

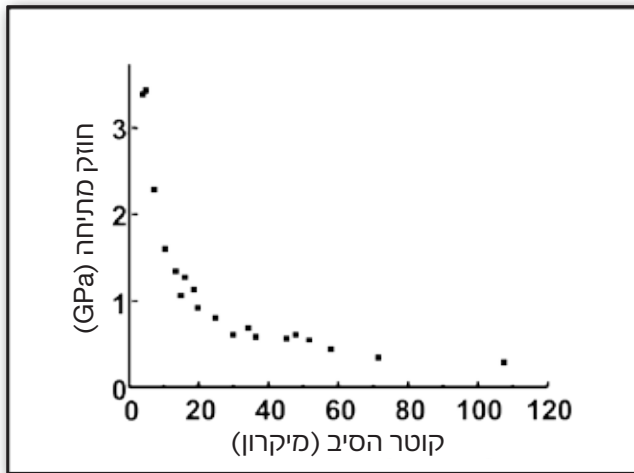


הדרך לננוטכנולוגיה בעקבות החומרים המרוכבים של מחר

ד"ר נאום נווה, המחלקה להנדסת פלסטיקה, שנקר בית ספר גבוה להנדסה ולעיצוב.

הם סיבי פחמן, זכוכית ואחרים, והשרפים הבולטים הם אפוקסי ופוליאסטר. אחד המאפיינים של הסיבים הוא קוטרם. קוטר הסיבים הנו מיקרומטרי, לרוב בטווח של 5 עד 10 מיקרונים, והם מסופקים כצמה או חוט בעל אלפי סיבים. סיבים אלה משמשים גם לייצור בדים ארוגים ואחרים שאותם מספיגים עם השרף ומקשים אותו לקבלת חומר חזק, קשיח וקל משקל. החוזק והקשיחות הגבוהים ליחידת משקל (המונח ההנדסי: חוזק ומודול סגוליים, ראו בטבלה 1) מקנים לחומרים אלה יתרון ברור בתכנון מערכות לתעופה וחלל ומערכות קרקעיות וימיות מונעות, שכן המשקל הנמוך מתבטא בחיסכון אנרגטי. כך למשל בלוויינים, משגרים, טילים, רק"מ וספינות - חומרים מרוכבים משתלבים יותר ויותר בבנייתם. בעולם התעופה רואים עלייה חדה באחוז

חברות בטחונות בארץ ובעולם מפתחות מערכות הגנה מרשימות מאוד. הטכנולוגיות המשולבות במערכות ההגנה, ההנחיה, הבקרה והתקשורת מקנות ביטחון ויכולת מבצעית, ולא פעם מובילות את המגמות הטכנולוגיות אשר מיושמות שנים לאחר מכן בתעשיות האזרחיות. אולם כל המערכות המבצעיות, גדולות כקטנות, בנויות מרכיבים שרובם ככולם מיוצרים מחומרים קונבנציונאליים, לרוב ממתכות כמו אלומיניום או פלדה, ולעתים מחומרים מרוכבים. מציאות זו נכונה גם בתעשיות אחרות. חומרים פלסטיים משתלבים היטב בפנים הרכב, אך עפ"י רוב המרכב עשוי מתכת. החומרים המרוכבים, שעשויים סיבים ושרף (פולימר) שעוטף ומחזיק אותם יחד, התפתחו בחמישים השנים האחרונות, ויתרונם במשקל הנמוך והחוזק הגבוה. הסיבים



איור 1. הניסוי של Griffith. הסיב הדק ביותר בניסוי זה היה בקוטר 3.3 מיקרון⁽²⁾.

מאוד, ערכים של מספר אלפי GPa נמדדו בניסויי לחיצה של סיב בודד תחת מיקרוסקופ אלקטרוני, כאשר המודול הגבוה ביותר של סיב פחמן מסחרי הנו כ- 800 GPa. סיבים אלה נבחנו כתוסף לשרף בחומרים מרוכבים על בסיס פחמן/אוקסי, אך התרומה לתכונות המכניות מוגבלת בין היתר בשל הקושי לפזר אותם. מעבר לכך חומרים מרוכבים עם סיבים רציפים מצטיינים בתכונות מכניות יציבות לאורך זמן (הרפיית מאמצים, זחילה). תכונות רבות כדוגמת חוזק מתיחה ומודול אלסטיות מוכתבות ע"י הסיבים הרציפים, והוספת סיבים קצרים לשרף, חזקים ככל שיהיו, לא ישפרו תכונות אלה. מכאן ברור שיש לפתח תהליכים לייצור סיבי ננו רציפים.

מזה מספר שנים מדווחים על גידול סיבי פחמן ננומטריים באורך של מספר מילימטרים, ובשנת 2013 דיווחו חוקרים על סיב בודד שגדל לאורך של 550 מ"מ (כחצי מטר!)⁽⁴⁾. עם זאת אם הסיבים ארוכים מספיק כדי להשתלב זה בזה כמו בחוט, אפשר יהיה לטוות חוט ארוך מאוד עשוי סיבים ננומטריים. טכנולוגיה זו נמצאת בתחילת הדרך, ויש גם בארץ חברה שמפתחת חוטים רציפים ובדים על בסיס סיבים ננומטריים.⁽⁵⁾

חלקיקים ננומטריים כבר משתלבים בתעשיות שונות. חלקיקי WS₂ בגודל של עשרות ננומטרים משמשים כתוספים לשמנים ונוזלים הידראוליים, וריכוז נמוך מאוד שלהם גורם לירידת מקדם החיכוך ומשפר את ביצועי המנוע ברכב שלכם.⁽⁶⁾

מוצרי ספורט מכילים ננו-סיבים כדי לשפר תכונות מסוימות ו/או כמקדם שיווקי נהדר, כך גם בעולם הקוסמטיקה,

המשקלי שהחומרים המרוכבים מהווים מכלל משקל הכלי. כך למשל, מבנה מטוס הקרב F15 עשוי 2% בלבד (משקלי) של חומרים מרוכבים, מבנהו מבוסס על אלומיניום (50%) וטיטניום (30%). לעומתו, ה-F18 החדש יותר עשוי 20% חומרים מרוכבים, וב-F35 שחיל האוויר עתיד לקבל, זה כבר מגיע ל-42%⁽¹⁾.

גם בתעופה האזרחית זה קורה. מרכיב החומרים המרוכבים במטוסי ה-Boeing 747 Jumbo של חברת Boeing היה קטן מ-5%, ואילו המטוס החדש מדגם 787 ("Dreamliner") עשוי 50% חומרים מרוכבים.

חומרים מרוכבים בפרט וחומרים פלסטיים בכלל תופסים נתח הולך וגדל גם בשוק הרכב, וככל שתהליכי הייצור משתכללים ומוזלים, חומרים אלה יחליפו את פח המרכב בזכות העמידות הגבוהה לקורוזיה והמשקל הנמוך.

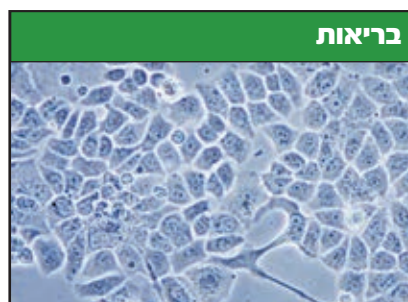
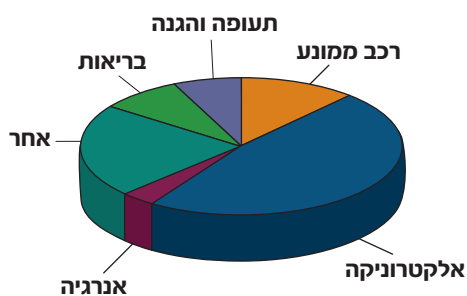
הקוטר המיקרוני של הסיבים מכתוב את החוזק שניתן לקבל כיום מחומרים מרוכבים עם סיבים רציפים. חוזקם תלוי וגם מוגבל ע"י הפגמים המופיעים בחומר, בצורת סדקים, סדקונים ופגמים אחרים. סטטיסטית, ככל שהגודל האופייני של הסיבים יורד, כך קטן הסיכוי להימצאות פגם. הראשון שביטא קשר זה בצורה מתמטית היה Griffith, אשר ב-1921 ניסח את המשוואה הקרויה על שמו. Griffith חקר את השפעת הקוטר על החוזק של סיבי זכוכית וגילה שהחוזק עולה עם הירידה בקוטר, כפי שמוצג באיור 1.⁽²⁾ הוא לא יכול היה לבדוק סיבים בקוטר קטן ממספר מיקרוני, כי זה מה שהיה זמין בזמנו, אבל השאלה הלגיטימית הייתה ועודנה "מה עשוי להיות חוזקם של סיבים בקוטר קטן עוד יותר, ננומטרי?" החוזק התאורטי של סיב זכוכית הנו 11 GPa (גיגה-פסקל), ערך עצום כשלעצמו, והוא גבוה בסדרי גודל מזה של כל חומר ידוע. זה שנים החוקרים שוקדים על פיתוח תהליכים להכנת סיבים בקוטר ננומטרי, מתוך הבנה כי זה יביא את הדור הבא של הסיבים, ובראייה רחבה - את הדור הבא של החומרים המרוכבים.

סיבי פחמן בקוטר ננומטרי דווחו לראשונה במאמר על שיקוע קטליטי מפזה גאזית ב-1952, אך רק בשנות התשעים החלו להופיע מאמרים על סינתזה וגידול סיבי פחמן ננומטריים. רוב העבודות עד כה מעידות על סיבים בקוטר של כמה עשרות ננומטר אך אורך מוגבל למיקרוני בודדים. עם זאת נמדד חוזק של 150 GPa (הערך התאורטי 300 GPa)⁽³⁾ בעוד סיבי פחמן מסחריים מגיעים לכ-7 GPa "בלבד" (ערך זה עדיין גבוה בסדר גודל מזה של פלדה...). גם מודול האלסטיות גבוה

טבלה 1. חוזק סגולי ומודול סגולי של חומרים מרוכבים בהשוואה למתכות.

חוזק סגולי	מודול סגולי	החומר
0.37	1.06	Steel 4130
0.79	1.02	Aluminum 7075-T6
2.14	0.93	Glass/Epoxy
4.00	2.20	Kevlar/ Epoxy
4.39	3.54	Carbon/Epoxy

תחזית השימוש בנו-צינורות פחמן בתחומים שונים עד שנת 2020



איור 2. תחזית 2020 של גידול השווקים בעקבות שימוש בסיבי פחמן ננומטריים.

מקורות

1. CompositesWorld, compositesworld.com, May 2, 2011.
2. Griffith, A. A. (1921), "The phenomena of rupture and flow in solids", Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A 221: 163–198.
3. Demczyk, B.G.; Wang, Y.M; Cumings, J; Hetman, M; Han, W; Zettl, A; Ritchie, R.O (2002). "Direct mechanical measurement of the tensile strength and elastic modulus of multiwalled carbon nanotubes". Materials Science and Engineering A 334 (1–2): 173–178.
4. Zhang, R.; Zhang, Y.; Zhang, Q.; Xie, H.; Qian, W.; Wei, F. (2013). "Growth of Half-Meter Long Carbon Nanotubes Based on Schulz–Flory Distribution". ACS Nano 7 (7): 6156–61.
5. TorTech Nano Fibres Ltd, a joint venture between Plasan and Q-Flo, a spin-off of the University of Cambridge. See www.plasan-na.com/tortech-carbon-nano-tube-technologies/
6. Rapoport, L.; Fleischer, N.; Tenne, R. (2003). "Fullerene-Like WS₂ Nanoparticles: Superior Lubricants for Harsh Conditions". Adv. Mater.15, 651-655.
7. Scientific American, July-August 1997.
8. "What's the European Space Elevator Challenge?". European Space Elevator Challenge, April 21, 2011.

החקלאות, מוצרי צריכה לבית (חלקיקי כסף ננומטריים מוספים לאטמי הגומי במקררים בשל הפעילות האנטי-בקטריאלית שלהם), לאריזות מזון ולחומרים תעשייתיים כגון דבקים, פלסטיק וצבע. תהליכי הייצור משתפרים כדי לאפשר הוספת חלקיקי הננו בצורה יעילה ובטוחה, והתקנים המחמירים בנושא בטיחות, גהות ואיכות הסביבה מלווים התפתחות זו בעין פקוחה. סקר משנת 2009 שהוזמן ע"י Boeing צופה גידול בשווקים שונים בהיקף טריליון דולר (1000 מיליארד) בזכות השימוש בננו-חלקיקים, מתוך זה 70 מיליארד בתעשיית התעופה והחלל, כאשר סיבי פחמן ננומטריים בלבד יתרמו לגידול של כ-10 מיליארד דולר בהיקף הפעילות. ראו איור 2.

אולם, המהפכה הבאה בתחום המבנאות (רכיבים נושאי עומס) תגיע כאשר נשכיל לתרגם את התכונות המכניות האדירות של הסיבים הננומטריים לכדי רכיבים של מכוניות, מטוסים, ספינות, גשרים ובניינים, וזה יביא לחיסכון באנרגיה, טווח מוגדל וחוזק גבוה מספיק כדי לחשוב על יישומים שכיום נראים דמיוניים. רעיון המעלית לחלל, למשל, שאינו חדש, קיבל פרסום לאחרונה בזכות סיבי הפחמן הננומטריים. מעלית כזו, שתאפשר למעבורות לעגון בקצה הרחוק ולהעלות נוסעים, תחווה כוחות גבוהים מאוד בגלל הכוח הצנטריפוגלי (המעלית צריכה להסתובב יחד עם כדור הארץ), ושום חומר ידוע אינו יכול לשאת בכוחות אלה. הסיבים הננומטריים מאפשרים לראשונה לחלום על יישום מסוג זה, לפחות ברמה העקרונית, כי רק להם החוזק הנדרש. איור קונספט של המעלית לחלל על בסיס סיב פחמן פורסם בשער הירחון American Scientist בשנת 1997 (האיור שבשער הכתבה מבטא אותו רעיון). מספר תחרויות אורגנו, ובמסגרתן הוצעו פרסים למי שיפתחו תשתית מתאימה.⁽⁷⁾ תחרות טיפוס על כבלים ייעודיים מתקיימת מדי פעם בחסות המכון לתעופת חלל באוניברסיטה הטכנית במינכן, גרמניה.⁽⁸⁾

הרעיון מציב בפני חוקרים ומהנדסים את האתגר לפתח חומרים חזקים יותר בעלי עמידות תרמית שיחליפו את החומרים המרוכבים של היום בדרך לחלל, למעמקי הים או סתם לשם נסיעה כיפית ברכב החסכוני של מחר.