

פרק א' חתוך וכרסום חלקי CFRP



מבוא

החומרים המרוכבים FRP (Fiber Reinforce Polymer) הופכים היום יותר ויותר פופולריים לשינושים בייצור חלקים למספר גדול של תעשיות. התעשייה עם ההשפעה הגדולה ביותר היא תעשיית האיירוספייס. לדוגמא, ה B787 שטס לראשונה ב 2009 הציג עליית מדרגה של 50% בשימוש של חו"מ כחומר סטרקטורלי במבנים ראשיים. הסיבה העיקרית שתעשיית האיירוספייס עוברת בהדרגה מחומרים מתכתיים לשימוש בחו"מ נעוצה בעובדה שמחו"מ ניתן להשיג תכנון יותר אגרסיבי של יחסי משקל חוזק, חוזק גבוהה יותר אבסולוטית והתנגדות מעולה לקורוזיה.

CFRP ו GFRP הם שני FRP's המשמשים במבנים תעופתיים. המאמר הזה יתמקד בכרסום של CFRP. בגדול, ניתן לומר שכרסום חומרים מרוכבים שונה מאד מכרסום של חומרים הומוגניים כמו מתכות, למרות העובדה שתאורטית וטכנולוגית משתמשים לכרסום שניהם במכונות של מתכות. למרות שחלקי חו"מ מיוצרים בדרך כלל לצורת קצה כמעט סופית (NEAR END) לא ניתן להמנע מביצוע תהליכי עיבוד סופי. חיתוך/ כרסום וקידוח / קידוד שקעים לקשיחים הם פעולות חובה בתהליכי עיבוד שמבוצעים תמיד בגמר התהליך על מנת להשיג את המידות המדוייקות. תהליכים אלו חיוניים בהשגת מוצרים (פנלים איכותיים) עם קצוות סופיים וחורי חיבור קשיחים על פי המפרטים.

המיוחדות בתכונות החו"מ כמו הטרוגניות אניסוטרופית (גיוון תכונות כיווניות) והאינטארקציה עם כלי החיתוך במהלך הכרסום הם מצב מורכב להבנה. הכרסום עלול לגרום לנזק או פגם לחלקים, מה שנקרא הפרדת שכבות או דלמינציה, שבר במטריצה, מריחת המטריצה, סיבים לא חתוכים, סיבים שלופים ומטריצות חרוכות. האופי השוחק של הסיבים והדרישה לחתוך אותם למידה סופית מייצרים את המצב המתגבר יותר של כרסום חו"מ יחסית לכרסום מתכות. לכן, להבטיח את כרסום האיכות האופטימלית ביותר של הפריט, נדרשים כלים שנבחרו מהחומרים המתאימים ביותר ותוכנו בגיאומטריות האופטימליות בהתאמה. אי לכך, יש מגוון חומרים וגיאומטריות לכלי חיתוך העונים לדרישה. הסיבה העיקרית למיוחדות זו בכלים הם

פרק א' חתוך וכרסום חלקי CFRP

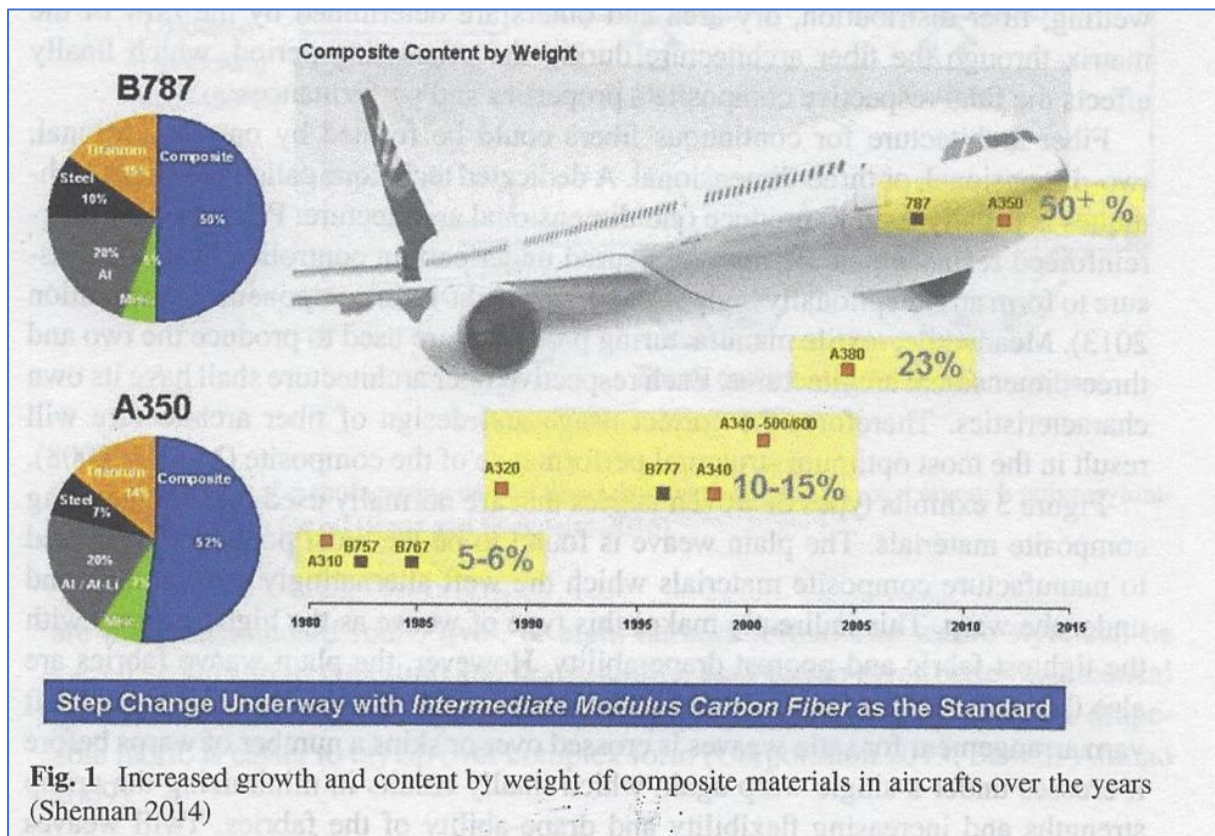
התכונות המיוחדות של חו"מ שנגזרות מגיוון המטריצות, חומרי החיזוק, צורת ושיטות הליווח להכנת החומר המרוכב.

מבט על CFRP

סוגי סיבים

יש מספר דרכים להכנת סיבי פחמן מהמבשר הפולימרי כלומר, תאית, זפת, פוליונילכלוריד ופוליאקרילוניטריל (PAN). מביניהם ה PAN הוא הפופולרי ביותר בין התעשיות היום. PAN המבוסס על סיבי פחמן הוא בעל חוזק גבוהה ותכונות מודל מעולות בהשוואה לאחרים. בתרשים 1 נראית המחשה של תפוצת ה PAN

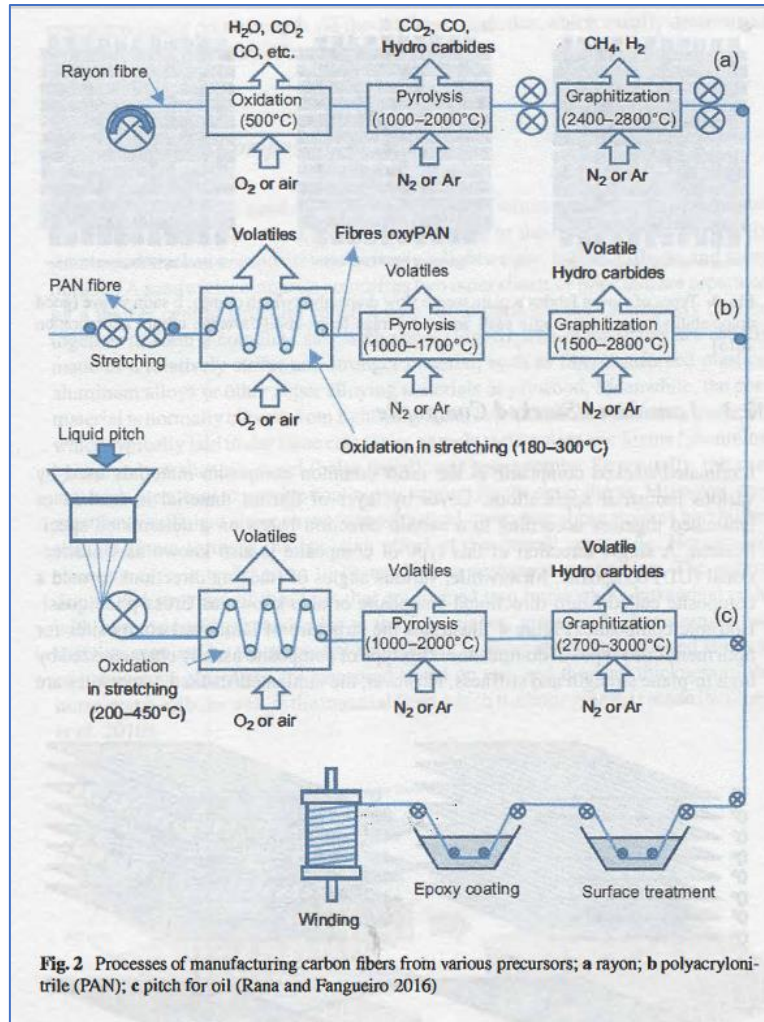
סיבי פחמן משמשים בעיקר בתעשיות האיירוספייס בגלל יחס המודול לצפיפות היוצא מהכלל שלהם. מלבד כך, גם יחס חוזק לצפיפות הוא גבוהה במיוחד. בין יתרונותיהם האחרים של סיב הפחמן ניתן למצוא: מוליכות חשמלית, מוליכות תרמית גבוהה ומקדם נמוך של התפשטות תרמית. מכל מקום, המוליכות החשמלית הגבוהה יוצרת בעיה כאשר מעבדים אותם. אבק וחלקיקי פחמן הנוצרים בתהליך העיבוד (כרסום/



פרק א' חתוך וכרסום חלקי CFRP

קידוח (יכולים לגרום לקצרים חשמליים במנועים חשמליים והתקנים אחרים. אי לכך ציוד ומכונות שמעבדות חו"מ על בסיס פחמן תהיינה מוגנות בהתאם.

תרשים 2 מטה מדגים תהליך ייצור של סיבי פחמן ממקורות שונים :



בנמצא מספר סוגי CFRP's שממוינים על בסיס המודול וחוזק הקריעה :

UHM – מעוות גבוהה מ 500 Gpa

HM – גבוהה מ 300 Gpa

IM – עד 300 Gpa

LM – עד 100 Gpa

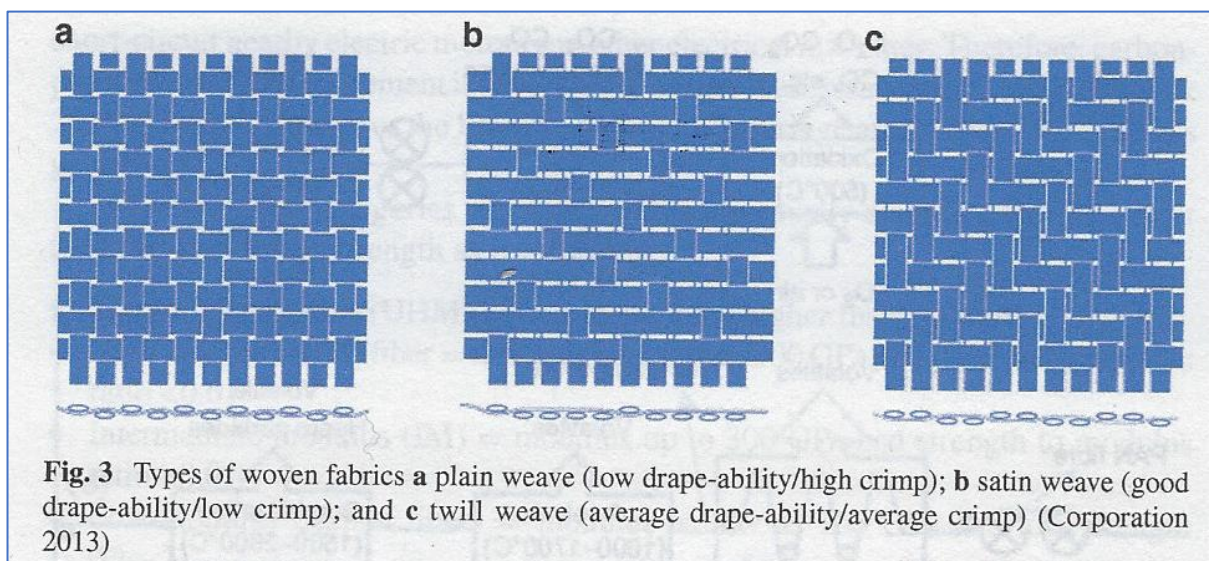
פרק א' חתוך וכרום חלקי CFRP



ארכיטקטורת הסיב

הארכיטקטורה מיוחסת לסידור הסיבים במוצר המורכב. סידור זה קובע למעשה את תכונות הקומפוזיציה כמכלול, כמו גם התהליכים המתאימים הכרוכים בכך. כיוון הסיבים / כיוון הערמתם, הרצף שלהם, ההמשכיות, התכווצותם והשתלבותם אחד בשני הם בעצם המאפיינים הארכיטקטונים שבדרך כלל משפיעים על תכונות החומר המוגמר בכל הקומפוזיציות (חו"מ). הרטבת הסיבים, חלוקתם, שטחם היבש ועוד שנקבעים במהלך זרימת המטריצה - משפיעים בסופו של דבר על התכונות והביצועים.

ארכיטקטורת הסיבים הרציפים מתרחשת בחד, דו ותלת ממד. טכניקת הפריפרג משמשת ליצירת ארכיטקטורת סיבים חד מימדית. הפריפרג הם סיבים מחוזקים בשרף שבדרך כלל עוברים CURING תחת בקרת טפרטורה ולחץ ליצירת חלקים ביחס משקל לחוזק יוצא מהכלל. בינתיים, תהליך טקסטילי משמש ליצירת ארכיטקטורה דו ותלת ממדית. לכל ארכיטקטורת סיב יש את המאפיינים שלה. לכן, השימוש והתכן של ארכיטקטורת סיב מתבטא בביצועי המבנה האופטימלי של החו"מ. בתרשים 3 מוצגים סוגי בדים ארוגים שמשמשים בדרך כלל בייצור של חו"מ. האריגה הפשוטה היא הפופולרית ביותר לייצור חו"מ כאשר שילוב הערב חוצה לסירוגין מעל ומתחת לקיפול. זה הופך את סוג האריגה הזה באופן לא ישיר בעל הכיוון הגבוה ביותר עם הבד



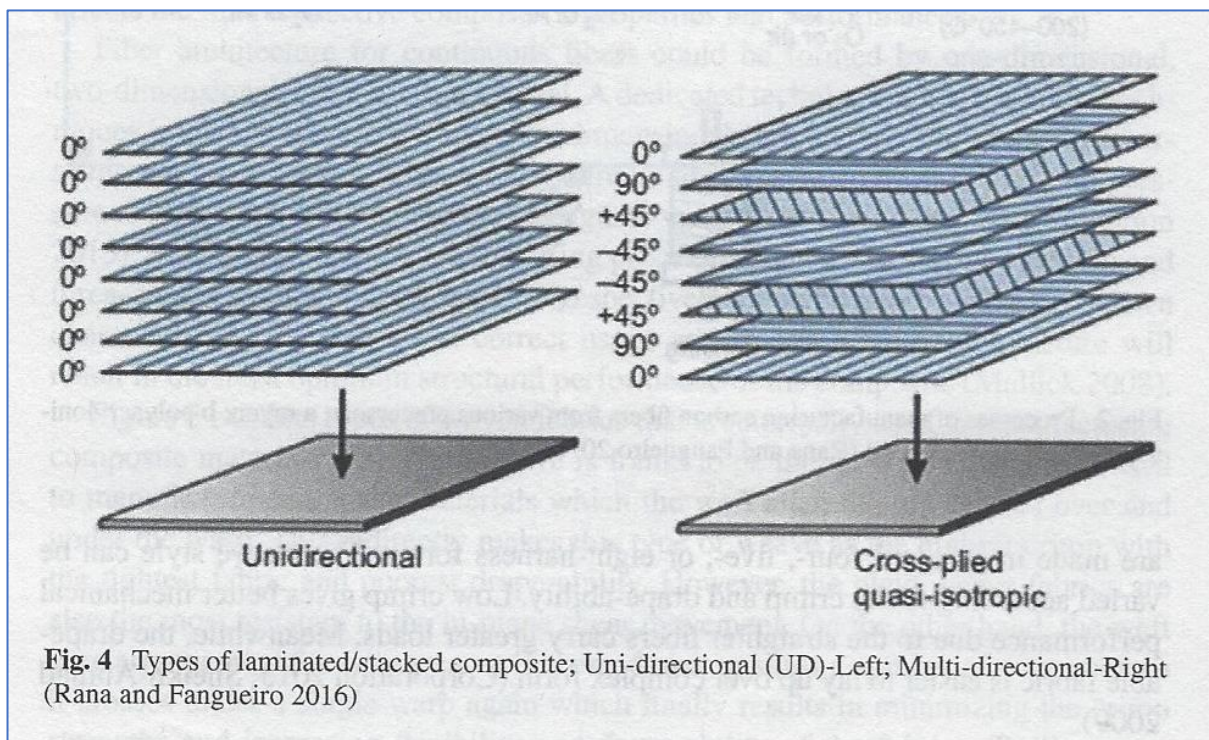
המתוח ביותר ויכולת קיפול גרועה ביותר.

פרק א' חתוך וכרסום חלקי CFRP

מכל מקום, בדי האריג הפשוט הם העמידים ביותר לתנועות גזירה. מצד שני, סידור חוט הערב לשזירת סאטן חוצה או מדלג על מספר הקשחות (WRAPS) לפני שהוא חוצה שוב מתחת, מה שבסופו של דבר מביא למזעור חוזק ה-CRIMP והגברת הגמישות ויכולת הקיפול של הבד. חיבור מלוכסן של אריגים נעשה ב-4,5 או 8 צמות. סגנון האריגים יכול להשתנות בהתאם ליכולת ה-CRIMP והקיפול. CRIMP נמוך נותן תכונות מכניות טובות יותר תודות לסיבים הישרים הנושאים בעומס גבוה יותר. כך, שאריג בעל יכולת קיפול נוח יותר לליווח בתצורה מורכבת.

למינציה / הערמת שכבות

למינציה והערמת שכבות חו"מ היא טכניקה המשמשת באפליקציות תעשיתיות. שכבה על גבי שכבה של חומרים סיביים נערמות יחדיו בכיוון מסוים כאשר הכל מתבצע בהתאם למפרטים מדויקים. ליווח בכיוון אחד של סוג כזה של חו"מ נקרא UD (Unidirectional). בינתיים ההערמה/ ליווח בזוויות שונות המיצרים מטריצת חו"מ הנקראת רב כיוונית (Multi directional) והידועים גם כשכבות צולבות איזוטרופיות. תרשים 4 מדגים את התמונה של למינציות חו"מ לשתי התצורות שהזכרנו.

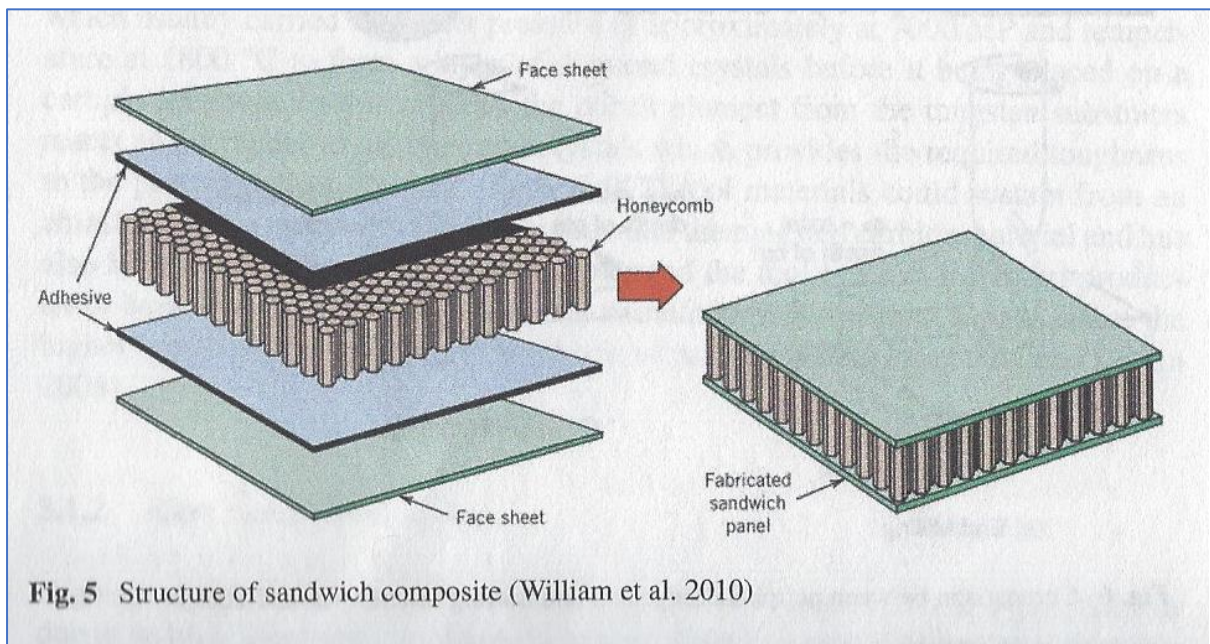


פרק א' חתוך וכרסום חלקי CFRP

הסוג הזה של חו"מ מאופיין בדרך כלל בחוזק וקשיחות גבוהים. מכל מקום החו"מ הנערמים בשכבות נחשבים בעלי חוזק דל למדי לכיווניות העובי שנקבע בדרך כלל ע"י בדיקת עיצוב.

חו"מ כסנדוויץ

חו"מ בתצורת סנדביץ מקותלגים ברמת מבנה סטרקטורלי גבוהה יותר. היתרון העיקרי של סוג זה של חו"מ בהשוואה ללמינטים ו Stacks מתבטא במשקלם הנמוך, קשיחותם הגבוהה ועמידותם. הסנדביץ בנוי משני מעטים חיצוניים (מתכת או חו"מ) החוסמים את הליבה Core הסטרקטורלית והעבה. כאשר מדביקים הכל יחדיו נוצר פנל הסנדוויץ (תרשים 5).



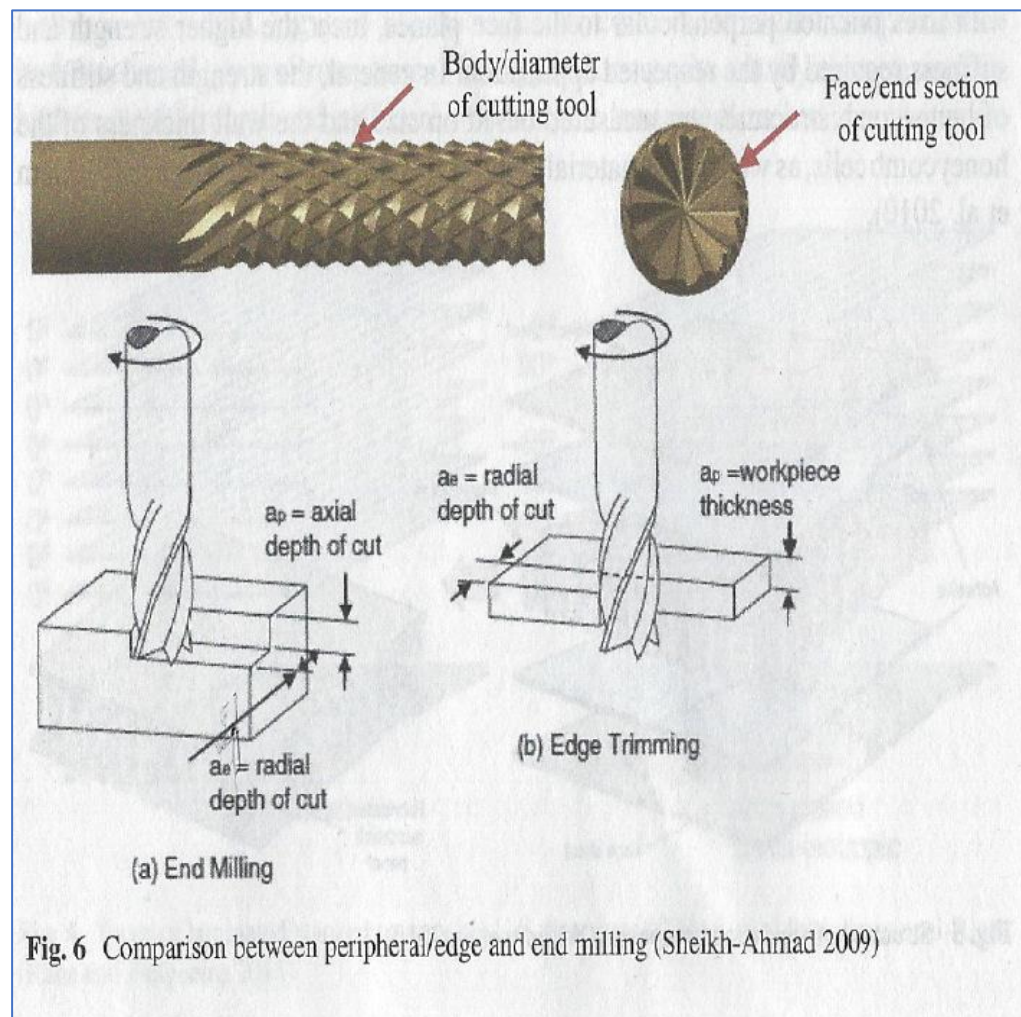
המעטה החיצוני עשוי בדרך כלל מחומר קשה וקשיח יותר כמו FRP , נתך אלומיניום, או סופר סגסוגת אחרת לעיתים אפילו עץ סנדוויץ. חומר הליבה נבחר מאלמנט קל משקל עם מודול אלסטיות נמוך כמו קצף פולימרי קשיח (פנוליק, אפוקסי, פוליאוריתן), עץ בלזה או כוורת דבש. מבחינה מבנית חומרי הליבה אמורים לספק תמיכה רציפה למעטים החיצוניים. יותר מכך, נדרש מהם חוזק גזירה מספיק לעמוד בעומסי גזירה רוחביים וקשיחות גזירה גבוהה יותר על מנת להתנגד לקריסה של

פרק א' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המבנה. ליבת חלת דבש מבנית ידועה ומקובלת מאד באיירספייס (גם רוהסל).
 התכנון המיוחד של מבנה FOILS דקים שנוצר לתאים משושים שלובים זה בזה עם
 צירים מכוונים בניצב למישור הפנים נותנים חוזק וקשיחות הנדרשים מהאפליקציה.
 בכללי, החוזק והקשיחות של מבני חלת דבש נמדדים בהתבסס על מידה ועובי דופן
 של תאי חלת הדבש וסוג החומר ממנו היא עשויה.

חתוך / כרסום של CFRP

תהליך כרסום מוגדר כתהליך להורדת חומר על ידי סיבוב כרסום בעל להב חיתוך
 אחת לפחות. בנמצא שתי טכניקות כרסום ל FRP הידועות ככרסום פריפריאלי או
 כרסום צד (Side milling) כמו גם End Milling. הכרסומים הללו מיוחסים לתנאי
 חיתוך שמנצלות את גוף / קוטר הכרסום. מינוח נוסף לפעולה זו הוא / Trimming
 Routing. ה End milling מיוחס תמיד לתהליך כרסום Face או End של הכרסום.
 תרשים 6 מבדיל בין תהליכי הכרסום



פרק א' חתוך וכרסום חלקי CFRP



חומרי כלי חיתוך

השוק היום מאתגר במגוון רחב של כלים מחומרים שונים לחיתוך חו"מ. החומרים הללו מקוטלגים לשלוש קטיגוריות: קושי, קשיחות ומכלול החוזק. קושי וקשיחות הם שתי הקטיגוריות המובילות בבחירת חומר מתאים לכלי כרסום. תאורטית, לכלי כרסום אמורות להיות תכונות קשיות טובות יותר מהחלק המיועד לעיבוד כדי לאפשר לתופעת החיתוך או הגזירה להתרחש ביעילות.

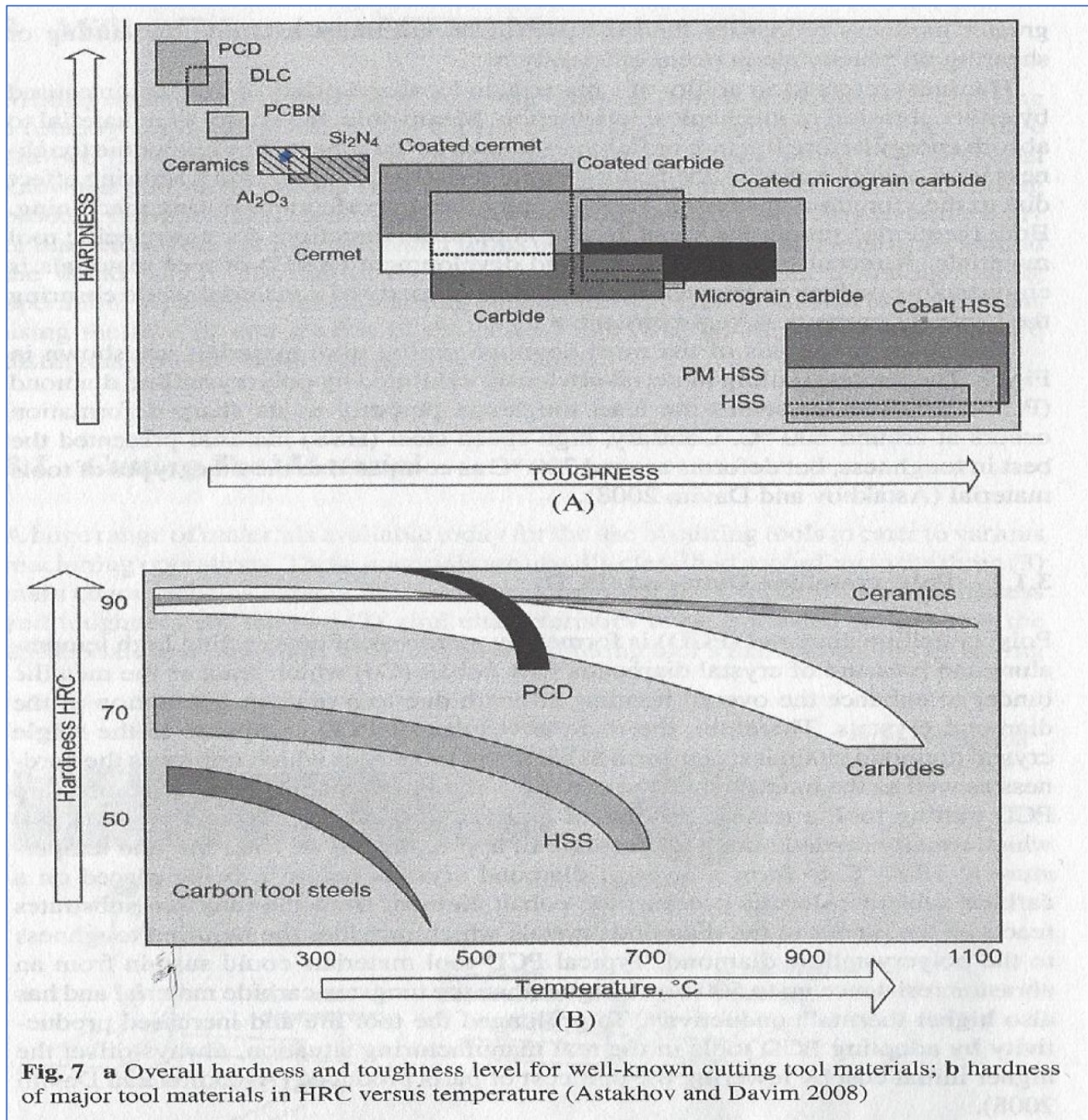


Fig. 7 a Overall hardness and toughness level for well-known cutting tool materials; **b** hardness of major tool materials in HRC versus temperature (Astakhov and Davim 2008)

פרק א' חתוך וכרסום חלקי CFRP



הקושי מתייחס ליכולת המוצר למקם את הדפורמציה הפלסטית הנגרמת ע"י שחיקה או הזחה (Indentation). יכולת החומר לספוג אנרגיה לפני השבירה או הכשל ידועה כקשיחות. ככל שקשיחות החומר עולה הוא מתנגד טוב יותר לשבר במהלך כרסום שמתאפיין בדרך כלל ברעידות, תיקתוקים, Runouts ופגמים אחרים במהלך הכרסום. שתי התכונות המוזכרות משתנות לכוונים מנוגדים לכל חומר ספציפי של כלי. המגמה הנפוצה לאחרונה במחקר ופיתוח של חומרי הכלי שמה דגשים על איך לשפר את תכונות הקשיחות של החומר תוך הבטחת תכונות הקושי כקבוע.

התכונות העיקריות בחומרים של כלי חיתוך הנפוצים ניתן לראות בתרשים 7. חומרי הכלים הקשים מוצגים ע"י כלי יהלום פוליקריסטליין (PCD). הקשיחות הכי פחותה כאשר מתרחשת דפורמציה חריפה בסביבות 600°C בניגוד לכלי HSS המקבלים דפורמציה בסביבות 700°C .

כלי PCD

כלי PCD מיוצרים בתהליך דחיסה בלחץ וטמפרטורה גבוהים של גביש יהלום עם קובלט המגיב ככורך מתכתי ומגביר את חוזק החיבור עקב אוריאנטציה אקראית של גביש היהלום. לכן, היתרון העיקרי של PCD בהשוואה לשרשרת יהלום על קריסטל יחיד הוא באחידות התכונות המכניות המשפרים את הקושי כמו גם את הקשיחות של החומר. ייצור כלי PCD הוא תהליך ערבוב של גרפיט וזרז (בדרך כלל ניקל) המתבצע תחת לחץ MP 7000 ובטמפרטורה של 1800°C על מנת לייצור שכבות קריסטלים של יהלום לפני שמחברים אותם לגוף הקרבייד. בתהליך זה אלמנט הקובלט ממצע הטונגסטן מגיב ככורך לגבישי היהלום המספקים את הקשיחות. כלי PCD טיפוסיים עמידים יותר בשחיקה פי 500 מחומרי הטונגסטן קרבייד וגם המוליכות התרמית שלהם גבוהה יותר. למדוד את אורך חיי הכלי בייצור האמיתי אנחנו צריכים לבצע פעולת חשבון פשוטה של הפחתת מחירו הגבוהה של הכלי ממחירו הסופי של המוצר.

פרק א' חתוך וכרסום חלקי CFRP

כלי HSS

כלים מחומרים אלו נחשבים לפופולריים ביותר בגלל הקשיחות שלהם בהשוואה לחומרי הכלים האחרים כמו גם החוזק הסביר והקושי שיכול להגיע עד 68 HRC. בגלל תכונות אלו HSS ניתן לאימוץ לגיאומטריות של מירב כלי החיתוך; כלים סליליים, חלזוניים וכו'. קבוצה זו של חומרים מאפשרת שימוש חוזר אחרי שהתבלו. זה משהו שמספק חסכון בעלויות ומקובל מאד בתעשייה. במונחי עלות HSS נחשב ליותר כלכלי בהשוואה לחומרים האחרים תודות לתהליך הייצור של החומר שנמצא בשימוש כבר דורות רבים מאד. מכל מקום, החסרון המשמעותי של HSS בשיבוב היא חוסר היכולת שלו לשמור על קושי בטמפרטורה גבוהה (Austenitic transformation temperature). בנוסף, לקושי הנמוך והחוזק הבינוני של קבוצת הזו HSS לא מתאים לכרסום חומרים אברזיביים כמו FRP ובמיוחד CFRP. למרות הכל ה HSS ידוע ומקובל לקידוח FRP.

קרבייד מוצק (cemented carbide)

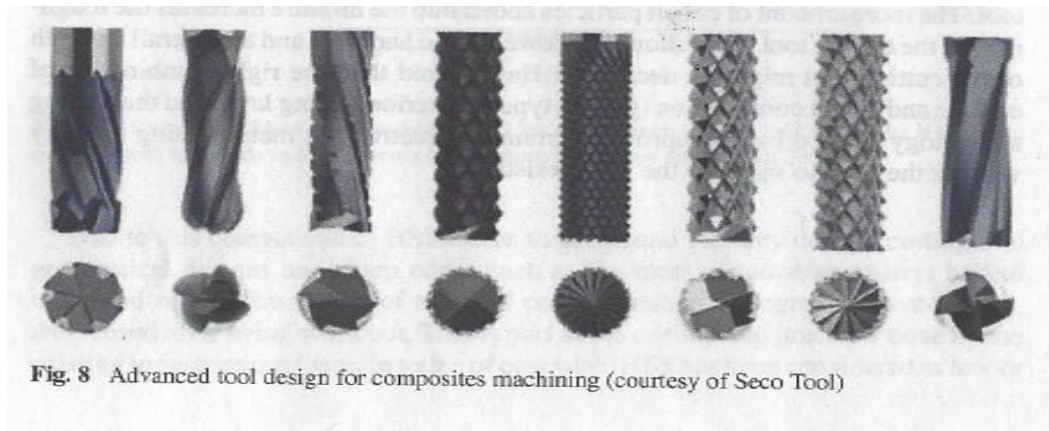
כלים אלו ידועים בהתנגדות המצויינת לשחיקה והקושי הגבוהה שלהם. טונגסטן קרבייד (WC) הוא החלקיק העיקרי בקבוצה של קרביידים מוצקים, לצד טיטניום, טנטלום והרכבים אחרים של חלקיקים המהווים את עמוד השדרה למשפחה זו של חומרי כלים. הטווח של גודל החלקיקים לייצור סימות חיתוך נע בין 0.8 מיקרון לגרעיני מיקרו 0.8-1.0 לגרעינים מעודנים ו 1.0-4.0 מיקרון לגרעינים בינוניים ויותר מ 4.0 מיקרון לגרעינים גסים. כורך הקובלט של כל התרכובת בקרבייד המוצק הוא בעל תפקיד משמעותי ביצירת התכונות. כמות הקובלט בדרך כלל בין 20%-3% כתלות בקשיחות והקושי הנדרשים לאפליקציה שמעבדים. תהליך דחיסה קרה של אבקת קרבייד לכורך הקובלט מנוצל לייצור גלמי קרבייד בחישול ל – Near net shape. תהליך הסנטור מתבצע על הגלמים בטמפרטורות 1350-1650 צל". בטמפרטורה זו מותך הכורך ויוצר באופן לא ישיר ראקציית הדבקה בין המתכת הכורך וחלקיקי הקרבייד. הקושי של קרבייד מוצק מושג בסיסית באמצעות פזת הקרבייד הקשה, כאשר התכת הכורך מספקת את הקשיחות הנדרשת. כפי שכבר הזכרנו, תכולת קובלט קובעת את הקשיחות הסופית של כלי החיתוך. ככל שיש יותר חלקיקי קובלט בתערובת עולה הקשיחות באופן יחסי. מכל מקום, הקושי והחוזק הכללי של כלי

פרק א' חתוך וכרסום חלקי CFRP

החיתוך דווקא יקטן. ההרכב הנכון של קרבייד וקובלט (Grade) משפרים את היצוריות האופטימלית של הכלי מבלי לוותר על ההתנגדות לשחיקה.

סוגי כלים לכרסום CFRP

לגיאומטריית כלי החיתוך תפקיד חשוב בעיבוד שבבי, היות והיא משפיעה ישירות על יצוריות התהליך (אורך חיי הכלי והאינטגרטי / איכות המוצר). כללית, בכלי חיתוך המשמשים לכרסום /חיתוך CFRP שתי משפחות חומרים: כלים עם קצוות (סימות) PCD מסונתרים מחוברים לגוף מסוליד קרבייד. המשפחה השניה היא כרסומי אצבע או כפי שנקראים End Mill מסוליד קרבייד שניתן להשיג אותם מצופים או לא מצופים. הציפוי בדרך כלל מוסף על המשטח החיצוני של הכלי ומספק לו התנגדות מעולה לשחיקה וכמובן מאריך את אורך חייו בחישוב הכלכלי הכללי. כרסומי האצבע מסוליד קרבייד מתחלקים גם הם לשתי משפחות הפעם, גיאומטריות סליל ספירלי Helical spiral helix וכלי גיאומטריה משתלבים Interlocking . כרסומי אצבע ממשפחת הסוליד קרבייד אפשר לראות בתרשים 8 (מטה).



כלי PCD – Polycrystalline Dimond

כלי PCD הם תרכיב של שני חלקים הקצה החותך שהוא PCD והגוף אליו הוא מחובר העשוי ברב המקרים מסוליד קרבייד. לייצר את קצות חיתוך ה PCD נדרשים תהליכי ייצור מיוחדים ולא מסורתיים כמו שיבוב באמצעות לייזר או EDM שמייקרים את עלות הכלים. לאחר מכן, הקצוות מתחברים לגוף הסוליד קרבייד בתהליך בריזינג. כבר אמרנו, כלי PCD (ראה תרשים 9) יקרים בהשוואה לכלי סוליד קרבייד רגילים גם בגלל הטכנולוגיה והתהליך הנדרש לייצורם וכולל טמפרטורה ולחץ גבוהים מאד בתהליך

פרק א' חתוך וכרסום חלקי CFRP

הסנטור. למרות עלותם הגבוהה כלי PCD יכולים להיות אטרקטיביים ויהיו שווים את ההשקעה בהשוואה לכלי קרבייד בתנאי עיבוד מסוימים ובגלל התנגדותם האולטימטיבית לשחיקה.

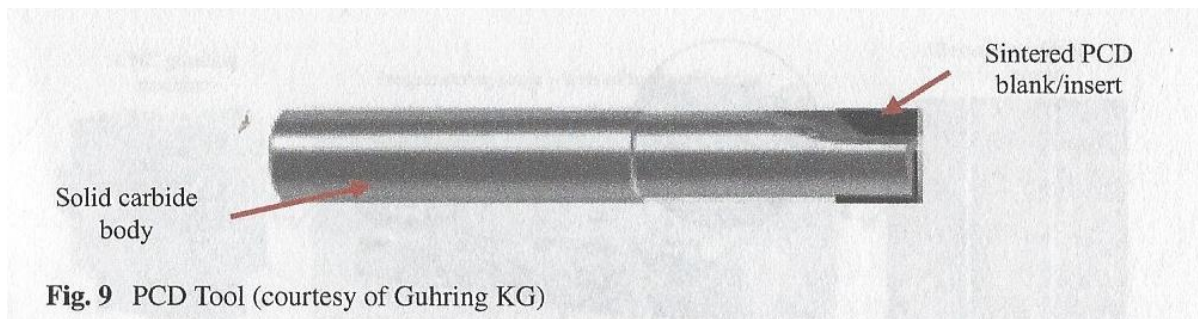


Fig. 9 PCD Tool (courtesy of Guhring KG)

כרסומי אצבע – סוליד קרבייד

אציין כאן שני סוגים של כרסומי אצבע. הראשון סוליד קרבייד (מצופה/ לא מצופה) חלזוני (helical helix) כמראה בתרשים 10.

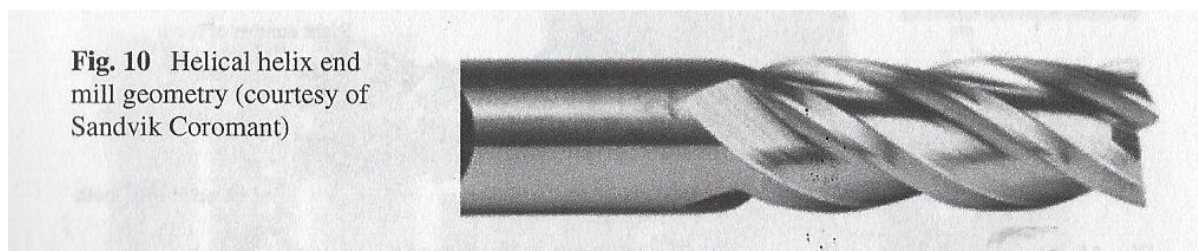


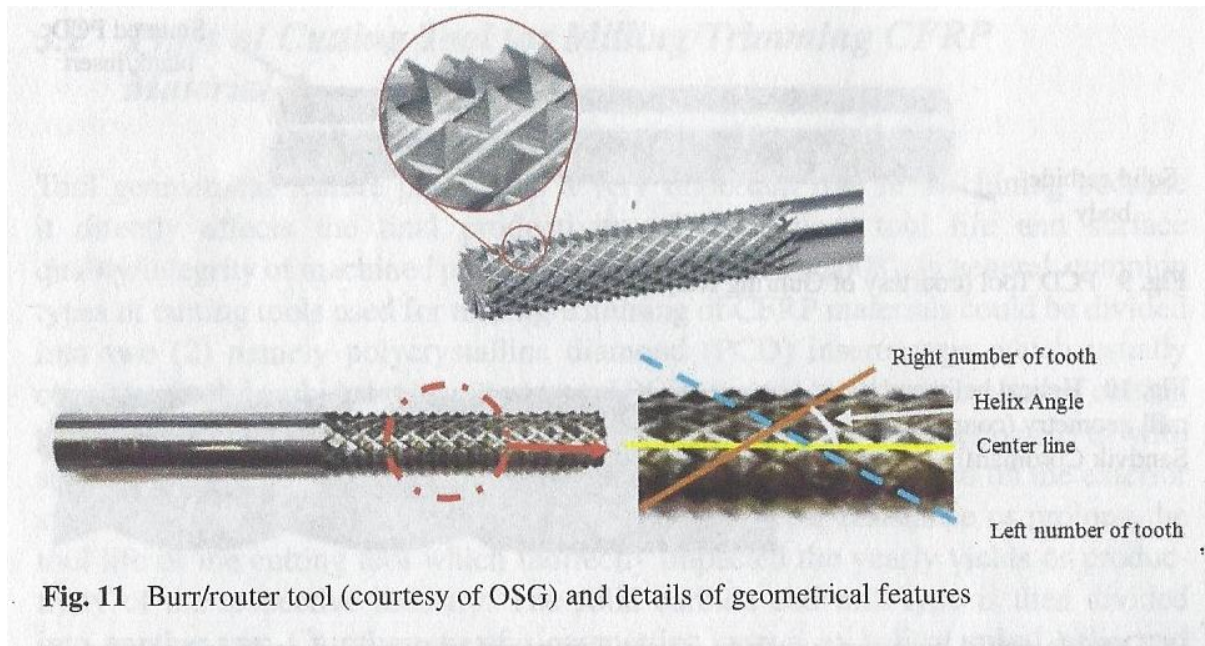
Fig. 10 Helical helix end mill geometry (courtesy of Sandvik Coromant)

הסוג הזה מאד מקובל ונפוץ בחיתוך חומרים מתכתיים. הכלים יכולים להיות עם חלזון ימני או שמאלי כתלות באפליקציה. בעולם המתכת, הכלים הללו משמשים כמעט בכל שלב של ביצועי שלבי העיבוד השבבי - כרסום גס, חצי תגמיר, גימור מלא. השיבוב של חו"מ עם הכלים הללו מתפתח כל הזמן תוך מחקר מתמשך וחיפוש תנאי חיתוך, שיטות וטכניקות אופטימליים.

הסוג השני של כרסומי האצבע סוליד קרבייד (מצופה /לא מצופה) ידוע ככרסום ריסוק (Router tool , Burr). בתרמינולוגיה אחרת המקובלת יותר על החוקרים ומתייחסת לגיאומטריית כלי זהה לחו"מ הם נקראים Segmented helix או Multi-tooth. לכלים אלו בדרך כלל גיאומטריית חלזון מסולסלת ימינה או שמאלה בזוויות שונות. מספר שפות / שיני החיתוך לכל כרסום נקבעים לפי מספר החלזונות ראה תרשים 11. הסוג

פרק א' חתוך וכרסום חלקי CFRP

הזה של הכלים בשימוש רחב בתעשייה עקב עלותו היחסית נמוכה מול כלי PCD ויעילותו בחיתוך (Trimming) של חומרי FRP.



יעילותו רק משתפרת במהלך השנים בעקבות מחקרים שטיבו את הכלי תוך יצירת הגיאומטריה האופטימלית בכל הקשור לזווית החילזון ומספר שיני (שפות) החיתוך.

המשך יבוא...