

## תכונות מכניות של חומרים מרוכבים

### מטרת המעבדה

1. הכרת תהליך הייצור של חומרים מרוכבים.
2. אפיון התכונות המכניות של חומרים מרוכבים.
3. בדיקת חוק התערובות בחומרים מרוכבים.

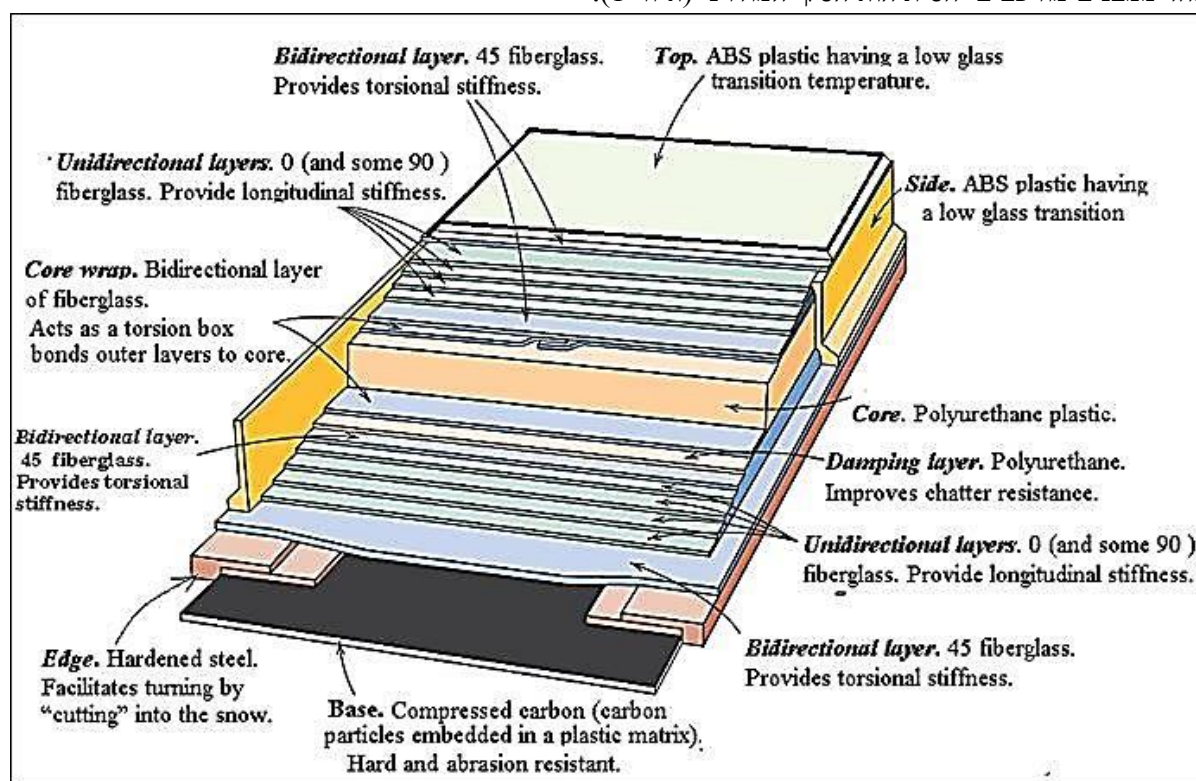
### רקע תיאורטי

חומר מרוכב ניתן להגדרה כקומבינציה מקרוסקופית של שניים או יותר חומרים נפרדים, כאשר ביניהם מישק הניתן להבחנה. עם זאת, מכיוון שחומרים מרוכבים משמשים בד"כ עבור תכונותיהם המבניות, ניתן להגביל את הגדרתם לכוללת רק חומרים המכילים חומר מחזק כגון סיבים או חלקיקים הנתמך ע"י חומר מקשר (מטריצה) [1].

חומר נקרא חומר מרוכב רק כאשר הפאזות המרכיבות אותו הן בעלות תכונות פיזיקאליות השונות באופן משמעותי אחת מהשנייה, ועל-כן תכונות החומר המרוכב שונות באופן מובהק מתכונות המרכיבים.

חומרים מרוכבים הם בד"כ בעלי פאזה בלתי רציפה של סיבים או חלקיקים אשר הנה קשה וחזקה יותר מפאזת המטריצה הרציפה. ע"מ לקבל חיזוק, צריך להיות שבר נפחי יחסית גדול של הפאזה הבלתי רציפה.

אחד ממבנים מורכבים יחסית הוא הסקי המודרני (איור 1).



איור 1. חתך של סקי שלג ביצועים גבוהים, מוצג רכיבים השונים. הפונקציה של כל רכיב יצוין, כמו גם החומר המשמש בבנייתו.

### מאפיינים של מערכות חומרים מרוכבים

- גיאומטריה של החומר המחזק: צורה (צילינדרים, ספרות, מנסרות או פלטות), גודל ורמת הפיזור.
- ריכוז ואוריינטציה של החומר המחזק.
- הומוגניות (אחידות) של המערכת (ריכוז ופיזור של מרכיבים).

- איזוטרופיות המערכת (אוריינטציה של החומר המחזק).

### סיווג חומרים מרוכבים

חומרים מרוכבים ניתנים לסיווג במספר אופנים. אחת משיטות הסיווג הנה הבדלת החומרים המרוכבים עפ"י צורות החומר המחזק (איור 2):

חומר מרוכב המחזק ע"י חלקיקים – particulate composite.

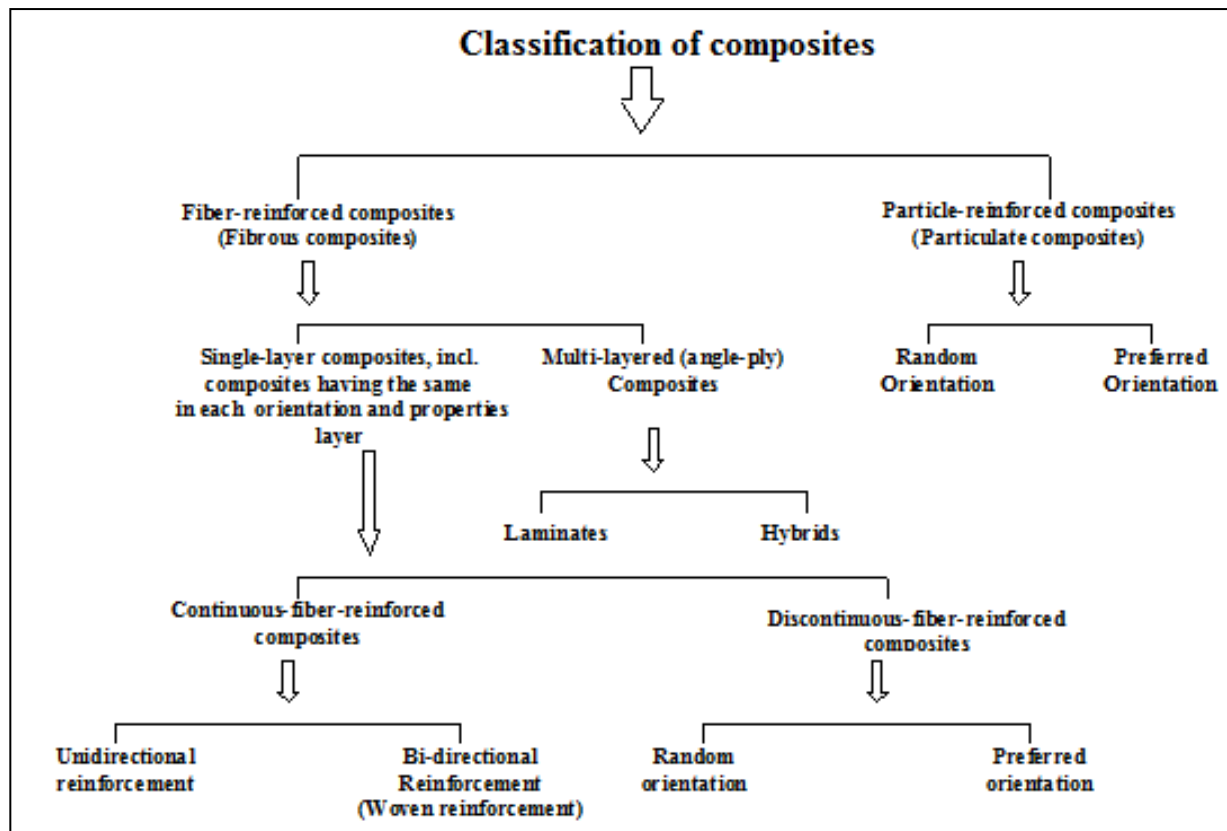
חומר מרוכב המחזק ע"י סיבים – fibrous composite.

חומר מרוכב המורכב משכבות של חומרים שונים – laminated composite.

### Particulate composite

חומר מחזק נחשב כחלקיק אם כל ממדיו פחות או יותר שווים. לכן, חומרים מרוכבים המחזקים ע"י חלקיקים כוללים את אלו המחזקים ע"י ספרות, מוטות, פתיתים וצורות רבות אחרות שהן בערך שוות צירים. ישנם חומרים, בד"כ פולימרים, המכילים חלקיקים אשר משמשים גם מעבר לחיזוק המטריצה. הם נחשבים בד"כ כמערכות "מילוי". מאחר ומטרת חלקיקי המילוי כוללת הפחתת העלות, יותר מאשר חיזוק, חומרים מרוכבים אלו אינם נחשבים חומרים מרוכבים המחזקים ע"י חלקיקים. אעפ"כ, בחלק מן המקרים, חומר המילוי יחזק גם את חומר המטריצה. הדבר דומה גם עבור חלקיקים המוספים לשם מטרות לא מבניות, כגון חסינות לאש, שליטה בהתכווצות, והעלאת המוליכות התרמית [1].

חומרי החלקיקים והמטריצה יכולים להיות כל שילוב שהוא של חומרים מתכתיים ואל-מתכתיים, לדוגמא: cermets (קרמיקה + מתכת), סיבים אנאורגניים + פלסטיקים וכדומה. חומרים מרוכבים המחזקים ע"י חלקיקים יכולים להיות בעלי אוריינטציה אקראית או בעלי אוריינטציה מועדפת [1].

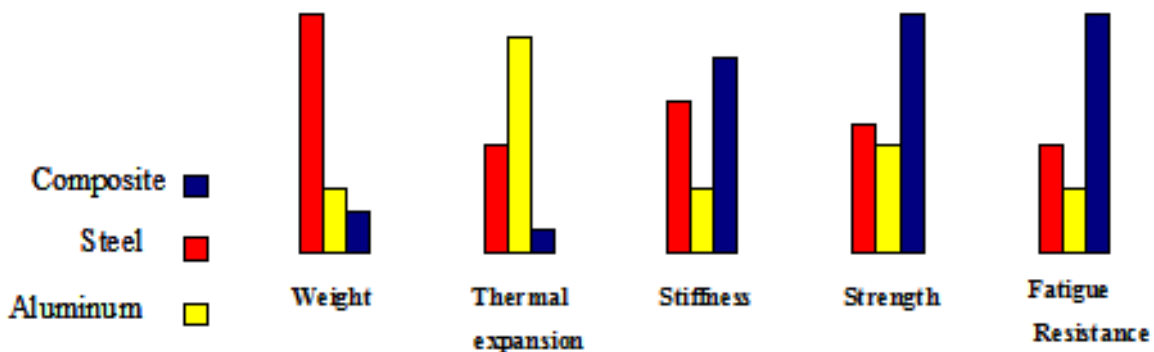


איור 2 : סיווג החומרים המרוכבים

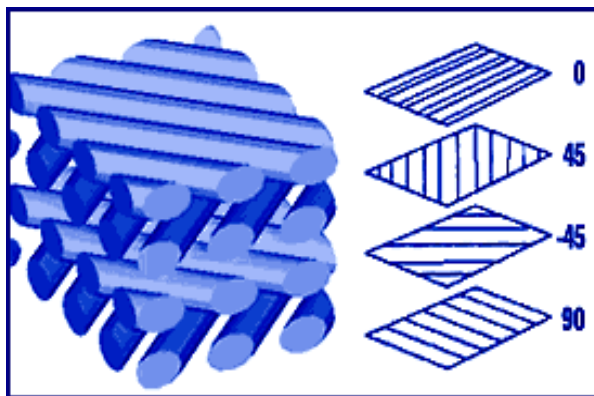
## Fibrous composites

חומרים מרוכבים מחוזקים ע"י סיבים רציפים, ע"י סיבים לא רציפים, או ע"י חלקיקים. סיבים רציפים הנם סיבים ארוכים, אשר בד"כ מגיעים לערכים מקסימאליים בתכונות כגון חוזק וקשיחות, הודות לאנאיזוטרופיות הנשלטת שלהם ומספר וגודל נמוכים של פגמי פני שטח. בחומרים מרוכבים המחוזקים ע"י סיבים רציפים, מניחים כי העומס נישא בעיקר ע"י הסיבים אשר כיוונם הוא לאורך כיוון העומס. סיבים לא רציפים הנם סיבים קצרים המתקבלים ע"י סיבים רציפים חתוכים או מיוצרים ישירות כסיבים קצרים לשם הפחתת העלות. צורה אחרת של סיבים קצרים היא whiskers - גבישים יחידים מאורכים בעלי חוזק גבוה במיוחד. היחס אורך L לקוטר D, (aspect ratio-LD), משפיע באופן משמעותי על התכונות של החומר המרוכב בעל הסיבים הקצרים.

חומרים מרוכבים עם סיבים קצרים בעלי אוריינטציה אקראית הם בקירוב בעלי תכונות איזוטרופיות במישור הלמינט. החיסרון הגדול ביותר ליישומים מבניים, הוא שחומרים אלה אינם מפחיתים את הזחילה של מטריצת הפולימר באותה היעילות של הסיבים הרציפים. יתר על כן, חוזק נמוך יותר מאשר של אלו בעלי הסיבים הרציפים. החומרים המרוכבים הסיביים נעשו הסוג החשוב ביותר של חומרים מרוכבים, מאחר והם בעלי יכולת להשגת חוזק גבוה מאוד, בשל החוזק הגבוה לאורך הסיבים או החוטים הדקיקים (איור 2). חומרים מרוכבים המחוזקים ע"י סיבים מכילים חומרים מחוזקים אשר הנם בעלי אורך הגדול הרבה יותר מאשר ממדי חתך הרוחב שלהם. ניתן לחלק את החומרים המרוכבים המוחזקים ע"י סיבים לשתי קטגוריות: אחת היא *Single layer composites* שמכיל שכבות נפרדות בעלות אותה אוריינטציה ואותן התכונות, המחוברות יחדיו ע"י אותו חומר מטריצה. בחומרים מרוכבים חד-שכבתיים ניתן להבחין ברציפים ובלתי רציפים, כאשר: חומר מרוכב נחשב כחומר מרוכב המחוזק ע"י סיבים בלתי רציפים או קצרים אם תכונותיו משתנות עם אורך הסיב. הוא יכול להיות בעל אוריינטציה מועדפת או אוריינטציה אקראית. מצד שני, אם אורך הסיב הנו כזה שכל הגדלה נוספת באורך אינה, לדוגמא, מגדילה את מודול האלסטיות של החומר המרוכב, החומר המרוכב נחשב כחומר מרוכב המחוזק ע"י סיבים רציפים או ארוכים [1].



איור 3 : השוואה בין חומרים מונוליתיים קונבנציונאליים לבין חומרים מרוכבים [2]



איור 4 : הרכבת laminate מארבע שכבות [3]

חומר מרוכב המחוזק ע"י סיבים רציף יכול להיות בעל: אוריינטציית סיב חד-כיוונית (unidirectional), זו-כיוונית (bidirectional) ואקראית (random). חומר מרוכב חד-שכבתי בעל כוון אחיד ניתן לייצור ע"י הנחת הסיבים הארוכים מקבילים והרווייתם עם חומר מטריצה שרפי (לדוגמא שרף פוליאסטר או אפוקסי). צורה זו של סיבים נקראים (preimpregnated) *prepregs*.

ה-*prepregs* מחוברים יחדיו באוריינטציות שונות ליצירת השכבות. חיזוק רציף ניתן לקבל גם בכיוון שני לספק תכונות מאוזנות יותר באריג. לא ניתן לשלוט

בקלות על האוריינטציה של הסיבים הקצרים או הלא רציפים בחומר מרוכב עם אוריינטציה אקראית (*chopped fibers*).

**חומר מרוכב רב-שכבות** קוראים laminate (multilayer or angle-ply composite). כל שכבה הנה חומר מרוכב חד-שכבתי, אך האוריינטציה של השכבות משתנה. אם הזווית בין השכבות שווה ל- $90^\circ$ , החומר המרוכב נקרא cross-ply composite. מאחר שהסיבים אינם אחראים לחוזק לרוחב כיוון הסיב, נעשה הכרחי להוסיף שכבות באוריינטציות שונות ע"מ לעמוד בפני כל העומסים המיושמים. דרך אחת להשיג זאת הנה ליצור מס' שכבות המוערמות אחת על השנייה באוריינטציות שונות (**Error! Reference source not found.**) מבנה השכבות יכול להיות מבנה פשוט שבו השכבות השונות עשויות מחומר זהה.

מבנה בו השכבות השונות עשויות מחומרים שונים נקרא - Hybrid laminate (לדוגמא, מבנה דו-מתכתי). ההכלאה הנפוצה ביותר הנה מבנה סנדביץ'. ליבה קלת משקל כגון מבנה ספוגי או כוורת המונחת בין שתי פאות חזקות וקשיחות. Plastic-based laminates (לדוגמא, ניתן לעשות אריג של זכוכית או ניילון כשכבות עם שרפים שונים להשגת חומר מרוכב קל משקל ועמיד בנגיפה ובחדירה כגון: KEVLAR<sup>®</sup> (para-aramid synthetic fiber)).

### Laminate non-fibrous composites

חומרים מרוכבים למינרים הנם אלו המורכבים מכמה שכבות, כאשר שניים מממדיהן גדולים הרבה יותר מאשר השלישי. בחומרים מרוכבים שכבתיים ניתן להבחין ב: *bimetals* (לדוגמא חיישן של תרמוסטט), *clad metals* (לדוגמא הגנה בפני קורוזיה), *laminated glass* מורכב מזכוכית ופלסטיק שקוף לדוגמא (PVD) Polyvinyl Butyral לחלונות של רכב.

### **סיבים ומטריצות**

**הסיבים** מספקים את החוזק והקשיחות, והמטריצה קושרת את הסיבים יחדיו ולכן מספקת מעבר העומס בין הסיבים ובין החומר המרוכב והעומסים החיצוניים ותומכת. הסיבים הנם בשימוש בחומרים מרוכבים בגלל שהם קלי משקל, חזקים וקשיחים. הסיבה לכך היא האוריינטציה המועדפת של המולקולות לאורך כיוון הסיב והמספר המופחת של הפגמים הנוכחים בסיב לעומת חומר נפחי. למשל, חוזק למתיחה של E-glass נפחי ובצורה של סיב שווה בערך 3 GPa ו-72 GPa, בהתאמה, [3]. סיב באופן טבעי חזק יותר מאשר הצורה הנפחית בגלל שהגודל של הפגם מוגבל ע"י קוטר קטן של הסיב. הסיבים משמשים כמחזקים רציפים בחומרים מרוכבים בעלי כיוון אחיד (unidirectional) ע"י עריכת מספר גדול מהם בפלטה דקה או קליפה, הנקראת שכבה למינה (lamina) או ply. למינה בעלת כיוון אחיד הנה בעלת קשיחות וחוזק מקסימאליים לאורך כיוון הסיב ותכונות מינימאליות בכיוון מאונך לכיוון הסיבים.

תכונות מכניות של ח"מ תלויה בסוג של סיב וחזן מטריצה. לדוגמא, חומרים מרוכבים מחוזקים עם סיבים חתוכים, בד"כ חד-גבישים מאורכים (*chopped whiskers or fibers*) או חלקיקים יכולים לחוות דפורמציות זחילה גדולות אפילו בטמפרטורת החדר. אבל שימוש בסיבים רציפים עם כניעה נמוכה לזחילה (לדוגמא פחמן או זכוכית) עם מטריצה פולימרית (PMC) יכולים להיעשות כעמידים בפני זחילה כנדרש [3].

רוב הסיבים ניתנים להשגה בצורת רצועת *prepreg* (epoxy preimpregnated into the fibers). שיטות הייצור המשתמשות ברצועת ה-*prepreg* הנן איטיות ודורשות עבודה אינטנסיבית.

**סיבי זכוכית** ח"ם המחזקים ע"י סיבי זכוכית רציפים ובלתי רציפים נמצאו ביישומים נרחבים, כגון פנלים במטוסים ומכשירים, מנועי טיל ומכלי לחץ ועוד [1]. סיבי זכוכית מראים את תכונות הזכוכית האופייניות של קושי, עמידות בפני קורוזיה ואינרטיות כימית. יתר על כן, הם גמישים, קלי משקל, זמינים, טובים לעיבוד, קלים לייצור ואינם יקרים. תכונות אלו עושות את סיבי הזכוכית הסוג הנפוץ ביותר של סיבים אשר בשימוש ביישומים תעשייתיים של עלות נמוכה. כל סיבי הזכוכית הנם בעלי קשיחות זהה אך ערכי חוזק שונים והתנגדות שונה לדגרדציה סביבתית [3]. הרגישות של פני השטח של סיב הזכוכית לתקיפת לחות עדיין מהווה בעיה, כמו גם שבר תחת עומסים ארוכי טווח [1].

סיב הזכוכית בעל השימוש הנפוץ ביותר הנו **E-glass** (*electrical*), זכוכית Calcium aluminoborosilicate, בעלת מאזן שימושי של תכונות מכאניות, כימיות וחשמליות, במחיר בינוני. סיבי E-glass הנם בשימוש כאשר נדרשים חוזק למתיחה גבוהה והתנגדות כימית טובה. צפיפות הסיבים הנה יחסית נמוכה וחוזקם יחסית גבוה. מודול יאנג אינו מאוד גבוה. יישומי E-glass בשיטת הליפוף נרחבים בתעופה במנועי טילים ובמכלי לחץ. המאפיין הוא זה שהביא את תעשיית החלל לסיבים מתקדמים אחרים כדוגמת בורון, פחמן,  $Al_2O_3$  ו-SiC.

לסיבי **S-glass** (*Strength*) יכולת עמידות בטמפרטורות גבוהות יותר מאשר זכוכיות אחרות. סיבים אלו בעלי הרכב גבוה יותר של אלומינה (magnesium aluminosilicates) מאשר E-glass. הם בעלי חוזק הגבוה ביותר, אך יישומיהם מוגבלים בשל מחירם הגבוה בין פי 3 לפי 4 ממחיר ה-E-glass. מסיבה זו, סיבי הפחמן (והארמיד) בעלות צפיפות נמוכה נחשבים כעת כאלטרנטיבה ל-S-glass. סיבי **C-glass** (*corrosion*) הנם בשימוש ביישומים בהם נדרשת התנגדות בפני קורוזיה. סיבי **D-glass** (*dielectric*) הנם בשימוש ביישומים חשמליים כגון חיזוק הליבה של מבודדים קרמים במתח גבוה.

**סיבי פחמן**. סיבי פחמן (גרפיט), הנם סיבים קלי משקל וחזקים, עם עמידות כימית מצוינת (טבלה 1). הם שולטים על שוק תעשיית החלל. סיבי פחמן הנם זמינים עם טווח נרחב של ערכי קשיחות (*stiffness*). שני חומרי גלם עיקריים הנם בשימוש: PAN polyacrylonitrile (PAN) וזפת (Pitch). סיבי זפת יותר זולים, אך הנם בעלי חוזק נמוך יותר מאשר סיבי ה-PAN. סיבי ה-PAN בעלי ערכי קשיחות וחוזק מגוונים.

סיבי AS2, T300 ו-AS4D בעלי קשיחות גבוהה, סיב IM6 הנו בעל מודולוס בינוני (*Intermediate Modulus*), סיב HMS4 הנו סיב בעל מודולוס גבוה (*High Modulus*) וסיבי UHM - מודולוס גבוה ביותר (*Modulus Ultrahigh*). טמפרטורת הפעולה המקסימאלית של סיבי הפחמן משתנה מ- $315^{\circ}C$  ל- $537^{\circ}C$ , אך יכולה להיות מוגבלת ע"י טמפרטורת הפעולה של המטריצה, כמו במקרה של ח"מ עם מטריצה פולימרית (polymer matrix composite) PMC. בהיותם קשיחים יותר מסיבי זכוכית, סיבי הפחמן מספקים מאפייני התעייפות טובים יותר לחומר המרוכב ע"י הפחתת המעוות במטריצת הפולימר בעומס נתון. בנוסף, תופעת קורוזיה מאמצים הנה ניכרת פחות בסיבי הפחמן. בייצור של מכלי לחץ סיבי הפחמן הנם מוליכים חשמליים טובים, קורוזיה גלוונית תתרחש במקרה שחומר מרוכב נמצא במגע חשמלי עם מתכות. על כן, צריך להימנע מבודד בין חומר מרוכב עם סיבי פחמן וחומר מתכתי באותו המבנה. הדבר נעשה בדרך כלל ע"י הוספת חומר מרוכב המחזק ע"י mat של זכוכית (עובי של בערך 0.5 mm). הגורם המגביל העיקרי לשימושי סיבי פחמן הוא המחיר.

**טבלה 1** : תכונות אופייניות של סיבים שונים

Fiber	Modulus [Gpa]	Tensile Strength (*) [GPa]	Compression Strength [GPa]	Elongation [%]	Density [gr/cc]	Longitudinal Thermal Expansion [ $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ ]	Transverse Thermal Expansion [ $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ ]	Poisson Ratio	Thermal Conduct [W/m $^{\circ}\text{C}$ ]	Maximum Operating Temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Resistivity [micro ohm-m]
E-Glass	72.345	3.45	-	4.4	2.5-2.59	5.04-5.4	-	0.22	1.05	550	-
S-Glass	85	4.8	-	5.3	2.46-2.49	1.6-2.9	-	0.22	1.05	650	-
C-Glass	69	3.31	-	4.8	2.56	6.3	-	-	1.05	600	-
D-Glass	55	2.5	-	4.7	2.14	3.06	-	-	-	477	-
Carbon											
T300	230	3.53	-	1.5	1.75	-0.6	7-12	0.2	3.06	-	18
M50	490	2.45	-	0.5	1.91	-	-	-	54.43	-	8
AS2	227	2.756	-	1.3	1.8	-	-	-	8.1-9.3	-	15-18
AS4-D	241	4.134	-	1.6	1.77	-0.9	-	-	8.1-9.3	-	15-18
IM6	275.6	5.133	-	1.73	1.74	-	-	-	8.1-9.3	-	15-18
HMS4	317	2.343	-	0.8	1.8	-	-	-	64-70	-	9-10
UHM	441	3.445	-	0.8	1.85	-	-	-	6.5	-	120
P55	379	1.9	-	0.5	2	-1.3	-	-	120	-	8.5
P100	758	2.41	-	0.32	2.16	-1.45	-	-	520	-	2.5
Kevlar 29	62	3.792	-	-	1.44	-	-	-	-	-	-
Kevlar 49	131	3.62	0.72	2.8	1.45	-2	59	0.35	0.04	160 (#)	-
Kevlar 149	179	3.62	0.69	1.9	1.47	-	-	-	-	-	-
Technora H	70	3	0.6	4.4	1.39	-6	59	0.35	-	160 (#)	-
Boron	400	2.7-3.7	6.9	0.79	2.57	4.5	0.2	0.2	38	315 (#)	-
SCS-6	427	2.4-4	-	0.6	3	4-4.8	-	0.2	10	-	-
Nextel 720	260	2.1	-	-	3.4	6	-	-	-	1200 (#)	-

**סיבים אורגאניים וסיבים נוספים.** הסיבים האורגאניים המוכרים ביותר הנם **סיבי הארמיד** אשר בעלי ספיגת אנרגיה

גבוהה במהלך התעייפות- דבר העושה אותם אידיאליים עבור הגנה בפני נגיפה ובליסטיות (יישומים לשריון גופים ולתעופה). סיב הנפוץ ביותר בשימוש הוא **kevlar 49**. **סיבי פוליאיתילן** הנם בעלי ספיגת לחות נמוכה יותר וצפיפות נמוכה יותר מאשר של kevlar 49, אך גם טמפרטורת פעולה מקסימאלית נמוכה יותר (בערך  $120^{\circ}\text{C}$ ). קשיחות גבוהה, חוזק גבוה, וצפיפות נמוכה, כל אלו נפוצים עבור **סיבי בורון**. הם היקרים ביותר בין כל הסיבים ונמצאים בשימוש הנרחב ביותר כמחזקים בתעשיית החלל ובחפצי ספורט.

**סיבי סיליקון קרביד** (SiC) מיוצרים כמו סיבי הבורון, אך על מצע פחמן. סיבי ה-SiC הם בעלי השימושים הנרחבים ביותר כמחזקים עבור מטריצות מתכתיות, בעיקר טיטניום, אך הם נמצאים בשימוש גם בשילוב עם שרפים פולימרים. כמו סיבי הבורון, סיבי SiC מאופיינים ע"י קשיחות גבוהה וחוזק גבוה ועמידות טובה בטמפרטורות גבוהות, אף שימושם מוגבל בגלל מחיר מאוד גבוה.

כמשמשים לראשונה לחיזוק בוכנות דיזל, **סיבים קרמים** מבוססים על תחמוצות מתכתיות (אלומינה, טיטניה, אלומינה סיליקט וכו') עוזרים בשמירת החוזק של ח"מ עם מטריצה מתכתית (MMCs- metal matrix composites) בטמפרטורות גבוהות.

**חיזוק טקסטיל - Strand (end), tow, yarn, roving**. כל הסיבים ב-strand מיוצרים בו-זמנית, מכבשן אחד ונארגים יחדיו. **Yarn** הוא strand מלוּפף. **Roving** הנו אוסף של strands רציפים מקבילים. Rovings נוצרים ע"י ליפוף המספר הנחוץ של strands בודדים לשם השגת ה-yield הרצוי. Yield הוא האורך הגבולי (yd/lb) או הערך המטרי [g/km] TEX.

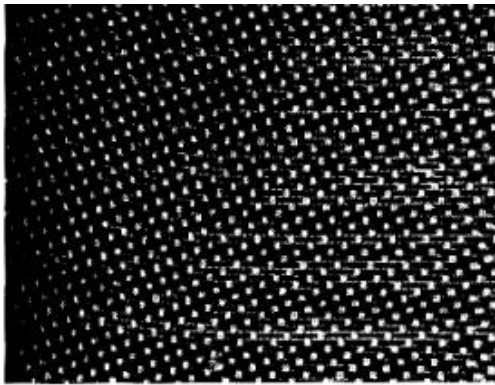
**Mat, fabric, and veil**. **Mat** נוצר ע"י חוטים קצוצים בעלי אוריינטציה אקראית (chopped strand mat), סיבים קצרים, או חוטים מסובכים (continuous strand mat- CSM) המחברים יחדיו בצורה רופפת בעזרת כמות מאוד קטנה

של דבק (מקשר). *Veil* הנו mat דק, המשמש כשכבת פני שטח לשיפור העמידות בפני קורוזיה של החומר המרוכב. *Veil* ו- mat הם בעלי סיבים בעלי אוריינטציה אקראית בכל כיוון, דבר המוביל לתכונות איזוטרופיות בחומר המרוכב.

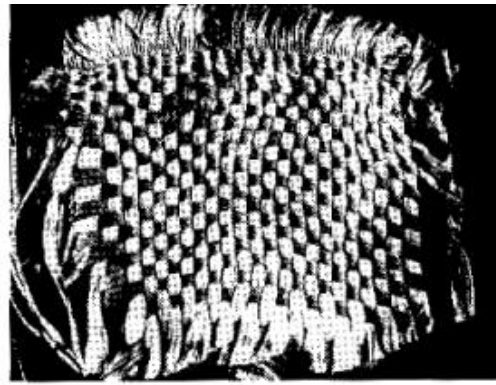
**מטריצה** מחזיקה את הסיבים יחדיו, מעבירה את העומס בין הסיבים ומגנה הסיב מפני הסביבה והבלאי המכאני. מטריצה נושאה חלק מן העומסים, בעיקר מאמץ רוחבי ומאמץ גזירה בין-למינארי. חלק מן התכונות של החומר המרוכב, כגון קשיחות וחוזק רוחביים, נשלטות ע"י המטריצה. חומרי המטריצה יכולים להיות פולימרים, מתכות או חומרים קראמיים. חומרים מרוכבים עם מטריצה פולימרית (PMCs-polymer matrix composites) הם הנפוצים ביותר בגלל קלות הייצור של חלקים, מחיר כלים והשקעה כספית נמוכים. המטריצה של ה- PMCs היא יכולה להיות כפולומר מסוג תרמוסט או תרמופלסט.

**מטריצות תרמוסטיות** נוצרות ע"י מעבר כימי בלתי הפיך של מערכת השרף למטריצת פולימר אמורפית בעלת קישור צולב. באופן כללי, הפולימר נקרא "מערכת שרף" במהלך הייצור ו"מטריצה" לאחר שהפולימר הוקשה (עבר התמצקות). השרפים התרמוסטים הנם בעלי צמיגות נמוכה, המאפשרת הספגה מצוינת של הסיב המחזק ומהירות ייצור גבוהות. מערכות השרף התרמוסטיות הן הנפוצות ביותר בשימוש, בשל קלות הייצור שלהן ומחירן הנמוך. "חיי מדף" הנו הזמן שמערכת השרף הלא מעורבב יכולה להיות מאוחסנת ללא דגרדציה, ובד"כ מומלץ על אחסון בקירור להשגת חיי המדף הנומינלים של המוצר. "Pot life" או "gel time" הוא הזמן בו השרף המעורבב יכול להחזיק לפני שהצמיגות גדלה לנקודה בה הייצור אינו אפשרי יותר.

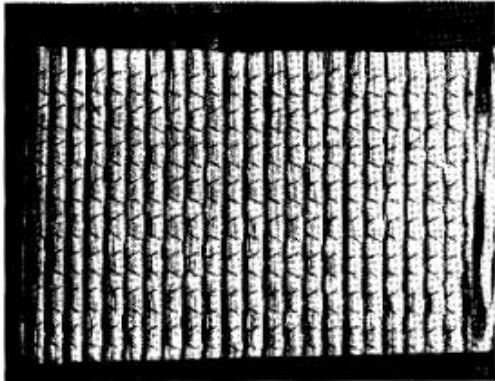
כתלות בבחירה של הקטליזטור (זרז) ושל ריאקטיביות השרף, מחזורי ההקשיה (curing) יכולים להשתנות מדקות לשעות, ויכולים להתבצע בטמפרטורת החדר או בטמפרטורה גבוהה יותר. התגובות הן אקסותרמיות וההתקרשות בד"כ מהירה. ההתקרשות מתרחשת כאשר השרף מגיע לנקודה בה הצמיגות כל כך גדלה, עד שהשרף בקושי יכול לזוז כאשר הוא נבדק עם כלי חד (ASTM D2471). השרפים התרמוסטים הנפוצים ביותר הם הפוליאסטרים, ויניל-אסטר, אפוקסי ופנולי. ויניל אסטרים הנם בעלי חוזק גבוה ופוליאסטרים הנם בעלי חוזק בינוני. שרפים אפוקסים נחשבים כבעלי ביצועים גבוהים, במובן שהחוזק שלהם עולה על התרמוסטים האחרים [3].



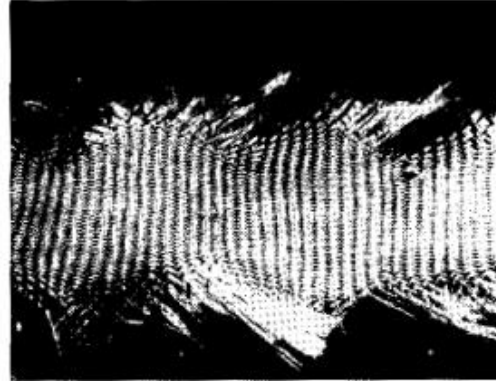
Carbon Woven Mat



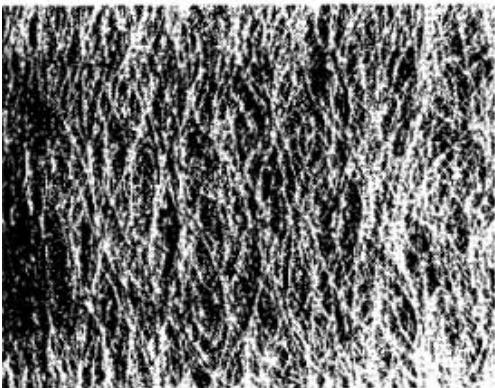
Kevlar Woven Mat



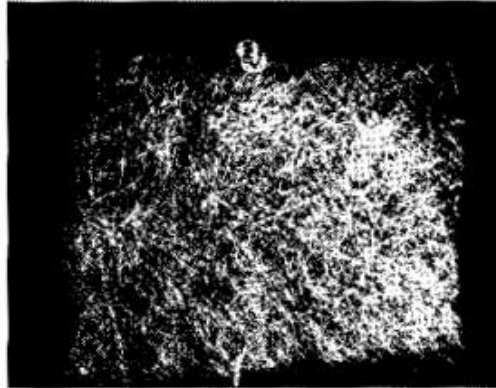
Glass Stitched Mat



Glass Braided Mat



Glass Continuous Strand Mat



Glass Veil

איור 5 : צורות סיבים : woven, stitched, braided, randomly oriented mats .

כמו ביצה שמקשים אותה ולא ניתן לרככה עוד, כך גם השרף התרמוסטי, אחרי ההקשיה החומר לא ניתן עוד לריכוך. השרף התרמוסטי הוא מולקולה ענקית אחת. בחומר כזה, העלאת הטמפרטורה לא תתבטא עוד בהרפיה פיזית של השרשראות כמו בתרמופלסטיים, כי בהיותו מולקולה אחת אין בחומר שרשראות חופשיות. מאותה סיבה החומר הזה לא מתמוסס בממס, כי תופעת ההמסה של חומר פירושה הפרדה בין המולקולות. לכן תרמוסטים הם בעלי עמידות טובה בטמפרטורות גבוהות, עמידותם הגבוהה בכימיקלים, ויציבות הממדית הגבוהה. אף קשרי הצילוב גורמים לירידה בגמישות ובכושר התנגדותם לאימפקט. חומרים אלה פריכים עד כדי כך, שמוצרים המבוססים עליהם חייבים להכיל חומרי מילוי או חומרי שריון. יתרון ייחודי לחומרים אלה, הנובע מן העובדה שהחומר המצולב מהווה מולקולה אחת גדולה, הוא שניתן להכין אותם מצילוב שרשראות פולימרות קצרות מאוד.



ככל שהמשקל המולקולרי של שרף קטן יותר, כך טמפרטורת ההתכה של החומר נמוכה יותר. לכן ניתן לעצב מוצרים מחומרי גלם נוזליים בעלי צמיגות נמוכה בטמפרטורת החדר. תהליך ההקשייה של שרפים תרמוסטיים יכול להתבצע ללא חימום (פוליאסטר, פוליאוריתנים, אפוקסים וסיליקונים), או בטמפרטורות גבוהות (פנולים, מלאמינים וכו'). מהקבוצה הראשונה מעצבים למשל סירות, יאכטות, חלקי מטוסים, חלקי מכוניות, מתקני משחקים לילדים, גשרים, משטחי שיש מלאכותי וכדו'. מהקבוצה השנייה מעצבים מוצרים קטנים בשיטה ההזרקה והכבישה [4].

**השרף הפנולי** (בקליט) הוא השרף הסינתטי הראשון שזכה לחשיבות מסחרית. הבקליט הוא מוצר של ריאקציה בין פורמאלדהיד ובין פנול. בשלב הראשון מכינים את השרף הפנולי התרמופלסטי, ובשלב השני יוצרים את קשרי הצילוב בין השרשראות בלחץ גבוה ובטמפרטורה של  $150-200^{\circ}\text{C}$ .

משרפים פנוליים מעצבים ידיות לסירים ולתנורים, מכלולים למוצרי חשמל, חלקי מקררים וטלפונים. הם זוכים לשימוש רחב כחומרי דבק לייצור פורמייקות, לוחות שונות וכחומר מקשר בייצור חלקי מכוניות (קלצ'ים), אבני משחזות וכו'. השרפים הפנוליים המצולבים מצטיינים בפני שטח קשים, שאינם נשרטים בקלות, הם בעלי חוזק מכאני גבוה, עמידים בטמפרטורות גבוהות, עמידים טוב במים ובממסים אורגניים. הם אינם זוחלים, אינם דליקים, והם בין השרפים התרמוסטיים הזולים ביותר. אבל בחשיפה לאור שמש החומרים מקבלים צבע כהה, ולכן לא מעצבים ממנו מוצרים בהירים.

**אוריאה ומלאמין** הם שרפים תרמוסטיים השייכים למשפחת האמינופלסטיקים כוללים קבוצות אמינות ( $\text{NH}_2$ ). צילוב שלהם מתרחש בחום כתוצאה של תגובה פורמאלדהיד או מלאמין עם פורמאלדהיד. הם לא מתכהים בחשיפה לאור ולכן ניתן לעצב מהם מוצרים בהירים וצבעוניים כגון כלי אוכל (מלאמין), מוצרי חשמל (מפסקים, התקעים והשקעים) מייצרים מאוראה.

**פוליאסטר** **תרמוסטיים** מצולבים כמו בפוליאסטר תרמופלסטיים הם קבוצות אסטרויות מקשרות בין חוליות פחמימניות, אשר מכילות גם קשרים בלתי רוויים (קשרי פחמן-פחמן כפולים), אותם מנצלים כדי לקשור את השרשרות ביניהן. בשרפים אלה, מייצרים תחילה את הפוליאסטר התרמופלסטי הבלתי רווי, חומר בעל משקל מולקולארי נמוך, שהוא לרוב נוזל בעל צמיגות גבוהה. את הנוזל הצמיג מדללים בעזרת סטירן די-אלילפטאלאט, או מטילמטהקרילאט. חומרים אלה משמשים גם כריאגנטים לצילוב. תהליך ההקשייה או ה-curing מתחיל כאשר לתמיסה של שני הנוזלים מוסיפים פראוקסידים (peroxydes), המתחילים את פעולת הצילוב בין השרשראות. ריאקציית הצילוב בין המונומרים (סטירן די-אלילפטאלאט או מטילמטהקרילאט) ובין הפוליאסטר, היא ריאקציה מהירה המתרחשת בקלות. לכן תהליך ההקשייה של הפוליאסטר הבלתי רווי אינו דורש חימום ויכול להתבצע בזמן סביר בטמפרטורת החדר. לחומר הוא נוזל בטמפרטורת החדר, ועובר הקשייה ללא חימום, יתרונות רבים בבניית חלקי מבנה גדולים.

מפוליאסטר משורין בסיבי זכוכית, מעצבים למשל גופי מכוניות ומשאיות (בארץ, למשל, עשו ממנו את הגופים של מכוניות הסוסיתא והכרמל), מכלים גדולים, מתקנים למגרשי משחקים, סירות, יאכטות וגשרים. מפוליאסטר ומלאנים אגרגאטיים, מייצרים את השיש המלאכותי וכדומה.

מהירות ההקשייה תלויה בכמות הפראוקסיד ובטמפרטורת המערכת. עבודה לא נכונה עם פוליאסטר לעיתים בסכנת פיצוץ או דליקה. אחת השיטות הנהוגות בתעשייה לזרז את תהליך הצילוב, היא הכנסת זרזים לתוך תמיסת הפוליאסטר, למשל, קובאלט – נפטנאט. זרז זה כאשר הוא מצוי בשרף פועל באיטיות לפרק את הפראוקסידים, אבל אם מסיבה כלשהי מערבבים את הזרז ישירות עם הפראוקסידים, תתכן ריאקציה אקסותרמית מהירה ביניהם, אשר עלולה לעיתים להסתיים בפיצוץ או דליקה.

**השרפים האפוקסים** מהווים היום את אחת הקבוצות החשובות ביותר בין השרפים התרמוסטיים. הכימיה של יצירת שרפים מצולבים אלה, מבוססת על תגובה בין מולקולות המכילות שתי קבוצות אפוקסי ובין מקשה שתפקידו לצלב ביו מולקולות אלה. האפוקסים המקובלים היום בשימוש הם המתקבלים מריאקציה בין אפיכלורוהידרין וביספנול A, ואילו כמקשים מכילים אמינים, אמידים, אנהידרידים, חומצות קרבוקסיליות ועוד. כדי לקבל שרף אפוקסי בעל תכונות אופטימליות יש

לשמור במערכות אלה על יחס סטויכיומטרי מדויק בין הבסיס והמקשה. סטייה מיחס זה עלולה להשאיר את אחד המרכיבים מחוץ למערכת.

הפופולריות של שרפי האפוקסי למרות מחירם הגבוה, נובעת מ:

- (1) כושרם להתקשות הן בטמפרטורת החדר והן בטמפרטורות גבוהות,
- (2) תכונות הדבקה מצוינות לחומרים רבים,
- (3) השרף אינו מתחמם ואינו משחרר חומרים נדיפים תוך כדי הקשיה,
- (4) השרף כמעט ואינו מתכווץ במהלך הצלוב,
- (5) עמידות גבוהה בפני קורוזיה, בממסים מימיים ואורגניים, ספיגת המים שלו מזערית,
- (6) התנגדות טובה למעבר זרם חשמלי,
- (7) חוזק מכני מעולה בנוכחות מלאים וחומרי שריון.

בשרפי האפוקסי משתמשים לייצור דבקים מצוינים, צבעים מעולים, ליציקות מדויקות, לחלקים החייבים לעמוד בתנאים מכניים ותרמים קשים. אך את עיקר שימושם מוצאים שרפי האפוקסי כמאגדים בחומרים מרוכבים. שרפי אפוקסי משוריינים בסיבי זכוכית, סיבי אראמיד, או סיבי גרפיט, משמשים היום לייצור מוצרים בעלי חוזק גבוה, משקל נמוך, ועמידות טובה בתחום רחב של טמפרטורות. תעשיית החלל, תעשיית המטוסים המתקדמים ואביזרי ספורט יוקרתיים הם הצרכנים העיקריים לחומרים אלה. אפוקסים משמשים כדבקים עבור מבני חלל דבש בתעופה וכשרפי ריבוד עבור גוף המטוס ויישומי טילים אשר מייצרים בשיטת הליפוף.

מטריצות אפוקסי משמשות בטמפרטורות שרות של בין  $125^{\circ}\text{C}$  ל-  $175^{\circ}\text{C}$ . להעלאת קשיחות של החומר המרוכב, השרפים האפוקסים התרמוסטים מוקשחים עם תוספים, כולל הוספת חומרים תרמופלסטיים. טמפרטורת שרות עבור אפוקסים מוקשחים נמוכה מזו של אפוקסים קשיחים, ומגיעה ל-  $125^{\circ}\text{C}$ . טמפרטורת הפעולה היא בד"כ מתחת לטמפרטורת Tg, אשר הנה גבוהה עבור אפוקסים פריכים (עד ל-  $247^{\circ}\text{C}$ ) ונמוכה עבור אפוקסים מוקשחים ( $185^{\circ}\text{C}$  -  $76^{\circ}\text{C}$ ).

**שרפים פוליאורתניים** פותחו בגרמניה עוד בשנות השלושים, אך זכו לשימוש רחב רק בשנות החמישים. שרפים אלה מקבלים כתוצר תגובה בין מולקולות המכילות שתי קבוצות איזוציאנאטיות (NCO), ומולקולות המכילות שתי קבוצות הידרוקסיליות (OH). את קשרי הצילוב בין השרשרות מספקים בשרפים אלה הטריאולים (מולקולות המכילות שלוש קבוצות הידרוקסיליות). המקובלים ביותר פוליאורתנים אשר מייצרים בד"כ בתגובה TDI (toluene diisocyanate) עם polymeric polyols (polyesters or polyethers). שימוש בפוליאורתנים הוא רחב מאוד - ממוצרים קשיחים עד לאלסטומרים גמישים וקצפים.

הפוליאורתנים עמידים בטמפרטורות גבוהות, אינם מסיסים במים וממסים אורגניים, הם בעלי התנגדות מצוינת לנגיפה, לשחיקה ועוד. משרפים פוליאורתנים מייצרים סוליות לנעליים, עור מלאכותי, אלסטומרים שונים, צמיגי מכוניות, קצפים למזרונים וקצפים קשיחים לבידוד ולאריזה.

**במטריצות תרמופלסטיות** משמשים לחומרי מבנה הנדסיים ולשימוש ביתי. הפולימר התרמופלסטי אינו עובר שום מעבר כימי במהלך הייצור. הפולימר מרוכב מהמצב המוצק לשם עיבוד, וחוזר למצב מוצק לאחר שהייצור מושלם. התרמופלסטיים הם בעלי צמיגות גבוהה בטמפרטורת הייצור, דבר העושה אותם קשים יותר לייצור. מאמצי הגזירה הגבוהים הנחוצים לזרימת התרמופלסטיים גורמים נזק לסיבים וכתוצאה, הפחתה באורך הסיב בסדר גודל של 10 עד 100 פעמים. על כן, אחת המטרות העיקריות בייצור של חומרים תרמופלסטיים ובהליכים חדשים היא להפחית את האפקטים של הצמיגות בנוזל. מאחר וההספגה ניזוקה כתוצאה מצמיגות גבוהה, יש לתת טיפול מיוחד לשם הבטחת המגע בין הסיבים והפולימר. תרמופלסטים הם בעלי חיי מדף בלתי מוגבלים באופן תיאורטי. חומרים מרוכבים תרמופלסטיים ניתנים לתיקון, מאחר והמעבר למצב המרוכב יכול להתבצע מספר רב של פעמים ע"י חימום.

**Polyether ether keton (PEEK)** הנה המטריצה התרמופלסטית הנפוצה ביותר עבור יישומי טמפרטורה גבוהה. היא בעלת חסינות גבוהה לשבר, אשר חשובה לסבילות נזק של חומרים מרוכבים. PEEK הוא חומר גבישי למחצה בעל ספיגת מים הרבה יותר נמוכה מאשר של רוב האפוקסים.

***Polyphenylene sulfide* (PPS)** הנו חומר תרמופלסטי גבישי למחצה בעל עמידות כימית מצוינת.  
***Polysulfone (PSUL)*** הוא תרמופלסט אמורפי עם התארכות לשבר גבוהה מאוד ויציבות מצוינת תחת תנאי חום ורטיבות.  
נציין 4 סוגים של פולימידיים.

***PEI Polyetherimide* ו- *PAI Polyamide-imide*** הם- תרמופלסטים אמורפיים עם טמפרטורות מעבר זכוכיתי גבוהות.

***K - III*** ו- ***LARC-TPI*** הם פרה - פולימרים בתמיסת ממס המשמשים לציפוי סיבים. הציפויים לאחר מכן מוקשים בבערך 300°C ונעשים פולימרים אמורפים עם טמפרטורות מעבר זכוכיתי גבוהות. לאחר הקשיה, הפולימר ניתן לחימום ולשינוי צורה כחומר תרמופלסטי רגיל עם טמפרטורת ביצוע גבוהה טובה.

### **מלאנים (fillers) וחומרי שריון**

**מלאן** הוא תוסף אבקתי אינרטי המיועד בעיקר להוזיל את מחיר המוצר.

**פלסטיק משוריין (reinforced plastic)**: שרף פולימרי המכיל בתוכו מלאן סיבי.

המלאנים בחומרים הפלסטיים, בתחילה, השתמשו בהם כחומר מילוי נפחי בלבד כדי להוזיל את מחיר המוצרים. במשך השנים, עם הניסיון הרב שנרכש בעבודה עם חומרים אלה, הסתבר, שעצם נוכחותם בחומר, מקנה לו תכונות שונות מאלה שהיו לו במקור.

אפילו מלאנים פשוטים (אינרטיים) תורמים בשרף ל: הגדלת המודול האלסטי, הקטנת התכווצות ההיתך, הגדלת ההתנגדות ללחיצה ולזחילה, הקטנת מקדם ההתפשטות, הגדלת הקושי, העלאת טמפרטורת ההתרככות ועוד.

ואילו מלאנים מתוחכמים יותר, אלה המכונים מלאנים אקטיביים, תורמים גם ל: הורדת מקדם החיכוך, עלייה במוליכות התרמית והחשמלית, הגדלת ההתנגדות לשחיקה וכו'.

נוסף על שני סוגים אלה קיימת קבוצה שלמה של מלאני שריון (reinforcing fillers) שתרומתם לחומר הפלסטי מתבטאת בעיקר בהקניית תכונות מכאניות משופרות. מלאנים אלה מוצאים היום שימוש נרחב מאוד במוצרים פלסטיים הנדסיים וייחודם הוא במבנה הגיאומטרי הסיבי שלהם [1-4].

### **תהליך הייצור**

הבחירה בשיטת הייצור תלויה בסוג המטריצה והסיבים, הטמפרטורה הנדרשת ליצירת החלק ולהקשית המטריצה (cure) ולעלות האפקטיבית של התהליך. ע"כ, המתכנן צריך להבין את החסרונות, הגבלות, מחיר, קצב ייצור, נפח ייצור ושימושים אופייניים של תהליכי ייצור שונים. המאפיינים הבסיסיים של תהליך הייצור הרלוונטיים למתכנן המבני יובאו להלן. הייצור של מטריצה פולימרית של חומר מרוכב כוללת את הפעולות הבאות:

מיקום הסיבים לאורך האוריינטציות הרצויות.

הספגת הסיבים בשרף.

חיזוק (גיבוש) הסיבים המוספגים להסרת שרף עודף, אוויר, וחומרים נדיפים.

הקשיה או התמצקות של הפולימר.

הוצאה מהתבנית.

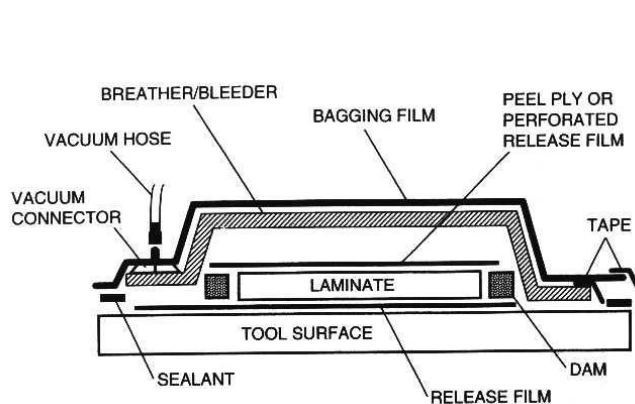
פעולות סיום, כגון סידור (גיזום).

תהליכי הייצור השונים שונים בדרך בה פעולות אלו ערוכות. ניתן לחבר חלק מן הפעולות לשלב פשוט על מנת לחסוך בזמן, לדוגמא, מיקום הסיבים, הספגה וגיבוש הסיבים מבוצעים בו-זמנית בשיטת הליפוף. חלק מן הפעולות יכולות להיות מבוצעות מראש, כגון הספגה של ה- prepreg, אשר לאחר מכן משמש בשיטת ההנחה ביד (lay-up).

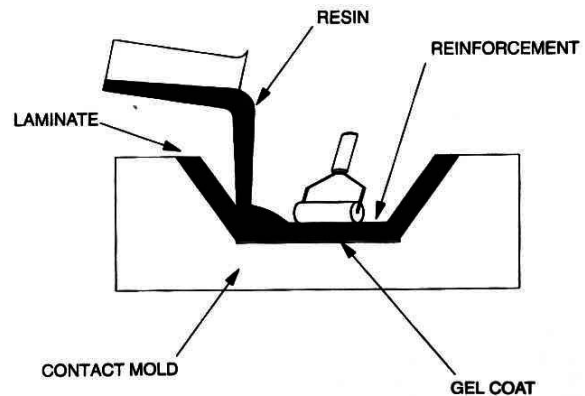
שיטות הייצור כוללות: *etc. poltrusion, filament winding, prepreg lay up, spray up, hand lay-up*

### **Prepreg Lay Up**

פרפרג הוא חומר מחוזק ע"י סיבים המוספג מראש, כאשר השרף מוקשה חלקית או מעובה (כאשר קיימת דרישה למוצר בעל עובי דופן אחיד ופיזור הומוגני של שרף וחומר שריון). הסיבים ערוכים בסרט בעל כיוון אחיד, בד ארוג, או לוחות של סיבים קצוצים אקראיים. בשיטה זו מעצב המוצר מקבל בד מוכן לעבודה, וכל שעליו לעשות הוא לעצב ממנו את המוצר ולהקשות אותו, כלומר, ההבדל הבסיסי בין ה- Prepreg Lay-Up וה- Lay-Up הקונבנציונאלי הוא שבשימוש ב- Prepreg ההספגה של הסיבים נעשית קודם ל- molding. כדי להקנות חיי מדף ארוכים ל- Prepreg מספיגים את הבד רק בשרפים העוברים curing בטמפרטורות גבוהות. ההקשיה למוצר הסופי בשיטה זו דורשת, לפיכך, טמפרטורות גבוהות. Prepregs בעיקר בשימוש בייצור חלקי תעופה לביצועים גבוהים ובעלי גיאומטריות מסובכות. רוב ה- Prepregs נעשים ממערכות שרפים אפוקסים, והמחזקים בד"כ כוללים סיבי זכוכית, פחמן וארמיד. ברוב מערכות ה- prepreg-הרכב השרף גבוה יותר מהרצוי במוצר הסופי. Prepregs חדשים נעשים עם הרכב שרף near-net להימנע מההסרה של השרף העודף, אשר נעשית יקרה. הרכב ה- near-net של השרף משמעותו כי כמות השרף ב- prepreg נשמרת קרובה להרכב השרף הנחוץ בחלק הסופי. Prepregs אלו נעשים ע"י שימוש בשיטת הספגה מוקדמת בהיתך חם אשר מקטינה את החומרים הנדיפים הנוכחים ב- prepreg. מאחר והשרף מוקשה חלקית, ה- prepregs הם בעלי חיי מדף מוגבלים, המתארכים ע"י אחסונם בהקפאה. אוטוקלאב וואקום בד"כ נדרשים לעזור בחיזוק והקשיה של חלקים הנעשים עם prepreg. הייצור של שרפים תרמופלסטים שונה מזה של תרמוסטטים. הטמפרטורות והלחצים אשר בשימוש בד"כ גבוהים יותר עבור תרמופלסטים בגלל שהצמיגות שלהם צריכה להיות מופחתת ע"י חום במהלך הייצור. אז ההקשיה מוחלפת ע"י קירור לטמפרטורת החדר. יתרונות השיטה: אפשרות שליטה טובה על תכונות המוצר, תהליך ייצור פשוט, פיזור אחיד של סיבים, חסכון גדול בעבודת כפיים, אולמות עבודה נקיים, שבר נפחי גבוה של סיבים. חסרונות השיטה: חומרי גלם יקרים, חיי מדף מוגבלים, יש לאחסן אותם בקירור עד לשימוש, ציוד הקשיה יותר יקר ותוספת מחיר להכנת ה- prepreg.



איור 7: Vacuum bagging



איור 6: Hand Lay-Up

שיטת האוטוקלאב אוטוקלאבים (Autoclave) הם מיכלי לחץ המכילים גז דחוס במהלך הייצור של החומר המרוכב. הם משמשים לייצור חלקים מורכבים בעלי איכות גבוהה.

תהליך האוטוקלאב של החומרים המרוכבים הנו הרחבה של טכניקת שק הוואקום, המספק לחץ גבוה יותר מאשר זה האפשרי עם הוואקום ונותן דחיסה גדולה יותר ומניעה של העדריות. החלק של החומר המרוכב מונח ונסגר בתוך שק וואקום. בתוך השק ישנו וואקום מלא או חלקי ולחץ גז גדול מהלחץ האטמוספרי מיושם על החלק החיצוני של השק. לאחר מכן מעלים את טמפרטורת החלק לשם התחלת תהליך ההקשיה של הפולימר. טמפרטורה גבוהה יותר מפחיתה גם את צמיגות הפולימר, ועוזרת בהרטבת החומר המחזק ובחיזוק החומר המרוכב.

לחץ גדול מפעיל כוחות מכאניים על החומר המרוכב הלא מגובש, מגביר את יעילות הגעת החומרים הנדיפים לפתחי הוואקום, וגורם להגדלת הרטיבות וזרימת השרף. נפח האוויר הכלוא והחומרים הנדיפים המשתחררים קטן באופן

פרופורציונאלי ללחץ הוואקום המיושם בטמפרטורה הנתונה. על כן, פרוזיביות והיעדרויות נעשות מינימאליות. בנוסף, מעבר החומרים הנדיפים בפולימר המותך לפתחי הוואקום יעילה יותר בלחצים גבוהים. רוב האוטוקלבים ביצור חומרים מרוכבים הם מכלי לחץ צילינדרים עם קצוות מקומרים, אחד מהם זוהי הדלת או הכניסה. האוטוקלב בד"כ מורכב בצורה אופקית על רצפת המפעל על מנת לספק גישה נוחה יותר לחלקו הפנימי. הקוטר הוא הפקטור המגביל בגודל. אוטוקלבים בעלי קוטר גדול דורשים קירות עבים באופן קיצוני ונעשים מאוד יקרים. רוב האוטוקלבים המשמשים במחקר ופיתוח הם בעלי קוטר של 1 m, בעוד אוטוקלבים המשמשים בייצור נעים בקוטריהם מ- 8 m - 1 m. הכלים המשמשים באוטוקלבים הם בד"כ בצורות זכר או נקבה פשוטות. פעולות האוטוקלב צורכות כמויות גדולות של אנרגיה וחומרים, כולל גזים תעשייתיים וחומרי שק. פעולות האוטוקלב דורשות גם עבודה אינטנסיבית ולוקחות זמן. מחזור ההקשיה והגיבוש של החלק בתוך אוטוקלב הינו ארוך ואינטנסיבי. במקרה של חלקים מאוד עבים יתכן ויהיה צורך לחזור על תהליך ההקשיה פעמים אחדות. עבור חלקים גדולים, העולים על הגודל של הלחצים האפשריים, תהליך האוטוקלב הינו האפשרות היחידה ועבור קצבי ייצור בינוניים בתעשיית החלל, תהליך האוטוקלב הוא בד"כ האפשרות החסכונית ביותר. עבור שק וואקום משתמשים במשאבה ליצור וואקום של בערך 100 kPa, בקצב של 60-400 ליטרים בדקה על כן גודל החלק קובע את זמן יצירת הוואקום. קצב הייצור של אוטוקלבים נקבע גם ע"י פרופיל ההקשיה הכולל זמן חימום, הקשיה וקירור. זמני הקשיה חלקים קטנים וגדולים יכולים להגיע כבערך - 3-5 שעות ו- 12-16 שעות, בהתאמה.

## מהלך הניסוי

במהלך המעבדה נכין מספר דגמים למתיחה. הדגמים מורכבים ממטריצה פולימרית ומספר מסוים של אגודות של סיבי פחמן/בזלת (tows). באותם דגמים נמדוד את חוזק הכניעה והתארכות עד לשבר בניסוי מתיחה.

כמטריצה נשתמש בשרף מורכב מאבקת PMMA (Polymethyl methacrylate) 99% ו-1% Benzoyl Peroxide ונוזל מקשה (95% Methyl methacrylate ו-5% Dimethyl p-toluidine) (מוכר בשם מסחרי Koldmount). כחומר מחזק משתמשים באגודות של סיבי פחמן או סיבי בזלת.

## הכנת הדגמים:

- 1- נקה 7 תבניות והרכב אותן. אוטמים את התבנית באמצעות נייר או זלין.
- 2- מרח את כל התבניות בחומר מונה הדבקה (Release Agent)
- 3- שקול עבור כל דגם כ-6 גרם של אבקת הדבק ו-3 גרם של נוזל מקשה.
- 4- פזר בתחתית התבנית אבקת דבק. הנח עליה אגודת סיבים באורך 9 ס"מ וכסה באבקה. חזור על הפעולה לפי מספר האגודות הנדרש לפי הנחיות המדריך.
- 5- בתום הכנת הדגם, הוסף לתבנית את הנוזל המקשה שנשקל וערכב בזהירות עם האבקה עד שהנוזל ייספג באופן אחיד. סגור את התבנית לפרק זמן של 30-45 דקות.

בדיקת תכונות מכניות (ניסוי מתיחה):

- 6- פרק את התבניות והשחז את הדגמים במידת הצורך.
- 7- קבע את מידות הדגמים: רוחב, אורך אזור המדידה (gauge) ועובי. רשום את התוצאות בטבלה 2.
- 8- אחוז דגם בתפסניות של מכונת מתיחה במקביל לציר העומס המופעל. אפס את המיקום והעומס.
- 9- הפעל את מכונת המתיחה ומתח עד לשבר.
- 10- שמור את עקומות מאמץ-עייבור בקובץ EXCEL ושלח בדואר אלקטרוני.

## טבלה 2. תוצאות ניסוי מתיחה

מספר הדגם	1	2	3	4	5	6	7
מספר אגודת של חומר מחזק	0						
עובי [מ"מ]							
רוחב [מ"מ]							
אורך [מ"מ]							
ריכוז סיבים במטריצה	0						
ערך הכוח בהופעת הסדק הראשון במטריצה (אם קיים)							
ערך הכוח מרבי $F$ [N]							
חוזק החומר המרוכב [MPa]							
$F_m$ [N]							
$\sigma_f^c$ חוזק של סיבי פחמן [MPa]							

### אפיון החומר המרוכב

1. ניסויי מתיחה לשבע דגמים. בדיקת התארכות, מאמץ כניעה וחוזק.
2. אפיון מיקרוסקופי של פני השבר של הדגמים (כמות השכבות, סוג השבר).

### עיבוד נתונים

1. בנה את עקומות מתיחה מאמץ-עיבור של כל הדגמים.
2. שרטט את החוזק הגבולי UTS כתלות בריכוז השטח של הסיבים (שטח החתך של הסיבים יחסית לשטח החתך של הדגם).
3. חשב את החוזק של סיבי הפחמן בהנחה שחוק התערובות (additivity) ישים לחומר הנבדק:

$$\sigma_f^c = (F - F_m) / N S_f$$

כאשר  $F$  הוא כוח מתיחה מרבי של הדגם עם חומר מחזק,  $N$  הוא מספר אגודות הסיבים, ו-  $S_f$  הוא שטח החתך של אגודת סיבים יחידה ( $0.7 \text{ mm}^2$ ).  
 $F_m$  הכוח המרבי במטריצה הוא:

$$F_m = \sigma_m^0 (S - N S_f)$$

כאשר  $\sigma_m^0$  הוא חוזק המטריצה שנמדד בניסוי מתיחה של דגם מטריצה ללא סיבים ( $0 = N$ ),  $S$  - שטח החתך של הדגם בניסוי עם חומר מחזק.  
 שרטט את החוזק המחושב של סיבי הפחמן כתלות בריכוז הסיבים במטריצה.

### דיון בתוצאות ומסקנות

- הסבר את אי-ההומוגניות של חומר מרוכב בכוונים שונים.
- במקרה שקיימת סטייה מליניאריות של חוזק החומר המרוכב כתלות בריכוז סיבים, הסבר מדוע.
- השווה את החוזק של אגודת סיבי הפחמן שקבעת על פי הניסוי לערך שפורסם בספרות (4550 MPa).
- הסבר התנהגות של עקומת  $\sigma_f^c$  כתלות בריכוז הסיבים.
- תאר את פני השבר בניסויי המתיחה.

## שאלות לדו"ח מכין

1. תאר את תהליכי הייצור של חומרים מרוכבים.
2. מהו חומר מרוכב המחוזק ע"י חלקיקים, איזה מטריצות ואיזה חלקיקים אתה מכיר ?
3. מהם השימושים של ח"מ המחוזק בסיבי גרפיט או בורון ?
4. הסבר את ההבדלים בתכונות המכניות של:  
א. מטריצה אפוקסית.  
ב. שכבה של PREPREG  
ג. חומר מרוכב בנוי מכמה שכבות של PREPREG.

## ביבליוגרפיה :

1. D. B. Miracle and S. L. Donaldson, Introduction to Composites, *Composites*, ASM Handbook, Vol. 21, (2001), ASM International, pp. 39-67.
2. W. D. Callister, Jr., D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering. An Introduction*, Chapter 16: Fiber-Reinforced Composites. 7<sup>th</sup> ed. John Willey & Sons, 2006.  
[https://www.academia.edu/6882164/Materials\\_science\\_and\\_Engineering\\_by\\_William\\_D.\\_Callister](https://www.academia.edu/6882164/Materials_science_and_Engineering_by_William_D._Callister)
3. E. J. Barbero, *Introduction to composites materials design*, Philadelphia, PA: Taylor & Francis, 1999.
4. C. Zweben, H. T. Hahn, T- W. Chou, *Mechanical behavior and properties of composite materials*, Volume 1, Technomic Publishing Co. Inc, 1989.
5. H. L Cox, The elasticity and strength of paper and other fibrous materials, *British J. Appl. Phys.* **3** (1952) 72-80.
6. HexForce® *US Technical Fabrics Handbook* - *Hexcel.com*; HexPly® 8552 - *Hexcel.com*.
7. D. D. L. Chung, *Carbon Fiber Composites*, 1994, Butterworth-Heinemann, p. 213.