ترکیب شیمیایی فیلم نسبت داده می‌شود. بر طبق نظریه ونزل، زبری سطح و تعداد حفره‌ها (که به دلیل انباشتگی نانو ذرات زبر تشکیل شده‌اند) در فیلم نانوکامپوزیت نقش مهمی را در ترشوندگی سطح ایفا می‌کند [۱۴]. به عبارت دیگر، افزایش زبری سطح منجر به ایجاد مساحت تماس وسیع‌تر بین قطره‌ی آب و سطح فیلم می‌شود، بنابراین بر طبق مدل ونزل ترشوندگی بهبود می‌یابد. معادله (۱) مدل ونزل را ارائه می‌دهد.

$$\cos \theta_w = r \cos \theta_y \quad (1)$$

در این معادله θ_w زاویه تماس سطح زبر، θ_y زاویه تماس سطح صاف با همان ماده و r فاکتور زبری (بعنوان نسبت بین مساحت سطح واقعی به مساحت سطح ظاهری تعریف شده است) است. کاملاً بدیهی است که ترشوندگی سطح، نتیجه‌ی همکاری بین توپوگرافی سطح و شیمی سطح است. بر طبق تئوری ونزل در مواد آبدوست ($\theta_y < 90$)، افزایش r منجر به کاهش زاویه تماس آب می‌شود. با این حال فوق آبدوستی فیلم نانوکامپوزیت PMMA-SiO₂ بطور کامل به زبری سطح مربوط نمی‌شود [۱۵، ۱]. یکی دیگر از عوامل اصلی رفتار فوق آبدوستی عالی فیلم نانوکامپوزیت PMMA-SiO₂ محتوای بالای گروه‌های آبدوست سطح است. این گروه‌های آبدوست برای ایجاد پیوندهای هیدروژنی با مولکول‌های H₂O پیوند می‌دهند؛ در نتیجه فوق آبدوستی حاصل می‌گردد. برای معرفی گروه‌های آبدوست PMMA لازم است تا تجزیه آن در دمای بالا مورد بررسی قرار گیرد. تجزیه حرارتی پلی متیل متاکریلات توسط برش‌های تصادفی در زنجیر اصلی پلیمر آغاز می‌شود. در سال ۱۹۹۱، مانرینگ^۱ یک واکنش آغازگر متناوب را که شامل برش گروه‌های جانبی

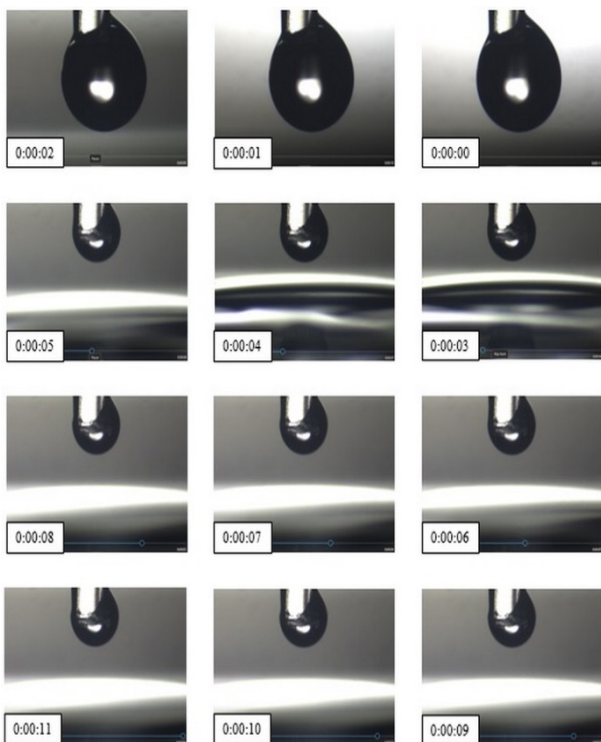
آزمون ترشوندگی جهت تعیین زاویه تماس نمونه‌ها انجام گرفت. این نتایج در شکل ۶ و ۸ قابل مشاهده است. شکل ۶-الف زاویه تماس زیرلایه شیشه را ۳۴/۱ درجه نشان می‌دهد. در شکل ۶-ب زاویه تماس پلیمر پلی متیل متاکریلات، که زمینه‌ی نانوکامپوزیت را تشکیل می‌دهد، ۷۳/۳ درجه است. این عدد خاصیت آبدوستی پلیمر را نشان می‌دهد [۷، ۱۰، ۱۱]. در شکل ۶-ج زاویه تماس نانوکامپوزیت آنیل شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس را ارائه شده است. در این شکل قابل مشاهده است که زاویه تماس پوشش با افزودن نانو ذرات سیلیکا از ۷۳/۳ به ۴۳/۹ درجه کاهش یافته است. دلیل این کاهش زاویه می‌تواند افزایش زبری ایجاد شده توسط نانو ذرات در سطح نانوکامپوزیت نسبت به پلیمر تنها باشد [۶]. علاوه بر این همانطور که در تصویر میکروسکوپ الکترونی این نمونه نمایان است (شکل ۲-الف) در پوشش حفراتی قابل مشاهده هستند که این حفرات نقش مؤثری را در کاهش زاویه تماس ایفا می‌کنند [۱].



شکل ۶. آزمون ترشوندگی (الف) زیرلایه، (ب) پوشش پلیمری پلی متیل متاکریلات (بدون نانوذره) و (ج) پوشش نانوکامپوزیت آنیل شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس (نمونه‌ی شماره ۱) را نشان می‌دهد

شکل ۸ پخش شدن کامل قطره آب را در کمتر از چند ثانیه روی سطح پوشش نشان می‌دهد. کاهش ناگهانی زاویه تماس از ۴۳/۹ به حدود صفر درجه در دمای آنیل بالا به دلیل

¹ Manring



شکل ۸. آزمون ترشوندگی نانوکامپوزیت آنیل شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس (نمونه‌ی شماره ۲) را نشان می‌دهد

۴- نتیجه‌گیری

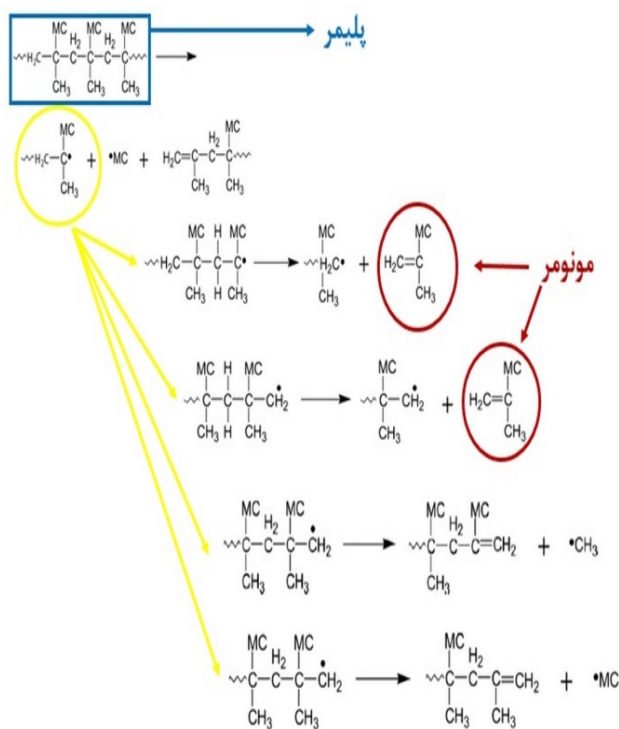
در این پژوهش پوشش نانوکامپوزیت PMMA-SiO₂ به روش غوطه‌وری بر روی زیرلایه شیشه اعمال گردید. نتایج حاصل از آزمون‌ها نشان داد که دمای آنیل ۵۰۰ درجه سلسیوس خواص نوری مناسب و ترشوندگی کامل پوشش را فراهم می‌کند. نتایج کاهش زاویه تماس را از ۳۴/۱ درجه به حدود صفر درجه نشان داد. همچنین زبری سطح از ۰/۴۹ به ۱۹/۶ نانومتر افزایش یافت. علاوه بر این طیف‌های عبور و جذب پوشش نشان دادند که در طول موج ۵۵۰ نانومتر شفافیت زیرلایه‌ی شیشه با فیلم نانوکامپوزیت PMMA-SiO₂ بدون تغییر ماند. این پوشش‌های شفاف فوق آبدوست می‌تواند در کاربردهای خود تمیز شونده‌ی و ضد مه مورد استفاده قرار گیرند.

۵- سپاسگزاری

از همکاری صمیمانه اساتید بزرگواری که بنده را در تهیه این مقاله یاری کردند، بسیار سپاسگزارم. همچنین از حمایت‌های پژوهشگاه مواد و انرژی کمال تشکر را دارم.

متوکسی کربنیل (MC = COOCH₃) است، پیشنهاد کرد. بر طبق یک بررسی شبیه سازی با مدل دینامیک مولکولی در تخریب حرارتی PMMA، احتمال اتفاق افتادن واکنش (شکل ۷) ۶۰-۵۰ درصد است.

این شکل تبدیل پلیمر به مونومر و گروه‌های آبدوست را در اثر تخریب حرارتی PMMA نشان می‌دهد. تولید مونومر با تشکیل تعدادی از گونه‌های پایدار با وزن مولکولی کم (H₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆, HCOOCH₃) همراه است. در بین این محصولات، گروه جانبی متوکسی کربونیل (HCOOCH₃) به دلیل قرار گرفتن در دسته‌ی استرها و کربوکسیلیک‌ها خاصیت آبدوستی سطح را افزایش می‌دهد. علاوه بر این PMMA پلیمری آبدوست است و در اثر تخریب حرارتی به مونومر خودش که خاصیت آبدوستی دارد تبدیل می‌شود [۱۲].



شکل ۷. محصولات حاصل از تخریب حرارتی PMMA

بنابراین هم گروه‌های آبدوست سطح و هم ساختار زبر منجر به فوق آبدوستی پوشش نانوکامپوزیت PMMA-SiO₂ شده است.

مراجع

8. Soni, G., Srivastava, S., Soni, P., Kalotra, P., Vijay, Y. K., "Optical, mechanical and structural properties of PMMA/SiO₂ nanocomposite thin films", *Materials Research Express*, Vol. 5, No. 1, (2018), 15302. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaa0f7>
9. Eshaghi, A., "Transparent hard self-cleaning nano-hybrid coating on polymeric substrate", *Progress in Organic Coatings*, Vol. 128, (2019), 120-126. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.12.021>
10. Abjahan, T. K., Hejazi, I., Hosseini, L., Seyfi, J., Davachi, S. M., Khonakdar, H. A., "Polyvinyl alcohol-modified Pithecellobium Clypearia Benth herbal residue fiber/polypropylene composites", *Polymer Composites*, Vol. 37, No. 3, (2016), 915-924. <https://doi.org/10.1002/pc.23250>
11. Sriram, S., Kumar, A., "Separation of oil-water via porous PMMA/SiO₂ nanoparticles superhydrophobic surface", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 563, (2019), 271-279. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.12.017>
12. Stoliarov, S. I., Westmoreland, P. R., Nyden, M. R., Forney, G. P., "A reactive molecular dynamics model of thermal decomposition in polymers: I. Poly(methyl methacrylate)", *Polymer*, Vol. 44, No. 3, (2003), 883-894. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00761-9](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00761-9)
13. Holland, B. J., Hay, J. N., "The kinetics and mechanisms of the thermal degradation of poly(methyl methacrylate) studied by thermal analysis-Fourier transform infrared spectroscopy", *Polymer*, Vol. 42, No. 11, (2001), 4825-4835. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00923-X](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00923-X)
14. Bundgaard, H., Larsen, J. D., "N-Sulfonyl imidates as a novel prodrug form for an ester function or a sulfonamide group", *Journal of Medicinal Chemistry*, Vol. 31, No. 11, (1988), 2066-2069. <https://doi.org/10.1021/jm00119a002>
15. Aghaei, R., Eshaghi, A., Aghaei, A. A., "Durable transparent super-hydrophilic hollow SiO₂-SiO₂ nanocomposite thin film", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 219, (2018), 347-360. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.08.039>
1. Aghaei, R., Eshaghi, A., "Optical and superhydrophilic properties of nanoporous silica-silica nanocomposite thin film", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 699, (2017), 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.327>
2. Wang, R., Hashimoto, K., Fujishima, A., Chikuni, M., Kojima, E., Kitamura, A., Shimohigoshi, M., Watanabe, T., "Light-induced amphiphilic surfaces", *Nature*, Vol. 388, No. 6641, (1997), 431-432. <https://doi.org/10.1038/41233>
3. Ren, S., Wang, L., Yu, H., Haroon, M., Ullah, R. S., Haq, F., Khan, R. U., Fahad, S., "Recent progress in synthesis of antifogging agents and their application to agricultural films: A review", *Journal of Coatings Technology and Research*, Vol. 15, No. 3, (2018), 445-455. <https://doi.org/10.1007/s11998-018-0051-x>
4. Eshaghi, A., Mojab, M., "Fabrication of antireflective antifogging nano-porous silica thin film on glass substrate by layer-by-layer assembly method", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 405, (2014), 148-152. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.09.017>
5. Bliivi, A. S., Benhui, F., Bai, J., Kondo, D., Bédoui, F., "Experimental evidence of size effect in nano-reinforced polymers: Case of silica reinforced PMMA", *Polymer Testing*, Vol. 56, (2016), 337-343. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.10.025>
6. Sriboonruang, A., Kumpika, T., Sroila, W., Kantarak, E., Singjai, P., Thongsuwan, W., "Superhydrophobicity/superhydrophilicity transformation of transparent PS-PMMA-SiO₂ nanocomposite films", *Ukrainian Journal of Physics*, Vol. 63, No. 3, (2018), 226-231. <https://doi.org/10.15407/ujpe63.3.226>
7. Wang, J., Chen, X., Kang, Y., Yang, G., Yu, L., Zhang, P., "Preparation of superhydrophobic poly(methyl methacrylate)-silicon dioxide nanocomposite films", *Applied Surface Science*, Vol. 257, No. 5, (2010), 1473-1477. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.08.075>