



חומרים מרוכבים - היכרות על קצה המזלג

אביב אקונס*

כתגובה פותחו חומרים פלסטיים משורייני סיבים על בסיס סיבי זכוכית, אשר שימשו בחלקים תעופתיים, בעיקר בארצות הברית, כבר בשנות החמישים.



תמונה מס' 1: סירת מירוץ מחומרים מרוכבים על בסיס זכוכית פוליאסטר

חומרים מרוכבים על בסיס סיבי זכוכית משמשים כיום במגוון עצום של יישומים כולל יישומים לא יקרים כמו סירות, מוצרי צריכה כגון רהיטים, חלקי מכונות ורכבות, חלקי מטוסים, מוצרי בניין, גשרים ועוד. עם הזמן פותחו סוגי סיבים נוספים אשר העלו את האטרקטיביות של השימוש בחומרים אלו בפרט בעולם התעופה, אך לא התאימו לשימוש מסחרי עקב העלות הגבוהה של החומרים.

יתרונות החומרים המרוכבים

- ◆ משקל מוצר נמוך.
- ◆ תכונות מכאניות מובחרות, כגון חוזק וקשיחות.
- ◆ עמידות מצוינת בקורוזיה ואווירה ימית.
- ◆ אפשרות ל-Tailor making: ניתן לבחור את התכונות והכיוונים שלהם באזורים הנדרשים.
- ◆ ניתן לייצר מהם חלקים בעלי צורות גאומטריות מורכבות ביותר.

"ולא יכלה עוד להציפנו ותיקח לו תיבת גומא ותחמרה בחימר ובזפת ותשם בה את הילד" שמות ב' פס' ג'. כנראה שגם אבותינו השתמשו בחומרים מרוכבים בצורה זו או אחרת, עוד לפני 4000 שנה ...

ונעבור בקפיצת ענק למאה העשרים ואחת.

חומרים מרוכבים ניתנים להגדרה כשילוב מקרוסקופי של שני חומרים שונים או יותר, אשר קיימת התאמה בשטח הפנים שלהם. מכיוון שחומרים מרוכבים משמשים בעיקר ליישומים הנדסיים או מבניים, ניתן לצמצם את ההגדרה לחומרים המכילים משוריינים כמו סיבים או חלקיקים, הנתמכים על ידי חומר מאגד - מטריצה.

לפיכך חומרים מרוכבים מכילים בדרך כלל פזה של סיבים או חלקיקים בלתי רציפים בעלי חוזק וקשיחות העולים על אלה של הפזה הרציפה המאגדת אותם. על מנת לספק שריון נאות, התכולה הנפחית של המשריון חייבת להיות בדרך כלל בין 10% ל- 65% מכלל החומר.

ניתן לחלק את החומרים המרוכבים למשפחות בכמה אופני חלוקה: לפי סוגי השריון (סיבים רציפים, סיבים קצוצים, פתיתים), לפי סוגי הסיבים, לפי סוגי המטריצות, לפי סוגי השימושים ועוד.

חומרים מרוכבים פותחו בתחילה משום שאף חומר מבני הומוגני אחר לא הפיק צירוף תכונות רצוי בעבור יישום נדרש מסוים, כפי שמפיקים חומרים אלו. חומרים אלו פותחו בתחילה בעבור עולם התעופה, כמענה לדרישה בשיפור הביצועים של מערכות קיימות. סגסוגות אלומיניום אשר הפיקו חוזק סביר וקשיחות סבירה במשקל נמוך, היו החומרים העיקריים בעולם התעופה במשך שנים. אולם בעיות קורוזיה והתעייפות דחפו בסוף מלחמת העולם השנייה לפיתוח חומרים חדשים, שיפתרו בעיות אילו ויספקו בנוסף שיפור בביצועים.

* אביב אקונס, מהנדס חומרים בתעשייה.



סוגי הסיבים

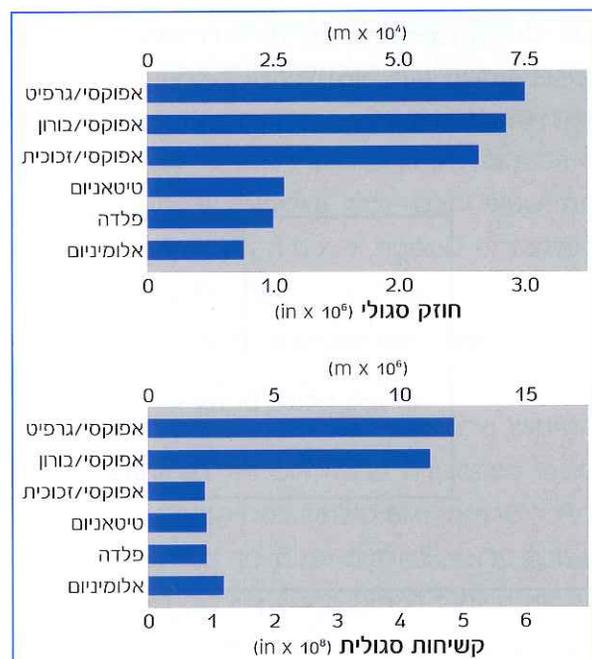
■ כמוזכר קודם, סיבי הזכוכית הם הסיבים הנפוצים ביותר בחומרים מרוכבים, בעיקר בתעשיית המכוניות, הרכבות, הבינין, הסירות, מוצרי הצריכה ועוד. קיימים סיבי זכוכית על בסיס aluminosilicates בעלי חוזק גבוה (S Glass), או על בסיס Calcium aluminoborosilicate בעלי עמידות כימית ותכונות חשמליות מתאימות (E Glass). אלה ואלה משמשים ליישומים דיאלקטריים כמו חיפויים, כיסויי אנטנות וכדומה. יתרון נוסף של סיבי הזכוכית הוא מחירם הנמוך לעומת הסיבים האחרים.

■ משפחה רחבה אחרת של סיבים היא משפחת סיבי הפחמן. לסיבים אלו תכונות של חוזק וקשיחות בדרגה גבוהה יותר, ולכן הם משמשים בעיקר בחלקים מבניים נושאי עומס כמו בתעשיית התעופה, או בחלקים נושאי עומס בתחבורה או ימאות. קיימים סיבי פחמן בעלי חוזק רב או רב מאוד, או סיבי פחמן בעלי מודול קשיחות גבוה או גבוה מאוד. במקרים מסוימים סיבי הפחמן עוברים תהליך תרמי נוסף והופכים לסיבי גרפיט לצורך קבלת תכונות מיוחדות כמו עמידות תרמית גבוהה או יציבות ממדים טובה. בתחילת דרכם יוצרו סיבי הפחמן על בסיס Rayon בעלות גבוהה יחסית, אך במשך הזמן פותח סוג נוסף על בסיס PAN: Polyacrylonitrile בעלויות נמוכות יותר, כך שהוא הפך לנפוץ יותר. סוג אחר של סיבי פחמן הוא על בסיס Pitch (זפת), גם כן בעלויות נמוכות יותר.

■ סיבים נוספים הם סיבי ארמיד: הקבלר, אשר הוא שם מסחרי של פיתוח סיבים אורגניים פוליאמידים ארומטיים של חברת Du Pont. לסיבים אלו חוזק גבוה משל סיבי הזכוכית וכן תכונה מיוחדת של כושר ספיגת אנרגיה גבוה מאוד, ולפיכך הם משמשים גם במכלי לחץ ובתעשיית ההגנה הבליסטית, באפודי מגן, בקסדות, בלוחות הגנה בפני כדורים ורסיסים וכדומה.

■ סיבים אחרים הם סיבי בורון, סיבי סיליקה, סיבי קווארץ, סיבי ניילון ועוד.

לחומרים מרוכבים יתרון משמעותי נוסף בשטח הצפידות fracture toughness: רוב חומרי המבנה האחרים שהם בעלי חוזק וקשיחות גבוהים, מגיעים לכשל עקב היווצרות פגמים או סדקים. בעיה זו מופחתת במידה רבה בחומרים מרוכבים מכיוון שאם קיים פגם בסיב, הוא נעצר בשטח הפנים ואין הוא עובר לסיב הבא. בצורה דומה הסיבים עוצרים במקרים מסוימים פגמים הקיימים במטריצה.



תמונה מס' 2: חוזק וקשיחות סגוליים (תכונה/צפיפות) של חומרים מרוכבים לעומת חומרים אחרים.

חסרונות החומרים המרוכבים

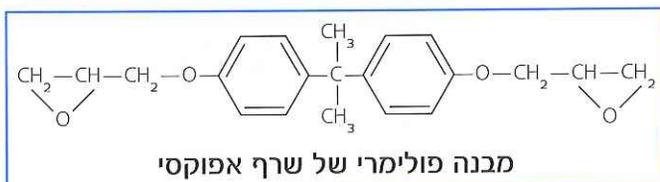
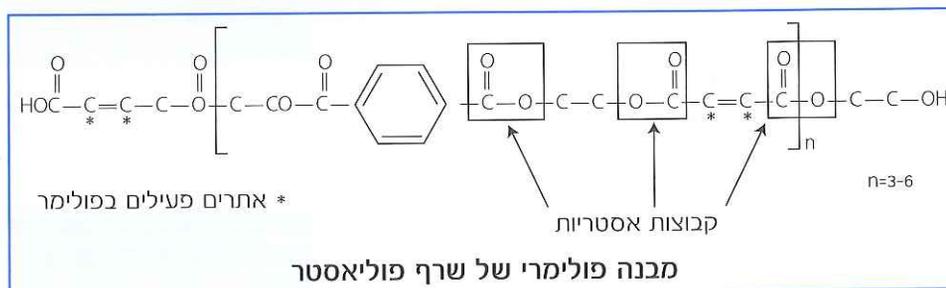
- ◆ עלות חומר גלם גבוהה יחסית.
- ◆ עלות ייצור גבוהה בסדרות קטנות (כיום נכנסות לשוק טכנולוגיות ייצור זולות יותר).
- ◆ נדרשת התמחות מיוחדת הן בתיכון והן בייצור.
- ◆ גישות שמרניות בעולם התעופה מעכבות את השימוש בהם לחלקי מבנה עיקריים.



תמונה מס' 3: רכבות הבנויות מחומרים מרוכבים, הקטר והקרונות.

סוגי השרפים (המטריצות)

שרף הפוליאסטר הוא השרף הוותיק ביותר והנפוץ ביותר. קיים בעבורו מגוון רחב של מקשים (Curing agent) כמו סטירן וחומרי מילוי. מכיוון שתכונותיו המכאניות הן נחותות ביחס לרוב השרפים, ומחירו נמוך, הוא משמש בעיקר עם סיבי זכוכית בתעשיית הסירות, הבניין ומוצרי צריכה. בעבר שימש באופן נרחב גם בתעשיית המכוניות (ראה ערך סוסיטא).



שרף אפוקסי: השרף השכיח ביותר ביישומים מבניים הוא השרף אפוקסי. לשרף זה תכונות מכאניות גבוהות כשלעצמו וכושר הדבקה מצוין לסיבים. עלות האפוקסי גבוהה מהפוליאסטר, אך הוא גם עמיד יותר לכימיקלים, ללחות, לטווח טמפרטורות רחב יותר ונוח לעבודה במגוון רחב של תהליכים ושל שיטות ייצור. השימוש הנרחב בשרף בעולם התעופה והים, הוביל ליצירת מאגרי נתונים מקיפים עם מגוון רחב של סיבים. לשרף האפוקסי תכונות המתאימות לתנאי הטמפרטורה והלחות (Hot/wet) הנדרשים במטוסים.

שרף הפוליאמיד: הוא חומר העמיד במיוחד בטמפרטורות גבוהות, משמש בפרט בתעשיית המטוסים והטילים, ביישומים חמים כמו ראדומים (חרטום של כלי טיס השקוף לקרינת מכ"מ) ובחלקים שליד מנועים. מתוך השרפים המופיעים כאן, לשרף הפוליאמיד יש העמידות לטמפרטורה הגבוהה ביותר. ה-Tg (טמפרטורת המעבר הזכוכית) לחומר זה במצב יבש מגיע עד 380°C לשרף פוליאמיד מסוים. טמפרטורת העבודה בשימושים מבניים עם שרף פוליאמיד מוגבלת ל- 315°C.

שרפי פוליאימיד מתחלקים לשתי קבוצות:



שרפים המתפלמרים בראקציית דחיסה (Condensation) - כתוצאה מכך בזמן תהליך ההקשיה נפלטים נדיפים רבים הגורמים לתכולת חללים גבוהה במוצר - תכונות מכאניות נמוכות יחסית.

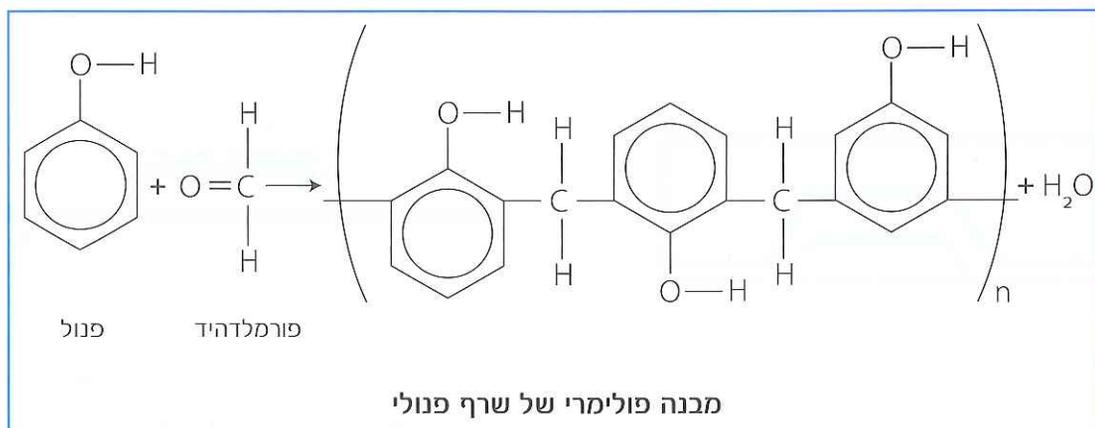
שרפים המתפלמרים בראקציית סיפוח (Addition) - בחומרים אלו נדרשת טמפרטורת הקשיה גבוהה ביותר, כ- 315°C, הדורשת אמצעי ייצור מיוחדים וחומרי עזר לסידור שק הוואקום העמידים בטמפרטורה זו.

ככלל, התכונות המכאניות בשרפים הפוליאימידים נמוכות יחסית לעומת השרפים המבניים האחרים. בנוסף לכך חלק ניכר משרפים אלו מכיל MDA, הידוע כחומר מסרטן (בזמן תהליכי הייצור).

שרף הציאנט אסטר: גם שרפי הציאנט אסטר שייכים למשפחת השרפים לעבודה בטמפרטורות גבוהות. טמפרטורת ה-Tg לחומר זה במצב יבש מגיעה עד 232°C. יתרון ייחודי לחומר זה הוא יציבות ממדים היגרוסקופית מצוינת, מקדם התפשטות תרמי נמוך ושקיפות אלקטרומגנטית טובה. לפיכך שרף ציאנט אסטר משמש בחלל בחלקים כמו רפלקטורים לאנטנות, מבנים הקשורים למראות בטלסקופים, פנלים סולריים ובראדומים. טמפרטורת עבודה מקובלת בשימושים מבניים למערכות חומריות על בסיס ציאנט אסטר היא כ- 175-200°C.

שרפי ה-BMI (Bismaleimide): מיועדים לעבודה בטמפרטורות גבוהות, בשל טמפרטורת ה-Tg הגבוהה לחומר זה במצב יבש: עד 315°C. לשרפים אלו המשולבים בסיבי פחמן תכונות מכאניות טובות בכל טווח של טמפרטורות השימוש שלהם. כמו כן לשרף זה יציבות ממדים תרמית טובה גם בטמפרטורות גבוהות ושקיפות אלקטרומגנטית טובה. טמפרטורת עבודה אופיינית בשימושים מבניים במערכות חומריות על בסיס שרף BMI היא כ- 200-230°C. לפיכך שרף ה-BMI משמש בפרויקטים מיוחדים שבהם נדרש לעמוד בתכונות גם בטמפרטורות גבוהות כמו מכוניות ספורט פרארי, בחלקים חמים ליד המנוע, חלקים מבניים של מטוסים כמו כנפיים, ראדומים וחלקים למסוקים. כמו כן הוא משמש במטוס החדש איירבוס A380 בחלקים חמים ליד המנועים, במנועי סילון רולסרויס ובחלקים מבניים נרחבים במטוס הקרב האמריקני החדש ה-F22.

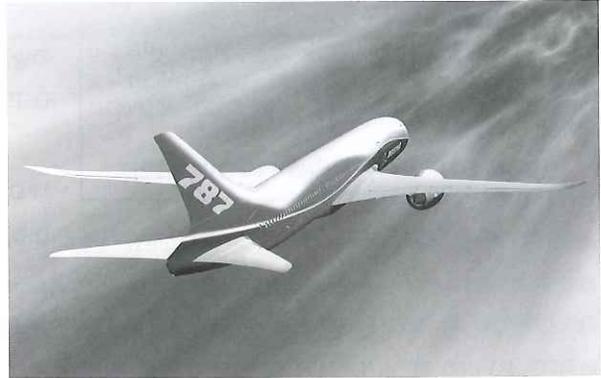
שרף נוסף הוא שרף פנולי. השרפים שתוארו לעיל הם חומרים תרמוסטיים. קיימת גם משפחה רחבה של שרפים תרמופלסטיים המשמשים בתהליכי הזרקה וכבישה במוצרי צריכה ותחבורה.



תחום נוסף וקטן יחסית הוא תחום חומרים מרוכבים מתכתיים. בתחום זה הסיבים והמטריצות מבוססים על מתכות, קרבידיים או חומרים קרמיים. לפיכך העמידות בטמפרטורות שלהם גבוהה ביותר וכך גם תכונות מיוחדות אחרות. עלות תהליכי הייצור שלהם גבוהה במיוחד כך שהם נדירים יחסית בשוק. דוגמאות לחומרים מרוכבים מתכתיים: Ti-C, Al-SiC, TiO-ZAI

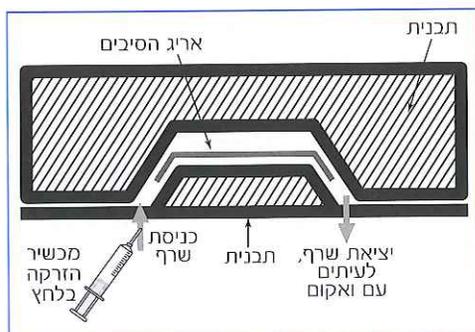


תמונה מס' 5: מטוס הנוסעים הגדול בעולם, ה-A380, ש-20% ממנו מיוצרים מחומרים מרוכבים.



תמונה מס' 4: מטוס הנוסעים החדש של בואינג, ה-787, ש-50% ממנו מיוצרים מחומרים מרוכבים.

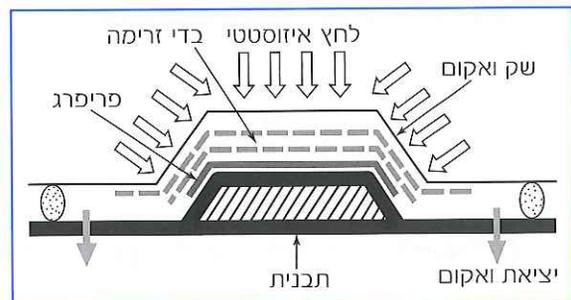
מזריקים את השרף פנימה לתוך התבנית עם האריג, כך שהשרף נספג בין הסיבים ליצירת המוצר המוגמר לאחר ההקשיה. תהליך זה מתאים במיוחד לייצור מוצרים סדרתיים. גם בתהליך זה מעורבים ואקום, לחץ וטמפרטורה כפונקציה של זמן, אם כי הוא מופעל כך, שהנדיפים יוצאים במישור בלבד ולא בצורה מרחבית כמו באוטוקלב. בתהליך עבודה זה חומר הגלם הוא אריג, או אריג צורתי (Preform) במספר שכבות כנדרש, והשרף הנוזלי מגיע בנפרד. החיסרון בתהליך ה-RTM הוא העלות הגבוהה של הכלים כיוון שנדרשת תבנית זכר-נקבה מתאימה ואמצעי חימום. כמו כן נדרש ציוד הזרקה המתאים לשרף הכולל גם כן אמצעי חימום



תמונה מס' 7: תהליך RTM

תהליכי ייצור

תהליך הכבישה באוטוקלב הוא תהליך הייצור המיטבי של חלקים מבניים לקבלת תכונותיהם המקסימליות של חומרים מרוכבים. חומר הגלם במקרה זה הוא הפריפרג: סיבים חד כיווניים או ארוגים המוספגים בשרף. בתהליך זה משולבים ואקום, לחץ וטמפרטורה בזמנית כפונקציה של זמן. לפיכך ניתן לשלוט ולכוון את הפרמטרים הנ"ל באופן כזה שפילמור השרף יתבצע בצורה אופטימלית מבחינת הוצאת נדיפים ותזמון הפרמטרים בצמיגויות המתאימות, בכל שלב משלבי תהליך ההקשיה.



תמונה מס' 6: תהליך כבישה באוטוקלב.

בתהליך ה-RTM (Resin Transfer Molding) מניחים את אריג הסיבים בתוך תבנית צורתית, ולאחר סגירתה



תמונה מס' 9: טורבינת רוח בעלת להבים עד אורך 70 מטר מחומרים מרוכבים על בסיס סיבי זכוכית.

כבר ברובם מחומרים אלו, בדרך כלל על בסיס פחמן אפוקסי. בתחום הימאות זה שנים לא מעטות מייצרים סירות, גלשנים ויאכטות על טהרת החומרים המרוכבים, רובם על בסיס זכוכית פוליאסטר או אפוקסי. גם בתחום ההנדסה האזרחית קיימת כניסה מסיבית של חומרים מרוכבים, בשטח הקונסטרוקציות, צינורות, גשרים ועוד. אותו כיוון קיים גם בתחום המכוניות והרכבות. החומרים המרוכבים מקנים לכל מוצר יתרון שולי מיוחד, אשר חומרים אחרים מתקשים לספק, הן בתכונות חוזק ולאו קשיחות במקומות הנדרשים והן במשקל הנמוך. בנוסף לכך בטכנולוגיות ייצור מתקדמות מתקבלת גם הורדה בעלויות.

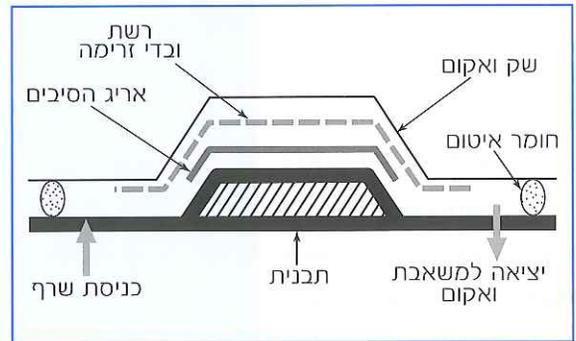
על פי כל התחזיות כבר בעתיד הלא רחוק ילך ויגבר בצורה משמעותית השימוש בחומרים מרוכבים בתחומים רבים, תוך כדי שילוב בין החומרים המרוכבים הקיימים לבין אלה שיפותחו בעתיד.

מקורות

1. Engineered Materials Handbook vol. 1 Composites , ASM international.
2. Reinforced Plastics , vol. 48, 49, ISSN, Elsevier.
3. Modern Plastic Encyclopedia , Mc Graw Hill.

למכל הערבוב ולצנרת. לפיכך עלות הייצור של חלקים יחידים תהיה גבוהה מאוד (עלות תבנית עלולה להגיע למאות אלפי דולרים).

בתהליך LRI מניחים את אריג הסיבים על תבנית צורתית וסוגרים מעליו שק ואקום המכיל סידור שק ואקום המתאים לתהליך זה. מצד אחד מחברים מכל שרף ומצד שני מושכים ואקום עד שהשרף נספג וממלא את האריג. בתהליך זה הפרמטרים המעורבים הם רק ואקום וטמפרטורה כתלות בזמן, ללא הפעלת לחץ. לכן התכונות המתקבלות במוצר שנכבש ב-LRI נמוכות יותר בהשוואה לתכונות של מוצרים הנכבשים בתהליכי כבישה באוטוקלב וב-RTM. לפיכך בתהליך זה יש להשקיע בפיתוח על מנת לקבל את התכונות הטובות ביותר ולאפיין אותן. גם בתהליך עבודה זה חומר הגלם הוא אריג, או אריג צורתית (Preform), והשרף הנוזלי מגיע בנפרד. היתרון בתהליך LRI הוא העלות הנמוכה של ייצור החלקים עקב תבנית פשוטה יחסית, ללא צורך במכשיר הזרקת שרף או אוטוקלב.



תמונה מס' 8: תהליך LRI

סיכום

חומרים מרוכבים שהתחילו את דרכם ההנדסית דווקא בעולם התעופה, התפתחו גם לכיוונים רבים אחרים, כך שכיום בכל שטח מבני-הנדסה, חומרים אלו תופסים נתח נכבד מתכולת החומרים בכל תחום. בתחום התעופתי כבר היום כ-50% ממשקלו של מטוס הנוסעים החדש של בואינג ה-787 בנוי מחומרים מרוכבים. מטוסי קרב חדישים או מטוסים-ללא טייס מתקדמים בנויים