



סקירה על נוחומרים מרוכבים

תמונה מס' 1 | מטוס "חמקן" F-117

רונית ברד*

יותר, ששטח הפנים שלהם תואם. ההגדרה השנייה: חומרים המכילים משריינים כמו סיבים או חלקיקים, הנתמכים על-ידי חומר מאגד-מטריצה. הגדרה זו היא ממוקדת יותר מכיוון שהיא חלה על חומרים מרוכבים שמשמשים בעיקר ליישומים הנדסיים או מבניים. ההגדרה השלישית מכוונת בעיקר לננוחומרים מרוכבים: ננוחומרים מרוכבים הם מוצק רב-פאזות, שבאחת הפאזות שלו יש ממד אחד או שניים-שלושה ממדים שגודלם קטן מ-100 ננומטר, (1, 2).

במהלך השנה האחרונה השתתפתי בקורס מיוחד במינו במסגרת לימודי לתואר שני בתכנית רוטשילד-ויצמן. במהלך הקורס נחשפנו לעקרונות של ננוטכנולוגיה ולהשפעת שינויים ננומטריים על תכונות הצבר המוצק. אני בחרתי להתמקד בנושא ננוחומרים מרוכבים, ומכאן התפתחה סקירה זו. חומרים מרוכבים ניתנים להגדרה בעזרת שלוש ההגדרות האלה: האחת מתייחסת לחומרים מרוכבים באופן כללי: חומרים מרוכבים הם שילוב מקרוסקופי של שני חומרים שונים או

*רונית ברד, מורה לכימיה וסטודנטית לתואר שני במסגרת תכנית "רוטשילד-ויצמן". המאמר הינו חלק מהדו"ח המסכם במסגרת הקורס: מבוא לחומרים וננוטכנולוגיה, בהנחית פרופ' רשף טנא ודר' רון בלונדר, מכון ויצמן למדע.

חומרים מרוכבים מוכרים כבר בתקופת התנ"ך: "ולא יכלה עוד להצפינו ותיקח לו תיבת גומא ותחמרה בחמר ובזפת ותשם בה את הילד", שמות ב', פסוק ג'.

מטוס "החמקן" בתמונה 1, עשוי גם הוא מחומרים מרוכבים: הוא פותח בשנות השמונים ועשוי מהחומר היקר ביותר שיוצר אי פעם, כ-30\$ לגרם חומר. בפיתוחו של המטוס הושקעו כ-23 מיליארד דולר והועסקו כ-13,000 אנשים. בשל המבנה המיוחד של המטוס ובשל המסה הקטנה יחסית, הוא יכול להגיע למהירויות גבוהות של 1000 קמ"ש ולטוס לטווחים של 11,000 ק"מ, (3, 4).

היישום האזרחי של מטוס החמקן הוא מטוס DREAMLINER של חברת בואינג (787). המטוס מיוצר בטכנולוגיה חדשה שפותחה בחברת בואינג. מעל 50% מהמבנה הראשוני של המטוס, ובכלל זה הכנפיים וגוף המטוס, עשויים מחומרים מרוכבים שהם חזקים יותר וקלים יותר מהחומרים המסורתיים המבוססים בעיקר על מתכות. המטוס מיוצר כיחידה אחת בשיטת ייצור זו מפחיתים את השימוש בכ-1,500 פיסות של אלומיניום ובי-40,000-50,000 חיבורים. מטוס הבואינג 787 יכול להסיע מעל 300 נוסעים למרחק של 15,000 ק"מ, ותצרוכת הדלק שלו קטנה ב-20% מזו של המטוסים שפותחו עד היום למטרות דומות.

בזכות חומרי הייצור והטכנולוגיה, גם הסביבה הפנימית של המטוס נעימה יותר לנוסעים. האוויר במטוס אינו מיובש מכיוון שאין צורך להתגונן מפני קורוזיה של חלקי מתכת. כמו כן אין צורך לשנות את לחץ האוויר בתוך המטוס על מנת להתאימו ללחץ החיצוני, מכיוון שהחומרים שממנו עשוי המטוס חזקים מספיק ויכולים לעמוד בשינויי הלחץ החיצוני בזמן הטיסה. הטכנולוגיה המרשימה המשמשת בבניית המטוסים הללו פותחה לפני 40 שנים.

פיתוחים משמעותיים בתחום ה-Nanocomposites התחילו לפני כ-10 שנים, ועל פי התחזית הם ייושמו בתוך 10 שנים, (5, 6, 7, 8).

חומרים מרוכבים מכילים בדרך כלל פאזה של סיבים או חלקיקים בלתי רציפים בעלי חוזק וקשיחות העולים על אלה של הפאזה הרציפה שבתוכה הם נמצאים. בעקבות השילוב ניתן להשיג שיפור משמעותי בחלק מהתכונות של החומרים, בעיקר של הפאזה הרציפה. בחומרים המרוכבים במאקרו-חלקיקים התכולה הנפחית של החומר המשריין צריכה להיות בין 10%-65% מכלל החומר על מנת להשיג את השיפור הרצוי בתכונות. בחומרים המרוכבים בננוחלקיקים ניתן להשיג שיפור דומה בתכונות אלו ואף גדול יותר בתכולה נפחית של 2%.

על חומרים מרוכבים, תכונותיהם, יתרונותיהם וחסרונותיהם, ניתן לקרוא במאמר ["חומרים מרוכבים – היכרות על קצה המזלג"](#), אביב אקונס.

ננוחומרים מרוכבים הם חומרים שבהם החומר המוסף לפאזה העיקרית הוא בעל קוטר ננומטרי אחד לפחות. השיפור בתכונות המכניות של החומר המרוכב הוא גדול יותר מזה המתקבל בחומרים מרוכבים המכילים חלקיקים מיקרוסקופיים מאותו חומר. לכן ניתן להשיג מהם איכויות ושימושים שלא ניתן לקבל בדרכים אחרות. לדוגמה: אם יש הבדל במקדמי השבירה האופטיים של הסיבים ושל המטריצה המחזיקה אותם, יתקבל חומר אטום. אבל אם משתמשים בסיבים שהקוטר שלהם קטן בהרבה מאורך הגל של האור הנראה, יתקבל חומר שקוף.

במושגים מכניים חומרים ננומרוכבים הם שונים מהמרוכבים הקונבנציונליים, בגלל היחס הגדול בין שטח הפנים לנפח.

$$\text{Surface} \setminus \text{volume} = d^2 \setminus d^3 = 1 \setminus d$$

ככל שהקוטר המשפיע קטן יותר, היחס בין שטח הפנים לנפח גדל, ובגדלים ננומטריים הוא משמעותי מאוד. ההשפעה ההדדית בין המטריצה לחומר החיזוק מתרחשת בעיקר בקרבת חומר החיזוק; ככל שהיחס בין שטח הפנים לנפח גדול יותר, שטח המגע בין הננוחלקיקים למטריצה המכילה אותם גדול יותר, והשינוי בתכונות משמעותי יותר.

שטח פנים גדול כלי-כך גורם לזה שכמות קטנה של ננוחלקיקים יכולה להשפיע על תכונות ברמה מקרוסקופית. לדוגמה: ננוצינוריות של פחמן (Carbon nanotubes) משפרות את המוליכות החשמלית ואת מוליכות החום. ננוחלקיקים אחרים ישפיעו על תכונות אופטיות, תכונות דיאלקטריות, עמידות לחום, תכונות מכניות כמו קשיחות, חוזק, עמידות לנזקים.

בדרך-כלל חומרי החיזוק מפורזים בתוך החומר במהלך הייצור. התוצאות המתקבלות תלויות בהרבה גורמים, בין היתר בחוזק האינטראקציה בין שטח הפנים של המילוי ובין המטריצה הפולימרית, בצורת החומר המחזק ובשיטות הייצור.

הסקמה בתמונה 2 מתארת תהליך שבו מפגישים בין שרשרות של פולימר לשכבות של סיליקטים. בשלב הראשון יש חיתוך של אגריגטים של סיליקט (האגריגטים הם בגודל של מיקרונים) ואחר-כך מזרימים את הפולימר. החלקיקים המפוזרים בתוך הפולימר הם בעובי ננומטרי (תמונה 3), (9, 10, 11, 12).

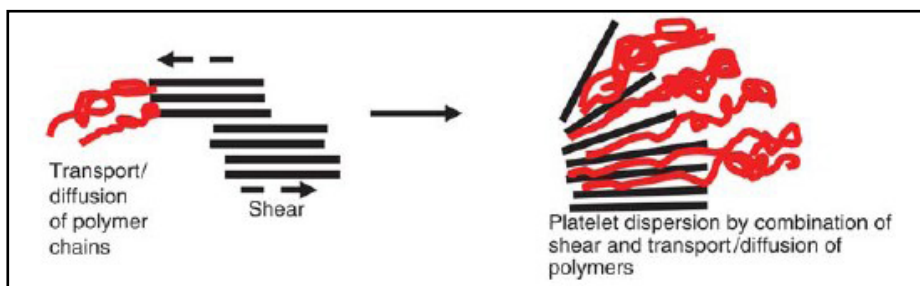
ניתן למצוא ננוחלקיקים בשלוש צורות עיקריות: כדור, דסקית וצורה מאורכת. בגרף 1 מוצגת הגדרה נוספת לננוחלקיקים: על פי ה- δ שלהם. δ הוא היחס בין t (שטח המגע מסביב לחלקיקים) לבין r (רדיוס). חלקיק ייחשב ננומטרי אם ה- δ המחושב עבורו הוא 10.

Aspect ratio הוא פרמטר המחושב באופן שונה עבור כל אחת מהצורות, ובעזרתו ניתן להגדיר את סוג החלקיק: ערך שווה ל-1 קובע את הצורה הספרית, קטן מ-1 עבור צורת הדיסקית וגדול מ-1 עבור הצורה המאורכת.

על מנת להעריך את חשיבות ה-Nanocomposites במחקר ובפיתוחים חדשים, ניתן להשתמש



תמונה מס' 3 | תמונת TEM של סיליקטים המפוזרים במטריצת פולימר



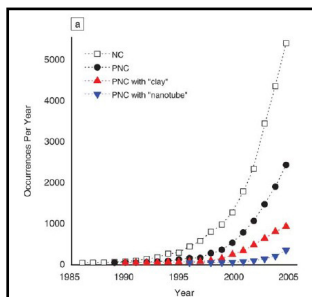
תמונה מס' 2 | סכמה המתארת את אחת מדרכי הפיזור של שכבות סיליקטים המפוזרים במטריצת פולימר

ננוחומרים, וכן מחלקיקים של גליום בודד שמחובר לקצה הפרח. היחס הגבוה בין שטח הפנים לנפח של חלקיקים אלה מקיים תכונות כימיות שונות מאלה של המבנה המקרוסקופי. הצורות המתקבלות תלויות בלחץ ובטמפרטורה בתהליך. המבנים האלו יכולים לשמש כציפוי חסין מים הטוב ביותר שקיים היום. היישומים שלהם הם באולטרה קבלים ובטלפונים הסלולריים העתידניים – מכשירים גמישים. (15,14,13)

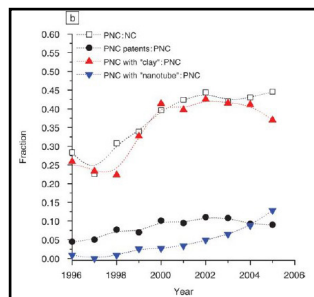
טונגסטן די סולפיד WS_2 : ננוחלקיקים של טונגסטן די סולפיד מיוצרים בצורת Nanotubes או בצורה כדורית. את הננוצינוריות ניתן לייצר כמבנים מושלמים, כמעט ללא פגמים. המבנה והאיכות הגבוהה מאפשרים להם לספוג זעזועים ודפורמציות, ולכן הם מיועדים לייצור אפודימגן, קסדות ואמצעי מיגון לרכב. החלקיקים האלה חזקים פי 4-5 מפלדה ופי 6 מקבלר.

טונגסטן די סולפיד ניתן לייצר גם מבנה שכבות עגול, דמוי בצל שהחלק הפנימי שלו חלול. ננוכדוריות אלו יכולות לשמש כתחליף לשמני סיכה המונעים חיכוך. נמצא כי אבקה של חלקיקים אלו יעילה פי 6-10 מחומרי סיכה אחרים וזהו "חומר הסיכה היבש הננומטרי הראשון בעולם" Nano Lubricant.

בזמן הפעלת כוח השכבות של WS_2 נעות בינן לבין עצמן, והחור שבמרכז המבנה מאפשר את הגמישות. המבנה יכול לעמוד בלחצים גדולים מאוד. כאשר האבקה נמצאת בין מתכות, החלקיקים משמשים כמסבים כדוריים, ומצליחים בתפקידם גם כאשר מדובר בחומרים ששטח הפנים שלהם אינו חלק, מכיוון שהגודל הזעיר של הכדורים מאפשר להם להיכנס לשקעים של שטח הפנים, ויתר החלקיקים משמשים



גרף מס' 2 | פרסומים בנושא

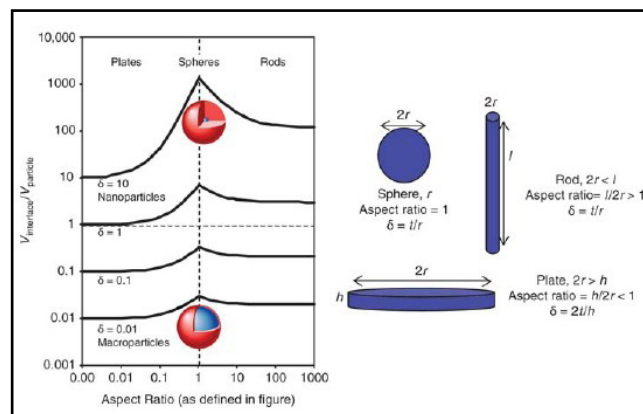


בגרף 2 a ו-b. גרף 2a מראה את העלייה במספר ההתייחסויות למושגים NC (Nanocomposites) ו-PNC (Polymer Nanocomposites) בפרסומים השנתיים של מאגרי מידע של ארגון הכימיקלים האמריקני MEDALIN and CAPLUS. בהתבוננות בגרף 2a ניתן לראות את העלייה המשמעותית בשנים האחרונות. העלייה בתחום ה-Nanotube בולטת, בעוד האחרים מגיעים לרוויה פחות או יותר. גרף 2b מראה את הפרסומים בתוך תחום ה-NC. גם כאן מודגשת הרוויה ב-clay ובפרסומים כלליים, ורואים את העלייה בתחום הפטנטים (יישומים) ובתחום ה-Nanotube.

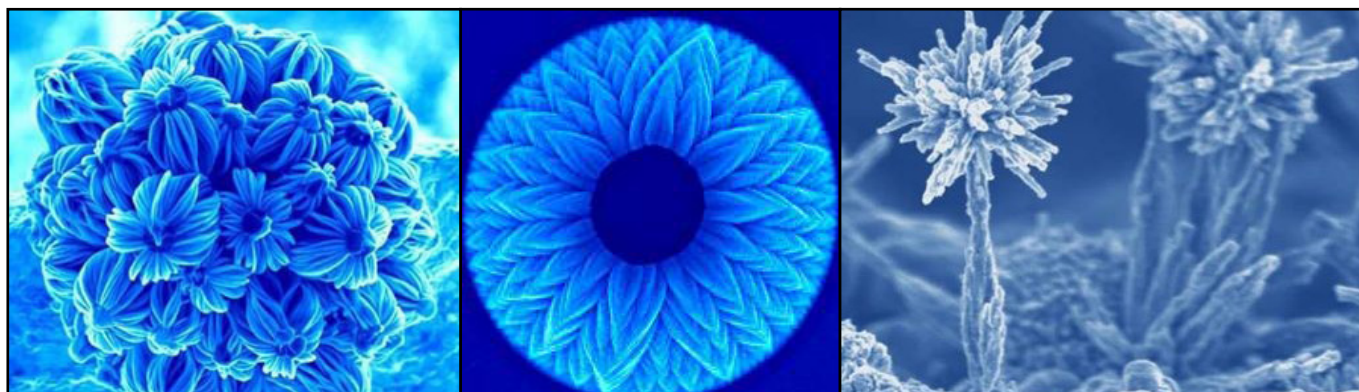
החומרים

Nanocomposites מורכבים, כאמור, משתי קבוצות של חומרים: החומר המחזק ומטריצת הפולימר ה"מארחת". מספר החומרים האפשריים בכל קבוצה הוא גדול ומגוון. בסקירתי אתייחס בקצרה לשניים מחומרי החיזוק: סיליקון קרביד SiC: ננוחלקיקים של סיליקון קרביד ניתן למצוא בצורות שונות ובדרגות ניקיון שונות. ניתן להשיג אותם גם בדרגת ניקיון גבוהה מאוד.

המבנים של ננופרחים המתוארים בתמונות 6,5,4 פותחו ע"י דוקטורנט במכללת קימברידג'. הם התקבלו על-ידי טפטוף של גליום נוזלי על משטח סיליקון בנוכחות גז מתאן. הננו פרח עשוי מגבעול שזור ומראש פקעת המורכב ממארו של



גרף מס' 1 | היחס $V_{interface}/V_{particle}$ כפונקציה של aspect ratio



תמונות מס' 4, 5, 6 | ננופרחים מסיליקון קרביד

מידע על הפולימרים הנפוצים בייצור חומרים מרוכבים ניתן למצוא במאמר ["חומרים מרוכבים – היכרות על קצה המזלג"](#) של אביב אקונס.

הוספת החלקיקים למטריצת הפולימר נעשית כאשר החומר תרמופלסטי, לפני יצירת קשרי הצילוב. בחלק מהמקרים משתלבים החלקיקים בקשרי הצילוב, וזהו המצב המועדף. האתגר הגדול הוא בפיזור הנוחלקיקים בפאזה הפולימר. לחלקיקים יש נטייה להיאסף לאגרגטים, ולכן השגת אתגר זה היא מורכבת וייחודית לשני החומרים המרוכבים. אדהויה טובה בין החלקיקים לפולימר מונעת החלקה של החלקיקים בתוך המבנה, (10, 11, 12).

שיטות הייצור של ננוצינוריות או של סיבים המשמשים כמרכיב המחזק

בתהליכי הייצור, כמו בכל עניין בתחום, יש מגוון רב של דרכים ושיטות. אני אתייחס לשתי שיטות לייצור סיבים או צינוריות בגדלים ננומטריים:

Electrospinning, Template Synthesis.

Electrospinning

אחת השיטות הטובות יותר לייצור כמויות גדולות של ננוסיבים בודדים מסוגים שונים של פולימרים. עקרונות השיטה פותחו לפני כ-70 שנים. הרעיון הכללי הוא לשלוט בייצור הסיבים בעזרת מתח חשמלי. במערכת ישנם שלושה מרכיבים עיקריים:

כמסבים. חומרי-סיכה אלה אינם מתכלים ואינם דורשים פעילות של החלפה או תחזוקה.

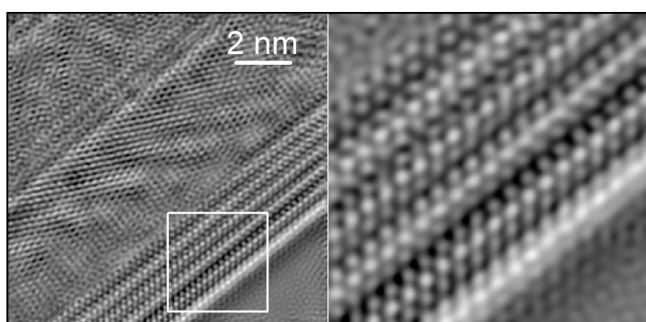
מבנים אלו היוצרים מקדמי חיכוך נמוכים מאוד, יכולים לשמש גם בתעופה וימאות, מכיוון שציפוי של מטוסים ואניות בחומרים מהסוג הזה יקטינו את התנגדות האוויר והמים וישפרו את התנועה.

בתמונות 7-8 ניתן להבחין בשלמות המבנה של ננוצינוריות של טונגסטן די סולפיד, (16, 17).

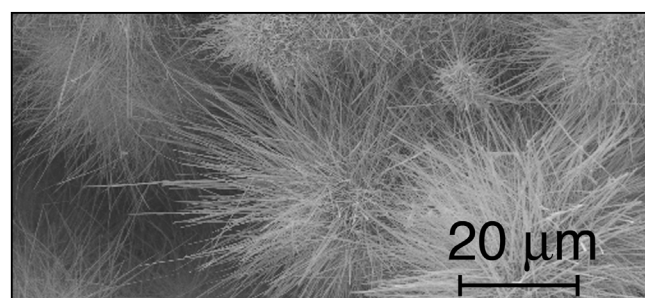
הפולימרים: המשמשים כפאזה העיקרית בחומרים המרוכבים מתחלקים לשלוש קבוצות עיקריות. פולימרים תרמופלסטיים, המשנים את התכונות שלהם עם שינוי הטמפרטורה. הם מתרככים בחימום מעל T_g , ניתכים מעל T_m ובקירור מתקשים מחדש.

הקבוצה השנייה היא של פולימרים תרמוסטים אינם מתרככים בחימום ואינם ניתנים להתכה. התנהגות זו מתאפשרת מכיוון שהם מכילים קשרי צילוב קשורים קוולנטיים המחברים בין השרשרות. תדירות קשרי הצילוב בחומרים אלו היא גבוהה יחסית.

בקבוצה השלישית יש פולימרים אלסטומרים היכולים להימתח עד פי 10 מאורכם ההתחלתי, מתכווצים במהירות עם הסרת המאמץ ויכולים לעבור שינויים אלו מספר רב של פעמים. התנהגות זו מתאפשרת מכיוון שהם מכילים קשרי צילוב כנ"ל בתדירות נמוכה יחסית, (1, 9, 18).



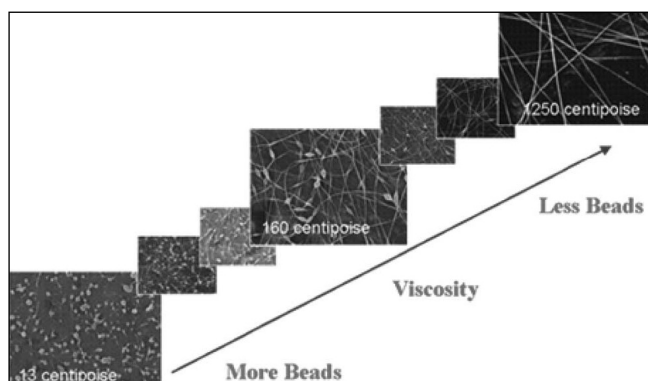
תמונה מס' 8 | ננוצינורות של טונגסטן די סולפיד WS₂ תמונת TEM



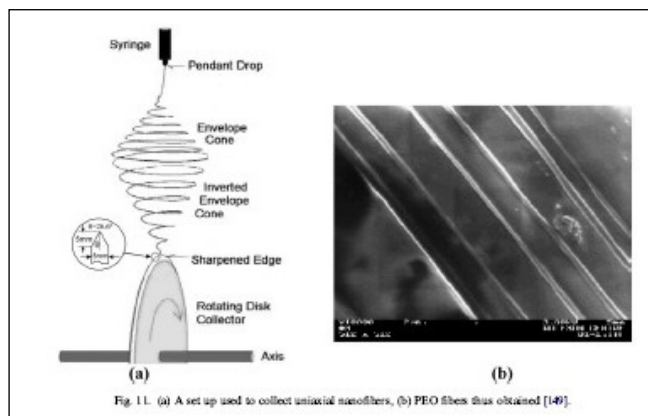
תמונה מס' 7 | ננוצינורות של טונגסטן די סולפיד WS₂ תמונת SEM ברזולוציה אולטרה גבוהה

הפולימר), משמע, ככל שריכוז הפולימר גבוה יותר, יהיה הקוטר שיתקבל גדול יותר – לא ביחס ישר, שכן הקוטר המתקבל פרופורציוני לריכוז בשלישית (תמונה 10); ולבסוף – המתח החשמלי: ככל שהמתח גדול יותר מוזרקות כמות גדולה יותר של תמיסה מהפיטה, ולכן הקוטר המתקבל הוא גדול יותר.

השגת אחידות בקוטר הסיבים היא אחד האתגרים הגדולים של סיוב בשיטה זו. האחידות בקוטר הסיבים תלויה כנראה בטמפרטורת התמיסה. במחקר שהתבצע בייצור ננוסיבים של פוליאטילן מתמיסה, נמצא שבטמפרטורה של 70°C משיגים אחידות גדולה יותר מאשר בטמפרטורת החדר. אחת ההשערות להסבר התופעה קשורה בצמיגות התמיסה. צמיגות התמיסה של פוליאטילן ב- 70°C היא נמוכה יותר מזו שבטמפרטורת החדר. על מנת לחזק את ההשערה הראו באותו מחקר גם את העובדה שהריכוז הגבוה ביותר האפשרי ל- Electrospinning הוא 12.8% משקלי בטמפרטורת החדר ו-21.2% בטמפרטורה הגבוהה יותר (כנראה 70°C מעלות). נמצא שריכוז תמיסת הפולימר משפיע גם על כמות הפגמים המתקבלים בסיב. ככל שהריכוז גבוה יותר



תמונה מס' 10 | התמונה (SEM) מראה את הירידה ברמת הפגמים עם השינוי בצפיפות התמיסות כתוצאה משינוי הריכוז מ-1% (משקלי) ל-4% של פוליאטילן אוקסיד



תמונה מס' 11 | בתמונה a מוצגת סכמה המתארת את תהליך האיסוף, ובתמונה b ניתן לראות סיבי פוליאטילן אוקסיד בקוטר של 40-100 ננומטר שנאספים במרווח של 1-2 מיקרון ביניהם

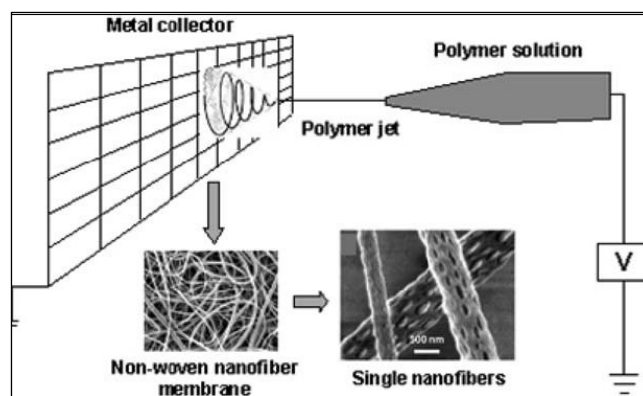
מקור מתח גבוה, שפופרת קפילרית עם פיטה או מחט בקוטר קטן מאוד ומסך מתכת לאיסוף הסיבים (תמונה 9). בתהליך משתמשים במתח גבוה לייצור זרם מהיר של תמיסת פולימר או נתך של פולימר מהפיטה. המתח הגבוה מאפשר מתיחה של הפולימר לצורת הסיב. בדרך שעובר הפולימר בין קצה הפיטה ללוח האיסוף, הממס מתנדף או שהנתך מתמצק והסיבים נאספים בצורת רשת דקה מאוד.

אחת האלקטרודות נמצאת בתמיסה או בנתך, והאחרת מחוברת למתקן האיסוף. השדה החשמלי שנוצר משרה מטען על שטח הפנים של הנוזל. כתוצאה מהמשיכה שנוצרת עם האלקטרודה הנגדית, נוצר כוח בכיוון הפוך למתח הפנים. ככל שעצמת השדה החשמלי עולה, המבנה החצי כדורי של שטח הפנים בקצה הקפילרה מקבל צורת חרוט שמוכר כ- Taylor cone . בעצמה מסוימת של שדה חשמלי כוחות הדחייה על שטח הפנים גדלים, וזרם של תמיסה נדחף החוצה מקצה הפיטה. באופן כללי ניתן לבצע את התהליך בתנאי חדר, אבל תמיסות של פולימרים מכילות מומסים שגורמים לעתים לריחות קשים, ולכן יש להשתמש בתנאים מתאימים עם מערכות ונטילציה. תהליך Electrospinning מנתך של פולימר מתבצע בוואקום. מאז 1980 ובעיקר בשנים האחרונות תהליך זה זוכה להרבה תשומת לב ומקבל תאוצה בעיקר לשימושים רפואיים ולננוטכנולוגיה, מכיוון שניתן לקבל בעזרתו מבנים מושלמים בעיקר בקוטר ננומטרי. היום מוכרים תהליכים עבור ייצור ננוסיבים באיכות גבוהה, המורכבים ממאה פולימרים שונים, רובם מתמיסות ומיעוטם מנוזל.

בתהליך Electrospinning השאיפה היא להשיג שלוש מטרות:

- קוטר סיבים קבוע ונשלט.
- שטח פנים ללא פגמים או יכולת שליטה בפגמים.
- איסוף ננוסיבים בודדים.

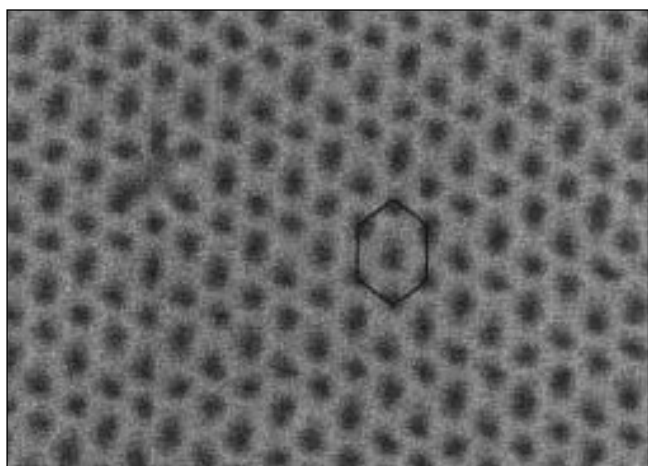
ניסיונות מראים שאף אחת מהמטרות אינה קלה להשגה. הקוטר של הסיבים שמתקבלים תלוי במספר גורמים: גודל ה- jet , מרכיבי הפולימר ב- jet , המידה שבה ה- jet מתפצל לסיבים בעלי קוטר שונה. גורמים נוספים הם צמיגות התמיסה (ריכוז



תמונה מס' 9 | דיאגרמה סכמטית המתארת ייצור ננו-סיבים בשיטת electrospinning

המבנה הנוצר מהתפרקות של פחמימן, בתהליך הגדילה וההתייצבות שלו. בנוכחות ניקל מתקבל מבנה "יער" מסודר יותר.

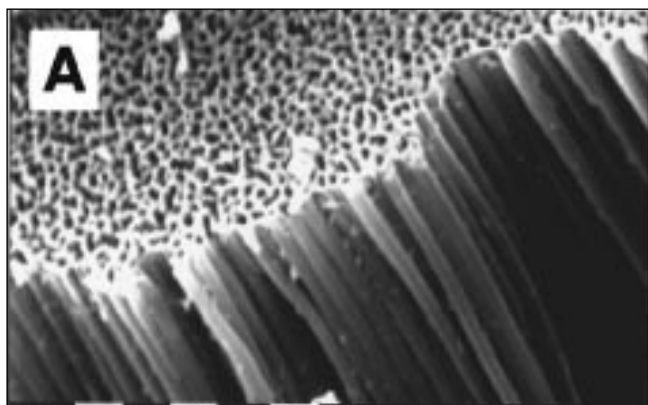
המבנה המסודר המתקבל הוא יתרון גדול על האוריינטציה האקראית המתקבלת בשיטות אחרות. המקור לפחמן הוא אתילן או Pyren, והכול מתבצע באווירה של ארגון. הננוצינוריות או הסיבים המתקבלים הם כמעט ללא פגמים, והקוטר החיצוני שלהם זהה לזה של החורים בתבנית, (24, 23).



תמונה מס' 12 | תמונת TEM של ממברנת האלומינה

על מנת שניתן יהיה להשתמש ב"יער" הסיבים או הצינוריות שנוצר למבנה של חומרים מרוכבים, יש לאסוף אותם בדרכים שונות לחוטים או ליריעות (תמונה 15).

על-ידי יצירת פיתול בתהליכי טוויה של ננוצינוריות של פחמן מ"יער" מתאים, מקבלים חוטים מפותלים עם חוזק גדול מ-460 מגה פסקל. מעבר לתכונות המכניות, חוזק וקשיחות (כמו לסיבים המשמשים לאפודי-מגן), יש לחוטים האלה תכונות מיוחדות: הם אינם מאבדים מחוזקם בקשירה, והם שומרים על החוזק והגמישות שלהם גם אחרי חימום באוויר בטמפרטורה של



תמונה מס' 13 | תמונת TEM של nanotubes של פחמן לאחר 10 דקות של ייצור

נוצרים פחות פגמים.

מחקר נוסף הראה שהוספה של כמות קטנה של מלאן מסוג יוני (1% משקלי) מקטינה בצורה משמעותית מאוד את הפגמים בפולימר. ההשערה לתופעה זו היא שהמלח יוצר צפיפות מטען גבוהה יותר בשטח הפנים של התמיסה ובמהלך ה-Electrospinning גורם ליצירת קוטביות גדולה יותר של הג'לט.

איסוף וארגון הסיבים הוא תהליך חשוב מאוד על מנת שנוכל להשתמש בתוצרי השיטה ליצירת חומרים מרוכבים לשימושים שונים ומגוונים. לצורך כך פותחו מספר שיטות, ולא מעט אחרות עדיין נחקרות. בסקירתי אציג את השיטה היעילה והנפוצה ביותר: המערכת מכילה מזרק עם קצה משולש שדרכו מוזרקת התמיסה, אבל לקולקטור יש קצה מחודד שמרכז בתוכו את המטען החשמלי, וכל הסיבים נמשכים לשם (תמונה 11). לפני שהסיבים מגיעים לטיפ שעל הקולקטור, יש עליהם מטען שגורם לדחייה ביניהם, ודבר זה משפיע על המיקום שלהם. לכן כאשר סיב אחד נתפס על הטיפ, הוא מונע מהאחר להיתפס. המרחק המתקבל בין הסיבים תלוי בכוחות הדחייה ביניהם וברדיוס שלהם. הסיבים נאספים במהירות של 22 מטר לשנייה, שהיא אקוויולנטית למהירות סיבוב של 1070 rpm של הקולקטור, (19, 20, 21, 22).

Template synthesis

בשיטה זו ניתן לייצר ננוחלקיקים על בסיס של תבנית המכילה חללים בסידור מדויק ובעלי קוטר אחיד (תמונה 12). ניתן לייצר מבנים בצורת tubes או בצורת סיבים, מחומרים שונים: פולימרים, מתכות, תחמוצות של מתכות, פחמן וכו'. חומרי המוצא מגוונים מאוד וכך גם התוצרים האפשריים, אבל לא ניתן לקבל צינוריות או סיבים יחידים, אלא מקבלים אותם בצורת "יער" (תמונות 13-14).

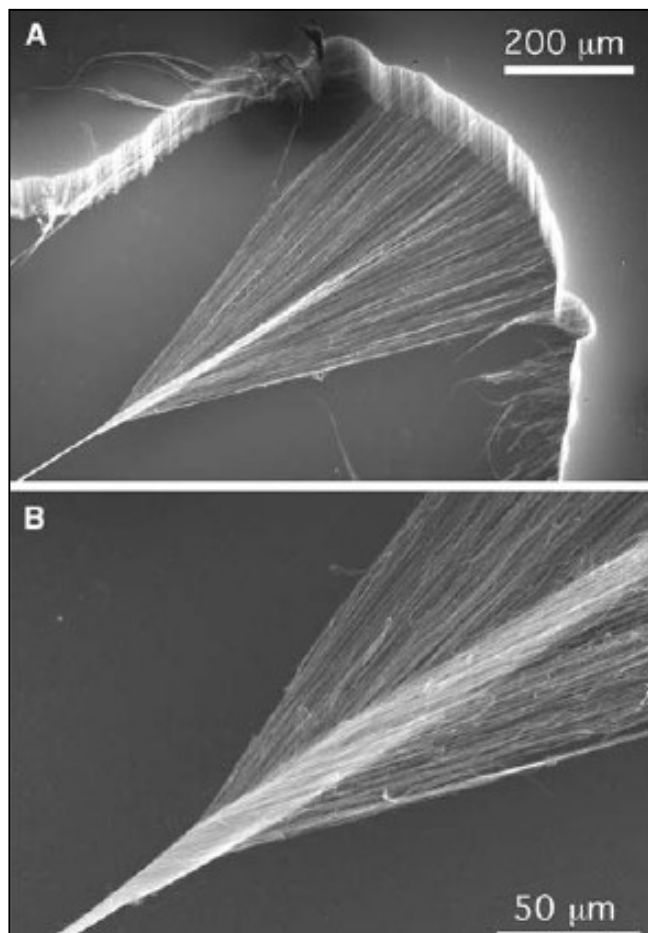
ישנן שיטות רבות לייצור ננוחלקיקים על תבנית ממברנלית. אחת מהן היא שיטת CVD (Chemical Vapor Deposition). בתהליך זה מולקולות בפאזה הגזית מתפרקות לצורות פעילות ומגיעות למשטח הגדילה. בדרך זו ניתן לייצר תחום רחב של חומרים לשימושים שונים: מוליכים, מוליכים למחצה ומבודדים.

היתרונות העיקריים של שיטה זו הם בשליטה האפשרית בתוצר המתקבל ובאחידות השכבה המתקבלת, גם אם היא בסדרי גודל ננומטריים.

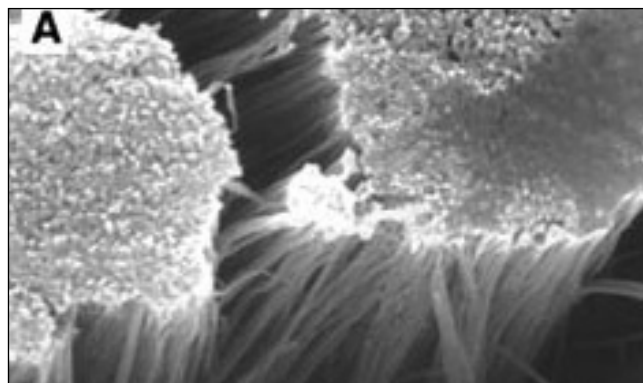
לדוגמה: ייצור ננוצינוריות וננוסיבים של גרפיט. לצורך כך משתמשים בתבנית ממברנלית העשויה מאלומיניום אוקסיד. ניתן לקבל את התוצרים ללא שימוש בזרזים בטמפרטורה של 900°C, או בנוכחות זרזים מתכתיים – כמו ניקל, ברזל, פלטינה וכו' – בטמפרטורה של 500°C. השימוש בזרזים מאפשר שליטה בגודל ובמורפולוגיה של

הם התחילו עם דיסקים קטנים של clays בעובי של 1 ננומטר ובקוטר של 25 ננומטר. הדיסקים מסודרים בערמות כמו דיסקיות של משחק, ובעזרת ממס מתאים הם נפרדים. בתהליך זה ממסים את הדיסקיות במים על מנת לגרום להפרדה ולאחר מכן מחליפים את המים בתהליך בממס שיכול להמיס גם את הפוליאורטן. ממסים את הפולימר בתערובת שנוצרה ולבסוף מרחיקים את הממס. התוצאה הסופית היא ננוחלקיקים של clay קשיח שמפוזרים במטריצת פולימר נמתחת, ומתקבל מבנה חזק יותר. הדסקיות של ה-clay מופיעות בחומר בצורה אקראית, המבנה דומה לזה שנוצר כאשר מנסים לאסוף חזרה לקופסה גפרורים שהתפזרו. בגלל המבנה הלא מסודר, החיזוק נעשה בכל הכיוונים ובחומר מתקבל עיוות קטן, אפילו אם מחממים אותו בטמפרטורה של מעל 150°C.

השימושים קצרי הטווח של חומרים אלו הם: ממברנות קלות לתאיידלק, עמידות בפני חדירת גזים ובטמפרטורות גבוהות. שימושים צבאיים באפודי־מגן, יריעות בדים שעמידים בפני קריעה ואמצעי אריזה קלים וחזקים לציוד ומזון. בתעשיית הטקסטיל ניתן לשפר בצורה משמעותית את התכונות המכניות של סיבים סינטטיים ע"י פיזור של



תמונה מס' 15 | תמונת SEM בשתי הגדלות שונות לתהליך האיסוף (משיכה ופיתול) של ננוצינוריות של פחמן לחוטים



תמונה מס' 14 | תמונת תמונת SEM של ננוסיבים של פחמן לאחר 40 דקות של ייצור

450°C ואחרי שנטבלו בחנקן נוזלי (תמונה 16), (25, 26, 27).

שימושים

תחום ה-Nanocomposites הוא חדש ומיוחד יחסית בעולם החומרים.

עבודה עם חלקיקים בגדלים ננומטריים מגדילה את שטח הפנים ביחס לנפח בצורה משמעותית, מאפשרת גמישות בשימוש בשטח הפנים ומשנה בצורה משמעותית את התכונות המכניות של סיבים, צינוריות או חלקיקים אחרים, ובכלל זה את התכונות המכניות של החומר כולו.

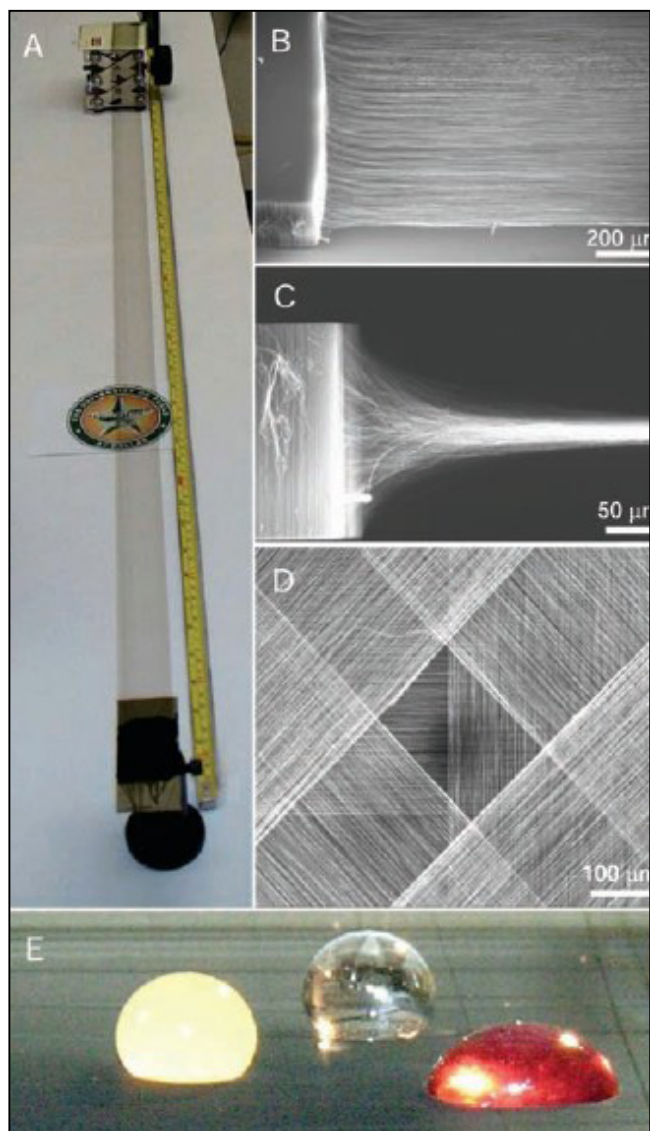
תודות לשינויים האלה בתכונותיהם המכניות, הננוחלקיקים יכולים לשמש כמרכיבים של חומרים לשימושים רבים. כיום משלבים את ה-Nanocomposites בתעשיות הקיימות לצורך שיפור תכונות של חומרים ומבנים מוכרים, אך הכוונה העתידית היא לפתח מכונות ננומטריות ולאפשר יישומים שהיום נתפסים כמדע בדיוני.

על מנת להדגים על קצה המזלג יישומים עתידיים, אתייחס למחקרים שנעשים בעקבות קורי העכביש.

כיום ניתן לייצר חומרים חזקים מאוד או לחילופין נמתחים מאוד, אבל קשה להשיג את השילוב של שתי התכונות באותו חומר. בטבע ניתן למצוא את השילוב של שתי התכונות בקורי העכביש.

בשנים האחרונות עבדו לא מעט קבוצות של מדענים וחקרו את קורי העכביש במטרה לסנתז חומר בעל תכונות דומות. מצאו שבקורי העכביש ניתן לראות קריסטלים קטנים – ננוחלקיקים, שנצמדים בחוזקה לחלבונים ומפוזרים ביניהם ואלה מהווים עבורם את מטריצת הפולימר.

צוותי המחקר ניסו לחקות את המבנה ואת הסידור של קורי העכביש ולייצר מבנים סינתטיים דומים. בשלב הראשון הם בדקו מרכיבים שונים של פלסטיק מותך עם חלקיקי חיזוק, אבל השינוי המשמעותי היה כאשר בקבוצת המחקר של פרופסור Gareth McKinley ב-MIT's Institute for Soldier השתמשו בתמיסה של אלסטומר של פוליאורטן ו-nanoclays.



תמונה מס' 16 | בתמונה הבא ניתן לראות איסוף של ננוצינורות ליריעות.
A – פיסה ברוחב של 3.4 ס"מ ובאורך של מטר, שנאספה מיער של ננוצינורות בקצב של 1 מ' לדקה.
B ו-C: תמונות SEM בזוויות שונות: איסוף של ננוצינורות ליריעות.
D – תמונת SEM, מבנה חיזוק שעשוי מ-4 יריעות המונחות בזווית של 45° אחת לשנייה.
E – יריעות של ננוצינורות שעליהן מונחות טיפות של מים, מיץ תפוזים ומיץ אפרסק. המסה של כל טיפה גדולה פי 50,000 ממסת היריעה שאיתה היא באה במגע (מנומל לשטח המגע בין הנזל ליריעה)

וכדי לאסוף אותם כבודדים ומאורגנים. שיטה נוספת היא: Tamplet Synthesis – הסיבים או הצינורות מיוצרים על בסיס של תבנית המכילה חללים בסידור ובקוטר מיוחדים ומדויקים. מאחר שהשיטה מאפשרת ייצור בחומרים שונים – פולימרים, מתכות, תחמוצות של מתכות ופחמן – ממילא התוצרים שמתקבלים הם מגוונים מאוד. בשיטה זו התוצר מתקבל בצורה של "יער" של סיבים או צינורות, ו על מנת להשתמש בהם ליצירת חומרים מרוכבים, יש לאסוף אותם מה"יער" ולארגן אותם בצורה הרצויה.

ננוחלקיקים במבנה. שימושים אלו יופנו קודם לתחום הצבאי ליצירת ציוד חזק יותר, יעיל יותר וקל יותר לשיפור היכולות הביצועיות והביטחון האישי של החיילים בעת מלחמה. היישום ה"דמיוני" ולטווח הרחוק יותר, הוא טלפון סלולרי שמשנה את צורתו בהתאם לרצון המשתמשים הרכיבים העתידניים יוכלו להיות גמישים לגמרי, להימתח ולשנות צורה בהתאם לצרכים. שימוש בחלבונים כמטריצה מארחת של ננוחלקיקים תאפשר גם מחזור של המכשירים שיפותחו. שילוב של ננומבנים כמו הננופרחים שהוצגו בסקירה זו, תאפשר בין היתר פיתוחים של משטחים דוחי מים, לכלוך וטביעות אצבעות, ו"א" משטחים המוגנים מפני קורוזיה והמנקים את עצמם. אם הפיתוחים הללו ישולבו במכשירי הסלולר הגמישים, נקבל את המכשיר הסלולרי האופטימלי שהיום נחשב דמיוני, (14, 28, 29, 30).

סיכום

Nanocomposites הם חומרים המרוכבים משתי פאזות לפחות, שבאחת מהן יש ממד אחד או יותר בגודל ננומטרי (קטן מ-100 ננומטר).

פיתוחים משמעותיים בתחום ה-Nanocomposites התחילו לפני כ-10 שנים, והתקווה היא שהם ייכנסו לשימוש ב-10 השנים הבאות.

חומרים מרוכבים בנויים מפאזות חלקיקים בגדלים ננומטריים בצורת סיבים, צינורות, דסקיות או כדורים המפוזרים בתוך פאזה רציפה. השילוב משפר בצורה משמעותית את התכונות של החומר, בעיקר של הפאזה הרציפה. השימוש בננוחלקיקים כמרכיב מחזק משפר במידה משמעותית מאוד את תכונות החומר באמצעות כמות קטנה מאוד של חלקיקים (2% נפחי). זה מתאפשר בשל היחס הגדול בין שטח הפנים לנפח. ככל שהממד המשפיע קטן יותר, היחס בין שטח הפנים לנפח גדול יותר. בחומרים ננומטריים, שטח הפנים הוא גדול מאוד, וכמות קטנה יחסית של חלקיקים משפיעה על התכונות ברמה מקרוסקופית.

מגוון האפשרויות ליצירת Nanocomposites הוא גדול מאוד, מכיוון שיש סוגים רבים של ננוחלקיקים וסוגים רבים של מטריצות "מארחות". מספר הצירופים האפשריים הוא גדול, והתוצאה המתקבלת תלויה בהרבה מאוד גורמים, בין היתר באדהזיה הנוצרת בין שתי הפאזות.

ננוחלקיקים מתקבלים בשיטות שונות. בסקירה זו התמקדתי בשתי שיטות עיקריות לייצור ננוצינורות או סיבים.

שיטת Electrospinning – שיטה שבה מופעל מתח חשמלי גדול בין נקודת ההזרקה של תמיסה או נתך של פולימר לבין נקודת האיסוף. המתח החשמלי גורם למתיחה של הפולימר, והתנאים בסביבה גורמים לנידוף הממס או לקירור הנתך ולהתייצבות צורת הסיב. רבות מושקע בפיתוח ובחקר השיטה על מנת לקבל סיבים שקוטרם ושטח פניהם אחידים

רשימה ביבליוגרפית

1. אקונס א. על-כימיה. 2006, 9, 14-19.
2. <http://en.wikipedia.org/wiki/Nanocomposite> Wikipedia. Nanocomposites. (30.7.2009).
3. B-2 Spirit. http://en.wikipedia.org/wiki/B-2_Spirit (30.7.2009).
4. UFO APPEARS. <http://www.ufo-appears.net/second-crash-d-un-northrop-b-2-spirit-sur-l-ile-de-guam-23-fevrier-2008>. (30.7.2009)
5. BOEING. 787 Dreamliner. <http://www.boeing.com/commercial/787family/background.html> (30.7.2009)
6. Aircraft-Info. Net. Boeing 787. <http://portal.aircraft-info.net/article1.html> (30.7.2009)
7. Smh.Com.au. Boeing unveils 'green' Dreamliner passenger jet. <http://www.smh.com.au/news/news/boeing-unveils-green-dreamliner-passenger-jet/2007/07/04/1183351269786.html>
8. DVICE live the future. Dreamliner unveils Dreamliner 787. <http://dvice.com/archives/2007/07/boeing-unveils-dreamliner-787.php> (30.7.2009)
9. Karen I. Winey and Richard A. Vaia, Guest Editors, MRS Bulletin. 2007, 32, 314-318.
10. Krishnamoorti R. MRS BULLETIN. 2007, 32, 341-347.
11. Schadler L.S., Kumar S.K., Benicewicz B.C., Lewis S.L., Harton S.E. MRS BULLETIN. 2007, 32, 335-340.
12. Hunter D.L., Kamena K.W., Paul D.R. MRS BULLETIN. 2007, 32, 323-327.
13. GIZMODO. Nanoflowers. <http://gizmodo.com/archives/nanoflowers-016583.php>
14. וינשטיין ג. משרד הפטנטים של דר' גלי וינשטיין. <http://www.notes.co.il/gali/57284.asp>
15. AMERICAN ELEMENTS. Silicon Carbide Nanoparticles. <http://www.americanelements.com/sicnp.html>
16. ביליזובסקי א. הידען <http://www.hayadan.org.il/wp/nano-parts-big-money-3010083/>

מאחר שתחום ה־Nanocomposites הוא חדש יחסית בעולם החומרים, השימושים העכשוויים שלו מוגבלים לתחום החומרים המוכר לצורך שיפור תכונות מכניות, אך השימושים העתידיים שלו הם כמעט בלתי מוגבלים ונראים לעתים כמדע בדיוני. הפיתוחים של יישומים עתידיים אלו יהיו תלויים בעיקר בהבנה של הסיכונים הבריאותיים הכרוכים בתהליך הייצור, בתהליכי המחזור, ביכולת לטפל בפסולת הרעילה המעורבת וביכולת לשלוט ברצף מבנה־תכונה־תהליך. תחום ה־Nanocomposites מבסס כיום את מעמדו בטכנולוגיה המודרנית, אבל ההישגים הגדולים של תחום זה עדיין לפנינו.

תודות

תמונות 2-3:

Krishnamoorti R. Mrs. Bulletin. 2007, 32, 341-347. Used with Permission by the author.

תמונות 4-6:

Used with Permission.

תמונות 7-8:

מודפס באישור פרופ' רשף טנא, מכון ויצמן למדע, רחובות.

תמונות 9-11:

Used with Permission of Prof Z. M. Huang.

תמונה 12:

Used with Permission of Prof L. Piraux.

תמונות 13-14:

Che G., Lakshmi B.B., Martin C.R., Fisher E.R. Chem. Mater. 1998, 10, 260-267. Used with Permission Prof. R. Ruoff.

תמונה 15:

Zhang M., Atkinson K.R., Baughman R.H. SCIENCE. 2005, 309, 1215-1219. Used with Permission by the author Prof R. H. Baughman.

תמונה 16:

Zhang M., Atkinson K.R., Baughman R.H. SCIENCE. 2004, 306, 1358-1361. Used with Permission by the author Prof R. H. Baughman

גרף 1-2:

Karen I. Winey and Richard A. Vaia, Guest Editors, Mrs. Bulletin. 2007, 32, 314-318. Used with Permission.

- Part A. 2003, 34, 1207-1217.
25. Zhang M., Fang S., Zakhidov A.A., Lee S.B., Aliev A.E., Williams C.D., Atkinson K.R., Baughman R.H. SCIENCE. 2005, 309, 1215-1219.
26. Zhang M., Atkinson K.R., Baughman R.H. SCIENCE. 2004, 306, 1358-1361.
27. Baughman R.H., Zakhidov A.A., Heer W.A. SCIENCE. 2002, 297, 787-792.
28. Hunter D.L., Kamena K.W., Paul D.R. MRS BULLETIN. 2007, 32, 323-327.
29. ScienceDaily. Spider Silk Inspires Strong And Stretchy Nanocomposites Fibers. <http://www.sciencedaily.com/releases/2007/01/070119115103.htm> (30.7.2009)
30. NAN COMPOSITECH. Clay Polymer Nanocomposites. <http://www.nanocompositech.com/review-nanocomposite.htm> (30.7.2009)

17. הידען. חברה ישראלית הכריזה על חומר סיכה היבש הראשון בעולם המבוסס על ננוטכנולוגיה.

<http://www.hayadan.org.il/wp>
(appliednano-090602/ (30.7.2009

18. Epoxy Resins.
<http://pslc.ws/welcome/tour/macrog/epoxy.htm> (30.7.2009)
19. Huang Z-M., Y.-Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna. Composites Science and Technology. 2003, 63, 2223-2253.
20. Dan L., younan X. Advanced Materials. 2004, 16, 1151-1169.
21. Bergshoef M.M., Vancso G.J. Advanced Materials. 1999, 11, 1362-1365
22. Kim J-S., Reneker D.H. POLYMER COMPOSITES. 1999, 20, 124-131.
23. Che G., Lakshmi B.B., Martin C.R., Fisher E.R. Chem. Mater. 1998, 10, 260-267
24. Shofner M.L., Rodrigues-Macias F.J., Vaidyanathan R., Barrera E.V. Composites:

הסדנה להכשרת מורים מובילים ממשיכה בשנת הלימודים תשע"א.
הסדנה תתקיים אחת לשבועיים בימי רביעי החל מהשעה 15:00.
מורים אשר מעוניינים להצטרף מוזמנים ליצור קשר בהקדם עם דבורה קצביץ
dvora.katchevich@weizmann.ac.il : 08-9343795 / 050-5274447
על-מנת לקבל פרטים על תנאי הקבלה. מספר המקומות מוגבל.