

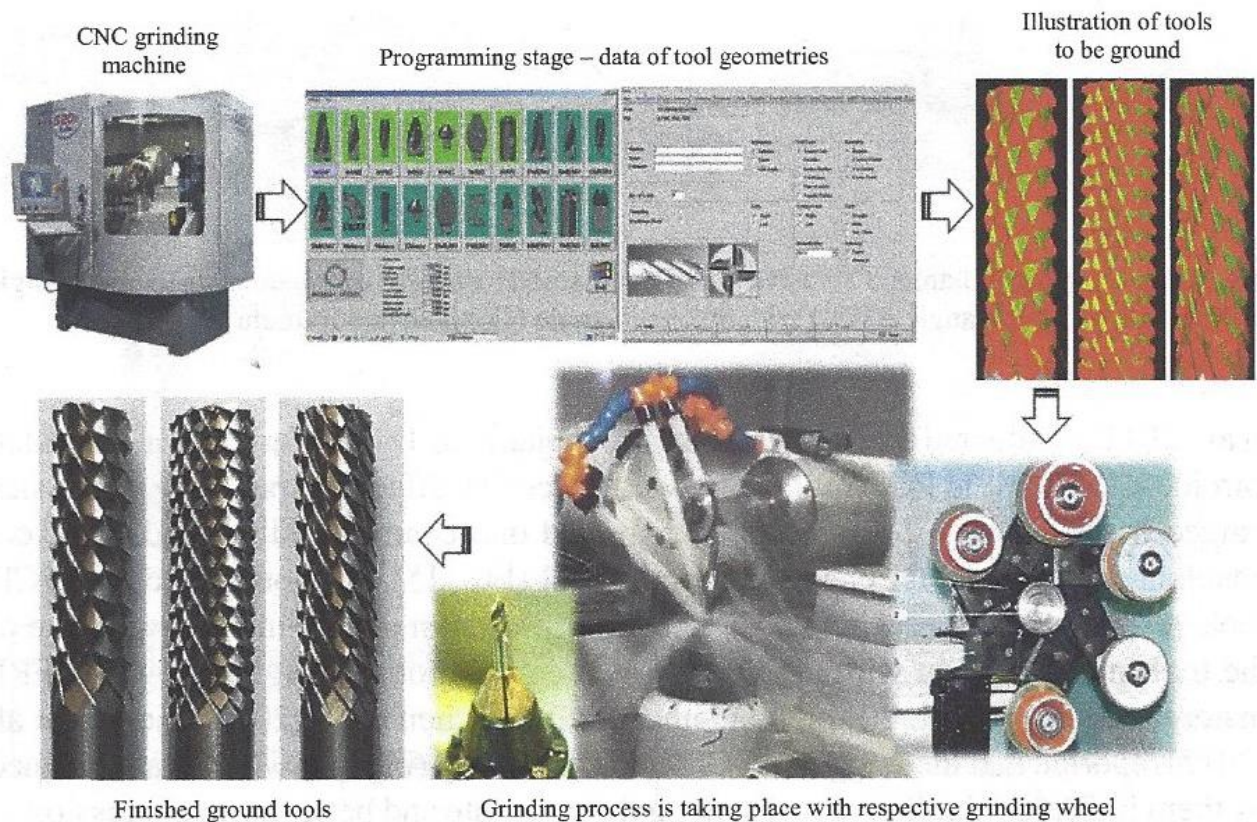
פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020

תהליך הייצור של כלי כרסום מסוליד קרביד

בתהליך ייצור כלים ממוט סוליד קרביד אנחנו משתמשים במערכי CNC לכרסום והשחזה תוך שימוש בגלגלי השחזה אברזיביים שונים. תהליך ההשחזה באמצעות גלגל או ללא מרכזים הוא חלק משמעותי מהורדת החומר. איכות של המשטח הסופי והדיוק המידתי של הכלים המושחזים מושג בעיקר מיכולתו של החומר האברזיבי ופרמטרי העיבוד בהם אנו משתמשים. בדרך כלל דיסק השחזה הוא מגרגירי יהלום היות ותכונות הקושי והחוזק שלו מצויינות בהשוואה לקרביד הטונגסטן. רק לציין, בגלגלי השחזה Cubic Boron Nitride CBN משתמשים בעיקר להשחזת כלי HSS.

התהליך – ראשית המוט נחתך לאורך הכללי הדרוש, הגיאומטריה של הכלי מתוכנתת באמצעות תוכנת SOLID המותאמת למכונה המייצרת. כל התהליך עובר סימולציה לפני תחילת הייצור לגלות ולמנוע טעויות תכנות/תכנון. תרשים 12 מסכם את התהליך של ייצור כלי באמצעות מערכת CNC.



Finished ground tools

Grinding process is taking place with respective grinding wheel

פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020

השפעת החידושים על תכנון גיאומטריות לכלים לעיבוד CFRP

התעשיות בצוותא עם חוקרים מובילים מחפשים את גיאומטריית הזהב האופטימלית לכרסום חומרי CFRP. בין החוקרים הראשונים נמנו Koplev ו Konig (1985) שביצעו ניסויים ולמדו על כרסום חו"מ. הם המליצו בזמנו על כרסומים עם ציפוי יהלום מסוג Dimond cut\burr tool לכרסום זכוכית ולסיבי פחמן וכרסום סלילי לסיבי ארמיד כמענה הטוב ביותר. החוקרים Colligan ו Ramulu (1992) ביצעו מחקר על מנת ללמוד על אפקט הדלמינציות במהלך כרסום קצה של למינטיים מגרפיט / אפוקסי, תוך שימוש בשתי גיאומטריות כלים: PCD ו Helical Helix Carbide עם אותה תצורה על זווית החלזון בשני הכלים המוזכרים (ראה תרשים 13).

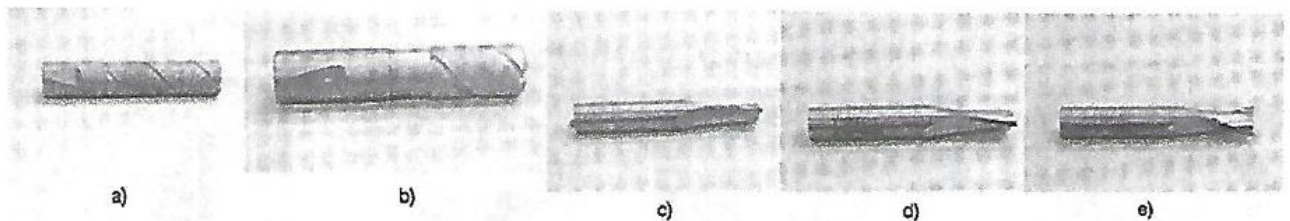


Fig. 13 a Coarse grit diamond abrasive b fine grit diamond abrasive c carbide with 10° helix angle d PCD with 10° helix angle e PCD with 30° helix angle (Colligan and Ramulu 1992)

הם גילו שדלמינציות ברובד המשטח הופיעו בשלושה אופנים מובהקים בהתאם לכיוון הסיבים. מספר שנים מאוחר יותר החוקר Wang (1995) ביצע ניסוי של השפעת כח עם מגוון אינסרטים של PCD עם גיאומטריות זווית גריפה (Rake) של 10°, 5°, 0° וזווית שחרור של 7° ו 17°. החוקר El-Hofy ערך מחקר השוואתי בשנת 2011 בין DLC Dimond- Liked Carbon מצופה קרבייד לבין כלי PCD. הוא השתמש בשלושה גודלי גרעין בטווחים 1.26-30μ שסווגו כגסים, חצי גסים ועדינים. ה Benchmark היה DLC (תרשים 15). הניסוי גילה שכלי PCD נתנו טיב שטח קביל מבלי להקריב את שיעור השחיקה של הכלי בהשוואה ל DLC במהלך של חיתוך Slots ב CFRP.

פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020

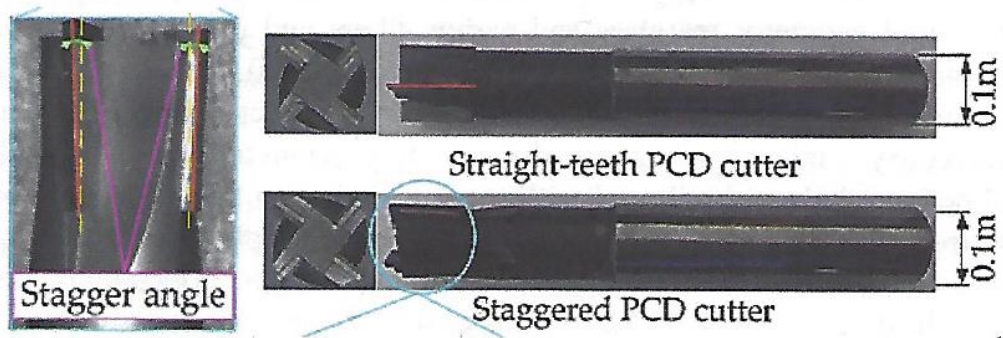


Fig. 14 Staggered PCD cutter details geometry (Chen et al. 2017)

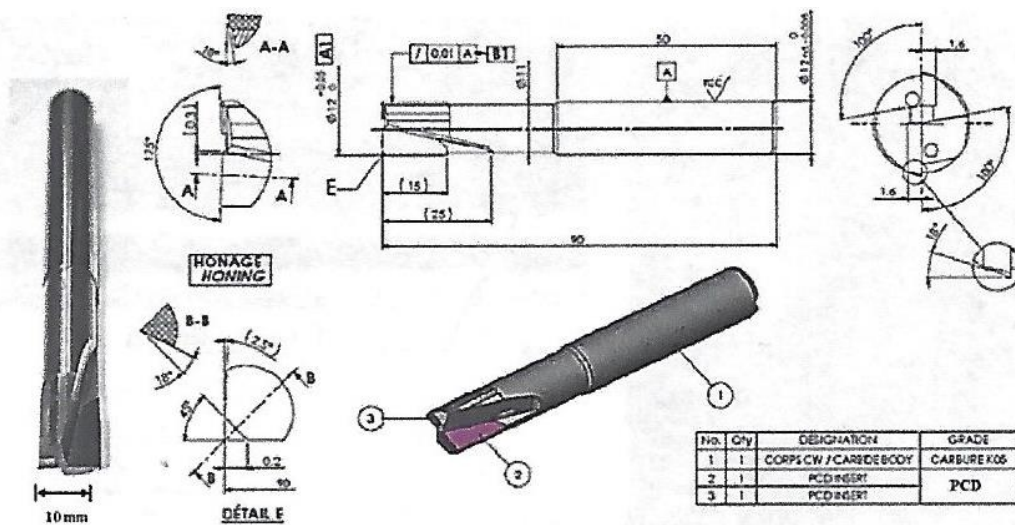
במחקר אחר של Chen et al (2017) דווח על כרסום PCD Staggered שתוכנן על ידו (ראה תרשים 14) כאשר התנגדותו ועמידותו המעולה לשחיקה ודחיקת שבבים טובה יותר בהשוואה לכרסום PCD על חילזון בזווית 0° . קצוות החיתוך של ה- PCD staggered היו עם זווית נטיה של 5° בזמן שזווית הנטיה של קצות החיתוך Staggered היו בכיוון ההפוך, לאורך ההיקף של הכלי.

החוקר Nguyen-Dinh (2020) הציע תכנון חדש של כלי PCD הידוע כבעל ארבע שפות חיתוך ישרות (4SSF) כמראה בתרשים 16, שיוצר במיוחד כמיזם משותף עם חברת ASAHI.

המטרה של התכנון החדש הייתה לסייע בהפחתת האימפקט של החלקיקים המזיקים שנוצרים בזמן כרסום חומרי CFRP שעלולים לגרום למחלות בדרכי הנשימה. נצפה שהכלי החדש הפחית משמעותית את פיזור החלקיקים באוויר.

פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020



| Element PCD grade | Reference number | Description |
|-------------------|-------------------------|--|
| Coarse (CTM-302) | Seco 28108-928 | Grain sizes varying from 2-30 μm . High abrasion resistance but relatively low chipping resistance |
| Medium (CTB-010) | Seco Reaming 28156-928* | Average grain size of $\sim 6.7 \mu\text{m}$. Good balance of abrasion and chipping resistance |
| Fine (CMX-850) | Seco 28155-928*** | Grain size of 1.26 μm , which enables fabrication of cutters with finer cutting edges and high resistance to milling forces |
| WPC-102 | Seco 0269269 | Developed for woodworking applications with multi-layered PCD structure consisting of functionally graded PCD with diamond to prevent chipping |

Fig. 15 Geometry and characteristics of PCD cutters (El-Hofy et al. 2011)

החוקרים Davim&Reis (2005) ביצעו מחקר השוואתי בין שני כרסומי אצבע / Helical Helix ובדקו את האפקט של פגיעה במשטח תוך כרסום CFRP. הכלי הראשון היה כלי דו פאתי עם זווית חלזון (helix) של 30° , זווית גריפה של $10/30^\circ$ וזווית שחרור של 9° . הכרסום השני הכיל שש פאות חיתוך ישרות או עם זווית חילזון 0° כמוראה בתרשים 17. בסופו של דבר הם גילו שהכרסום עם שתי פאות החיתוך

פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020

בגיאונטריה הנ"ל סיפק את המשטח הטוב יותר עם פחות נזק למשטח מאשר הכרסום עם שש פאות החיתוך.

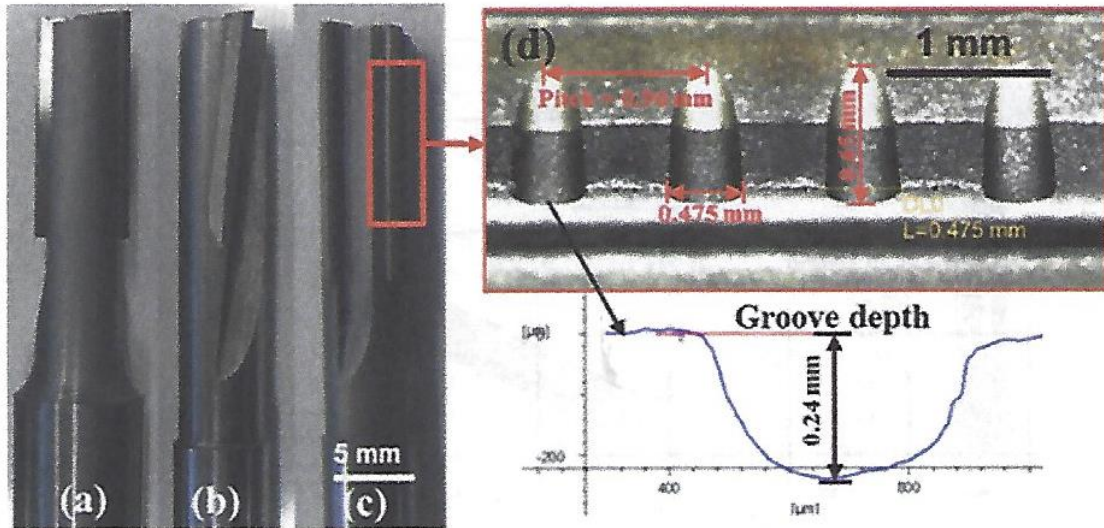


Fig. 16 a Two (2) straight-flutes (2SF), b two (2) helix-flutes (2HF), (c) four (4) serrated straight-flutes (4SSF), and d details of the grooves design of 4SSF tool (Nguyen-dinh et al. 2020)



Fig. 17 a Two-flute helical end mill (helix angle; 30°, rake angle; 10°/30°, clearance angle; 9°), b Six-flute straight /0° helix angle end mill (Davim and Reis 2005)

Uhlmann (2016) חקר אסטרטגיות בתהליך HSC לכרסום חומרי CFRP תוך שימוש בכרסום אצבע עם שמונה פאות חיתוך עשוי קרבייד טונגסטן תרשים 18.

Fig. 18 Details of cutting tools' geometry and the analyzed milling paths (Uhlmann et al. 2016)

Trimming, down-cut

Tool:
Carbide end mill
CVD-diamond coating
d = 10 mm, z = 4
Helix angle $\lambda = 0^\circ$



Up-cut face milling of circular pockets

Tool:
Carbide end mill
Uncoated
d = 8 mm, z = 8 (4)
Helix angle $\lambda = 30^\circ$



פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020

הוא גילה שהתכנון מאקרו ומיקרו כמו גם הטולרנסים ההדוקים של גיאומטריית הכלי הם המפתח האולטימטיבי להצלחת HSC. קודם לכן Hosokawa (2014) חקר את האפקט על DLC (Diamond like coating) ועל ואריאציות של זווית חלזון והגיע למסקנה שציפוי DLC אינו משמעותי כמו גיאומטריית הכלי של כרסום אצבע (Helical helix). החוקרים שקלו זווית חילזון של 60° בהשוואה ל 30° בכלי כרסום אצבע

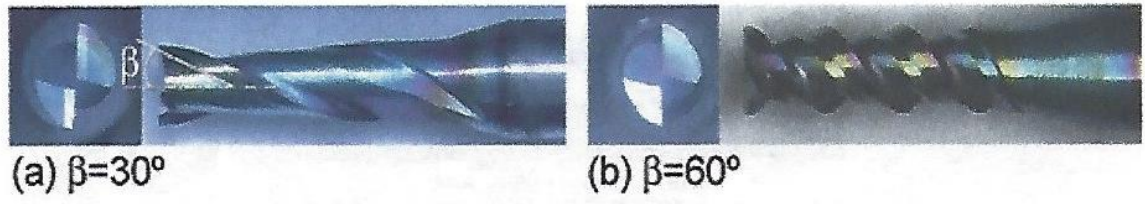


Fig. 19 DLC coated of normal and high-helix end mills with the specific helix angles (β) (Hosokawa et al. 2014)

כמראה בתרשים 19.

במחקר אחר הציג Can (2017) אנליזת טיב פני שטח בכיוונים שונים יחסית לסיבים באמצעות הממוצעים המתימטיים (RA) לכרסום ורטיקלי וכרסום משופע תוך שימוש בשלושה סוגי כרסומי אצבע (helical Helix) עם גיאומטריות שונות, מספר שונה של

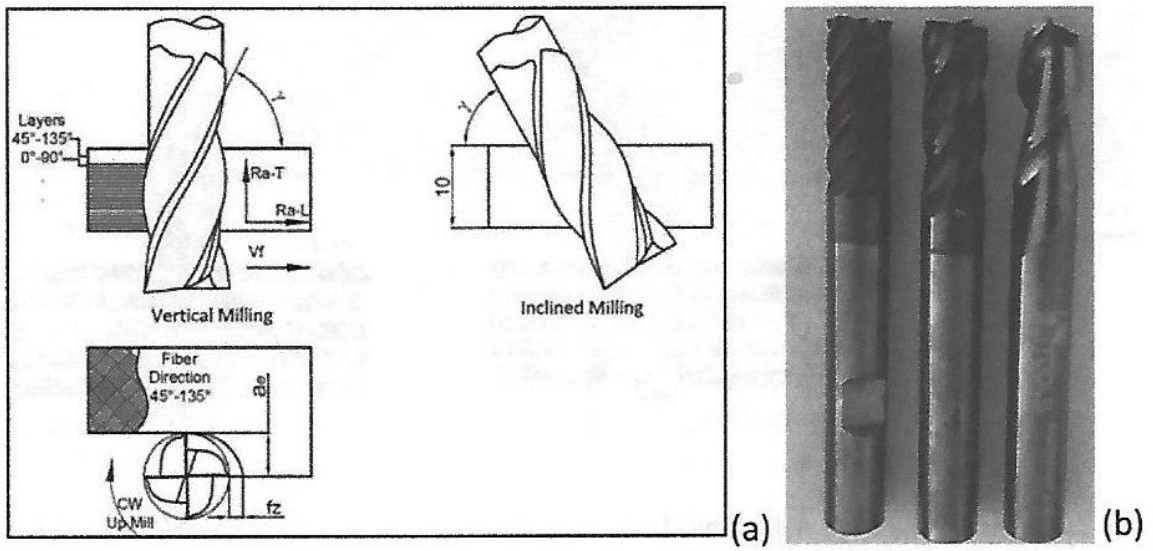


Fig. 20 a Details of vertical and incline milling positions, b 2-4-6 flutes helical helix end mill tools (Can 2017)

פאות חיתוך (2-4-6) ושיניים, תרשים 20 לחומרי CFRP.

פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020

הכרסום המשופע נתן תוצאות שטח טובות יותר מכרסום ורטיקלי בכל מצבי הכרסום. דווח גם שהגדלת כמות פאות החיתוך (או שיניים) הקטינו את הדפורמציה על קצות הכרסום. בשנת (2020) Wang הציע תכנון חדש של גיאומטריית כלי הידועה ככרסום אצבע – שמאל /ימין , בתרשים 21 , שהוכיחה את איכות השטח המכורסם בהתייחס

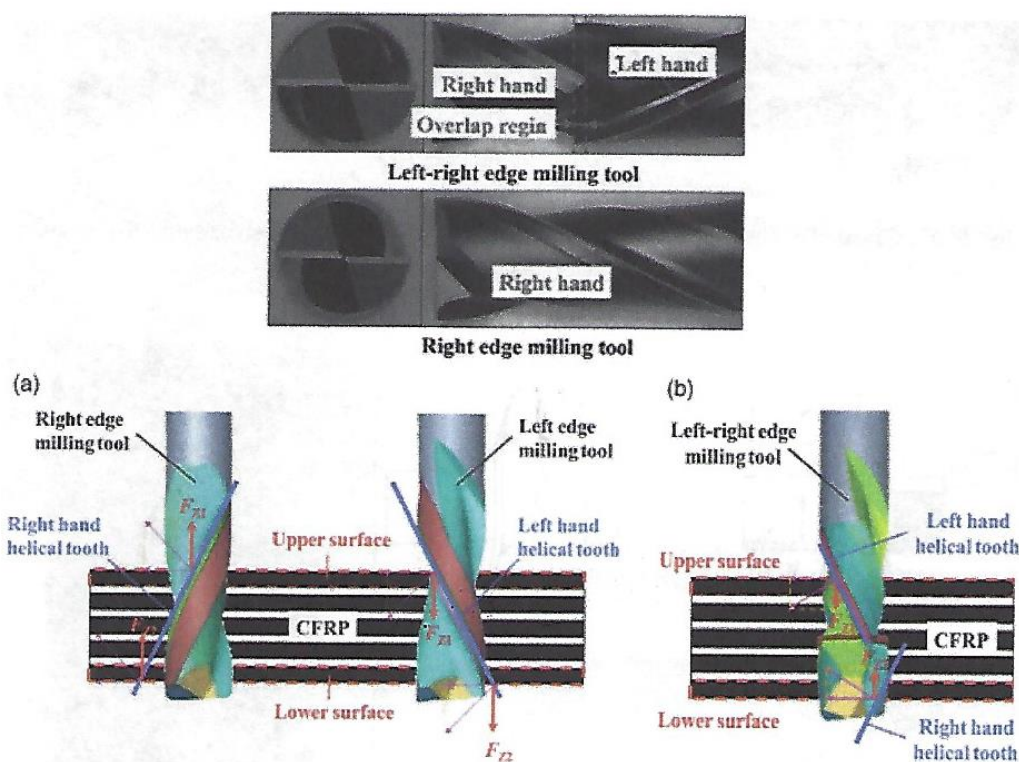


Fig. 21 a Right hand edge and left hand edge helical helix tool, b newly proposed tool; left-right edge helical helix tool (Wang et al. 2020)

בעיקר לדלמינציה בהשוואה לכרסומי אצבע עם זווית חלזון של 30° בחיתוכי עומק רדוד.

בשנת (2006) ביצע Janardhan ניסוי לבדוק את הפערים בין כרסום קונבנציונלי הידוע ככרסום עולה לכרסום מטפס הידוע ככרסום יורד (כיוון הסיבוב זהה לקדמה) על חומרי CFRP באמצעות כרסום ריסוק יהלום. הכרסום הקונבנציונלי הראה תוצאות טובות יותר ברב המקרים בכל הקשור לנזקי שטח כמו דלמינציות ואיכות טיב השטח.

פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020

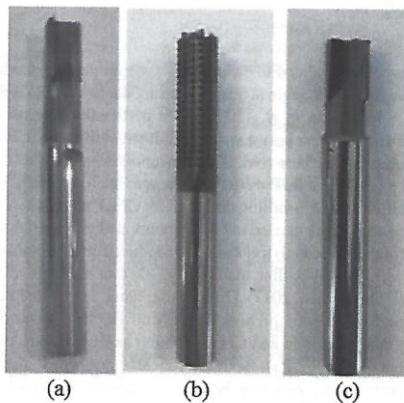
הכרסום המטפס נוטה לייצר תיקתוקים כאשר מכרסמים בקדמות גבוהות וכרסומים בעלי קוטר גדול.

הערה שלי – מחקרים אחרים הראו תוצאות מעט שונות בעיקר עם כרסומי PCD והמסקנה שהגיעו אליה ממליצה - שכרסום גס מן הראוי שיתבצע בתהליך קונבנציונלי וכרסום סופי בתהליך כרסום מטפס, ראה מטה טבלה מסכמת .

Here is a comparison of up milling and down milling in CFRP:

| Characteristic | Up milling | Down milling |
|------------------------------|--|--|
| Direction of cutter rotation | Against feed | Same as feed |
| Chip thickness | Increases gradually | Decreases gradually |
| Cutting forces | Variable | More consistent |
| Surface finish | Poorer | Better |
| Tool wear | Higher | Lower |
| Clamping force required | Higher | Lower |
| Applications | Roughing cuts, slotting, and pocketing | Finishing cuts, face milling, and contouring |

Fig. 22 a Three (3)-flutes PCD tool b 12-flutes multiple teeth/burr (CVD coated) tool c three (3)-flutes PCD tool (Duboust et al. 2017)



בעבודת מחקר שביצע Duboust (2017) הוא דיווח שכרסום מרובה שיניים (ריסוק) מצופה יהלום CVD (תרשים 22) מייצר משטח באיכות קבילה בהשוואה לכלי PCD למרות שנבדקו בתנאים של קדמה מהירה.

פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020

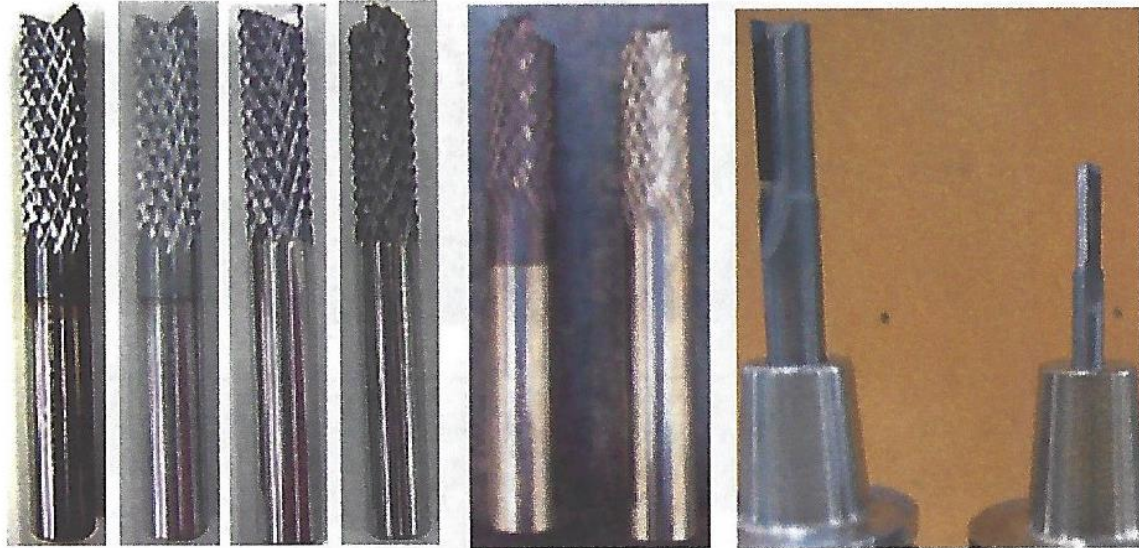


Fig. 23 Comparative study on the effect of coatings, micro grain, cobalt content and multi-tooth versus PCD tool (López de Lacalle et al. 2009)

מאיךר Lopez & lamikiz (2010) עשו מחקר מקיף על אפקט של ציפויים שונים, השפעה על המיקרו מבנה של כלי הקרביד, תכולת הקובלט כמו גם גיאומטריות שונות בכלי ריסוק (תרשים 23)

הם גם עשו השוואה של ביצועי עיבוד בין כרסומי ריסוק וכרסומי PCD. מעניין שכרסומי PCD לא היו מספיק אטרקטיביים כלכלית ביחס למחיר הגבוהה שלהם. הם המליצו על כרסומי ריסוק לחיתוך של סוגי CFR שונים.

Bilek (2016) הוציא לפועל תוכנית מחקר שהתמקדה במגוון גיאומטריות של כלי בעיקר בכרסומים מרובי שיניים (ריסוק) וכרסומי PCD. הוא וצוותו חקרו את האפקט של טיב השטח, כוחות החיתוך ודיוק מידתי במהלך כרסום FRP. הם ראו שבהתאם למאפיינים ספציפיים מסויימים כלי PCD מצופים היו יעילים פחות בזמן חיתוך

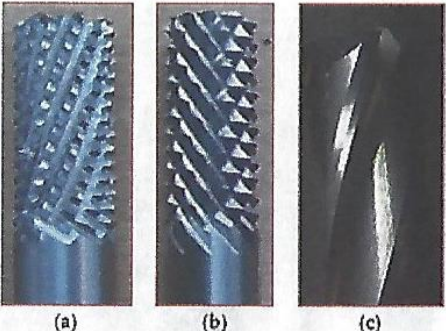
פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020

בהשוואה לכלי ריסוק (Router/Burr). אי לכך המסקנה החד משמעית שהתקבלה שכלי כרסום בתצורת ריסוק מומלצים יותר לחיתוך צד של CFRP .

Prakash (2016) חקר את חיתוכו המהיר של CFRP והשפעתו על איכות המשטח באמצעות שלוש גיאומטריות האחת כוללת את T1 ו T2 כלי ריסוק ו T3 כרסום בגיאומטריית Helical Helix (סלילית) המוראה בתרשים 24.

הם דיווחו שהכלי הטרפזי T1 סיפק טיב שטח (RA) קביל וכח חיתוך יחסית נמוך ללא דלמינציות. הכלי T2 הפירמידי הראה כוחות חיתוך גדולים יותר מ T1 וטיב שטח בינוני בערכי (RA) יחסית לכלי הקודם. כרסום האצבע בגיאומטריה הסלילית (T3) נתן טיב שטח (RA) גבוהה (גרוע) וכוחות חיתוך גבוהים גם כן. גם הדלמינציות שהתקבלו היו מאד בולטות הרבה יותר מאשר בכלים הקודמים. ההשערה ששפות החיתוך





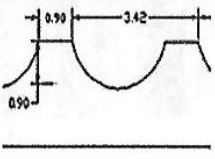


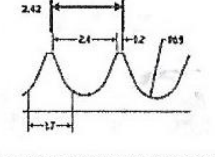


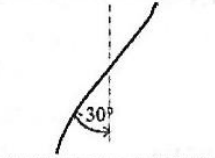
| Tool | Specification | Image of the Tool | Tooth Shape | Tooth Profile |
|---------|----------------------------|---|--|---|
| Tool T1 | Pitch = 3.42 mm |  |  |  |
| | No. of flutes—12 | | | |
| | Tooth Shape—Trapezoidal | | | |
| Tool T2 | Pitch = 2.42 mm |  |  |  |
| | No. of flutes—12 | | | |
| | Tooth Shape—Pyramidal | | | |
| Tool T3 | Helix angle 30° |  |  |  |
| | No. of flutes—4 | | | |
| | Tooth Shape—Helical fluted | | | |

Fig. 24 Details of the investigated cutting tools (T1, T2 & T3) (Prakash et al. 2016)

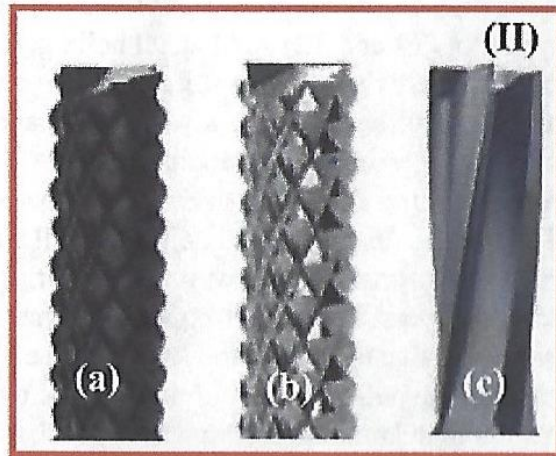
פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020

ההמשכיות עם זווית סלילית גדולה יותר הם הסיבה העיקרית שגרמה למשיכת הסיבים בשני הצדדים בלמינט משמעותית יותר והסתיימו בדלמינציה.

החקר של Haddad (2013) בדק גיאומטריה בכרסום קרבייד טונגסטן לא מצופה ובכרסום ריסוק מצופה יהלום ובכרסום 4 פאות חיתוך, Helical Helix מצופה יהלום

Fig. 25 a Burr tool (tungsten carbide) b Burr tool (diamond coated tungsten carbide) c Four-flute helical helix end mill (diamond coated) (Haddad et al. 2013)



(תרשים 25). החקר גילה שכוחות החיתוך פרופורציונליים ומושפעים ע"י מהירות הקדמה ללא קשר לגיאומטריית הכלי בכל תנאי החיתוך. מכל מקום, ככל שמהירות החיתוך גבוהה יותר היא מפחיתה את כוחות החיתוך.

באותה שנה (2013) Gara & Tsoumare ביצעו חקר השוואתי בכרסום CFRP במיבני מיקרו-גרעין שונים לכלי ריסוק (Burr tools) כאשר הם ממינים אותם למבנה עדין, בינוני, וגס (תרשים 26).

פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020

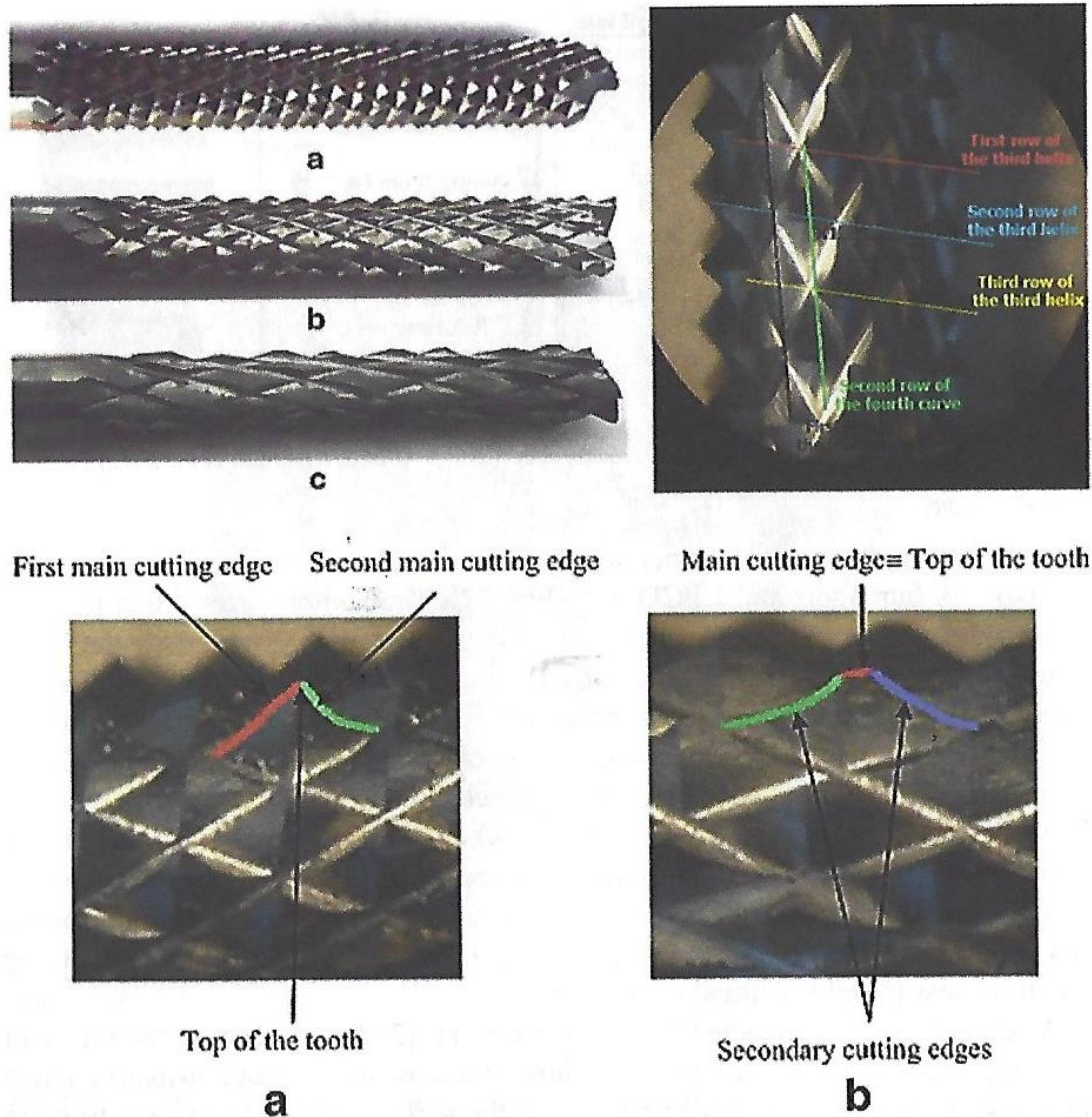


Fig. 26 Details burr tool geometries: **a** fine grain, **b** medium grain, **c** coarse grain (Gara and Tsoumarev 2016)

הם גילו שלפרמטרי הכרסום לא הייתה השפעה משמעותית על טיב השטח הרחבי (הטרנסברסלי). אבל לגיאומטריית הכלים הייתה השפעה רבה על איכות טיב השטח שהתקבל בכיוון ברוחבי. המיקרו-מבנה הגיאומטרי העדין בכלי הריסוק דווח כמומלץ ביותר לתהליך החיתוך של CFRP בהשוואה לשני המבנים האחרים. אותם חוקרים הרחיבו את עבודתם ב (2017) עם אותם שלושה כלים על מנת לבחון את האפקט על השבבים והטמפרטורה שלהם. התוצאות גילו שגיאומטריית הכלי כמו גם לפרמטרי

פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020

הכרסום (מהירות, קדמה) אימפקט משמעותי על תפוקת החום במהלך חיתוך חומרי CFRP. הפקטור השתלטי שהשפיעה על טמפרטורה החיתוך היה מהירות החיתוך וגם הקדמה לשן. במקביל בוצע מחקר ע"י Sheikh (2018) המדגיש את חקר הטמפרטורה המתפתחת בחיתוך ע"י מגוון גיאומטריות כלים (שני סוגי כלי ריסוק וכלי PCD) כמוראה בתרשים 27.

| Cutter | Material | Cutting Flute | Geometry |
|--------------|----------------------------|-----------------|---|
| Burr Type I | CVD diamond coated carbide | Segmented flute | 12 cutting flutes ($\phi_c = 15^\circ$) 10 intersecting flutes ($\phi_i = 45^\circ$) |
| Burr Type II | TiAlN coated carbide | Burr | 13 cutting flutes ($\phi_c = 30^\circ$) 15 intersecting flutes ($\phi_i = 35^\circ$) |
| End Mill | PCD | Straight flute | 2 flutes ($\phi_c = 0^\circ$) Rake angle = 0° Clearance angle = 15° |

Fig. 27 Types of cutting tools and their details specification (Sheikh-Ahmad et al. 2018)

החוקרים טוענים שהצליחו להוכיח שהחום הנוצר במהלך הכרסום / חיתוך מתפנה ברובו ע"י אבקת השבבים. המשמעות היא שגודל גרגירי האבקה הידוע (כרוחב בשבב בכרסום מתכתי) קובע את % אנרגיית החום שמסולקת במהלך החיתוך/ שיבוב. במקרה של כרסום PCD שהשתמשו בו (שתי פאות חיתוך ישירות) "עובי השבב" היה גדול יותר מהשאר והצליח לשחרר במרווח בין הפאות (אינסרטים) הרבה יותר אבקה בהשוואה לכלי הריסוק שמרווח בפאות החיתוך הרבה יותר קטן ואי לכך פחות אפקטיבי. הם גם מצאו שהגדלת הקדמה יכולה לגרום להגדלת גרגירי השבב שבאופן לא ישיר מתגבר ומשפר את סילוק החום מהמוצר ומכלי החיתוך.

בשנת (2019) ביצע Ashworth חקר על פגמי שטח שנוצרים מאפקט השינוש ברובוטים/זרועות רובוטיות ומכונות שיבוב בעיקר 5 צירים CNC. בעזרת שתי גיאומטריות כלים שונות ; כלי ריסוק (Burr tool) וכלי דוחס (Compression router) כמוראה בתרשים 28. הצוות שחקר יחד איתו גילה שלגיאומטריית הכלי יש תפקיד

פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020

חשוב ביצירת מטריצות משטח שונות כמו גם ליכולת הדחק (Total power) של תהליך השיבוב, אך היא לא משפיעה ישירות על מאמצי חוזק הכפיפה.

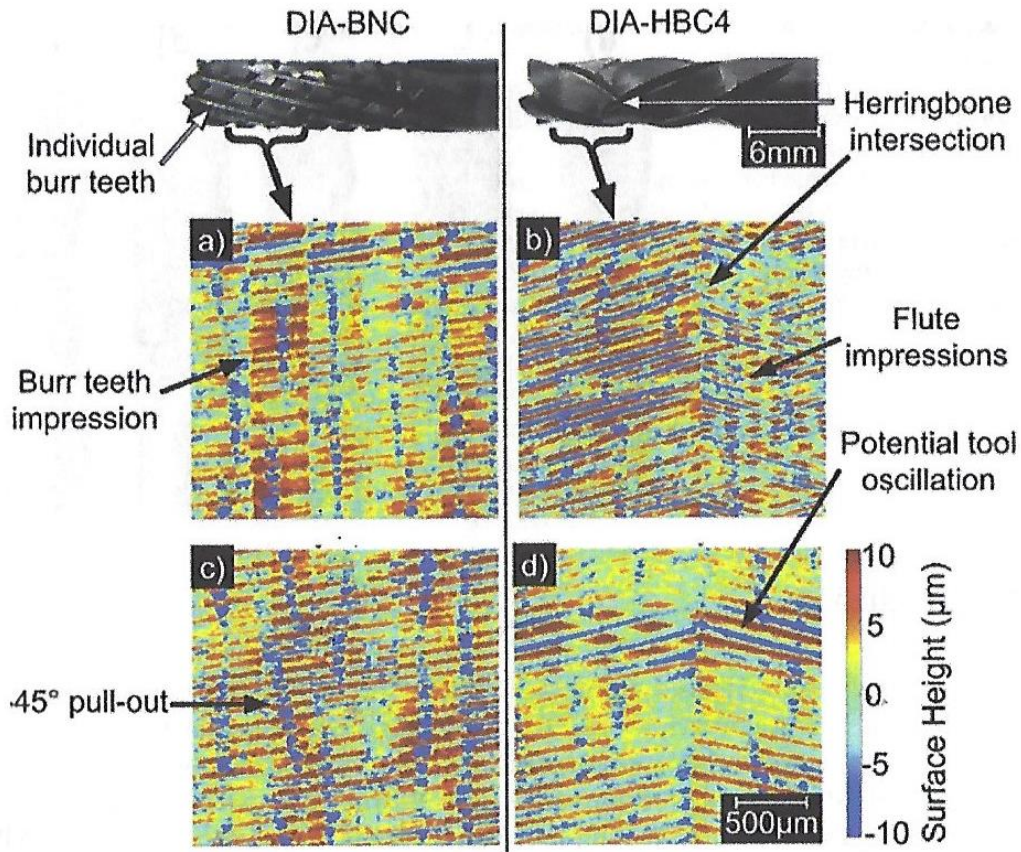


Fig. 28 Details of the tool geometries and the trimmed surfaces topographical results (Ashworth et al. 2019)

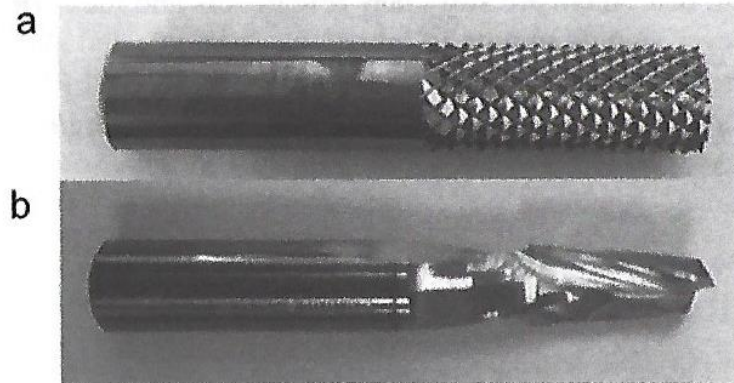
מחקר אחר של Sundi (2019-2020) גילה את ההשפעה של מספר פאות החיתוך/ שיניים של כלי ריסוק (תכונות גיאומטריות של כלים) והשפעתם על גימור טיב השטח בכרסומי קצה של CFRP. החקר גם הוכיח את אפקט פרמטרי החיתוך או תנאי החיתוך כמו צהירות החיתוך VC והקדמה VF על איכות משטח החיתוך בכרסומי בחומרי CFRP ספציפיים.

פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020

החקר ההשוואתי בתנאים קירוגניים בין כלי MT (multi tooth), כלי ריסוק וכלים דוחסים מלמעלה-מטה (Up-down /UD) תרשים 29.

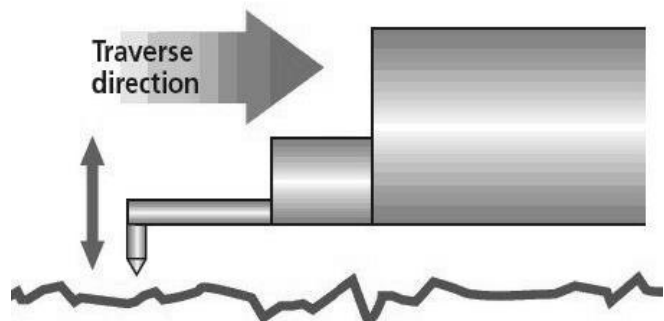
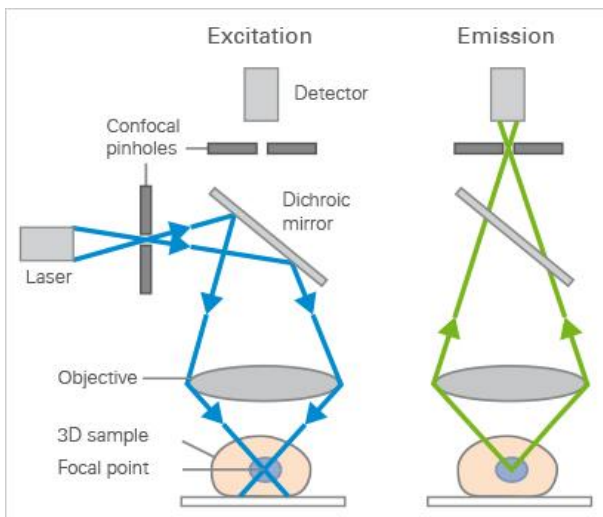
Fig. 29 a Multi-tooth/burr tool geometry; b up-down/compression router tool (Cunningham et al. 2018)



נעשה ע"י Cunningham (2018) החקר גילה ששיבוב קירוגני (הערה שלי: שימוש

בחנקן) משפר את טיב שטח המשטח כמו גם את אורך הדלמינציות לגיאומטריה של שני הכלים.

במחקרים יותר מתקדמים שנעשו ע"י Geier ו Pereszlai (2020) דווח שגיאומטריות כלי החיתוך וסוג הכרסום משפיעים באופן מכריע על המאפיינים של טיב השטח. החוקרים ניתחו את התוצאות בשתי שיטות מדידה – פרופילומטר מגע - ומיקרוסקופ קונפוקאלי (ראה תמונות)

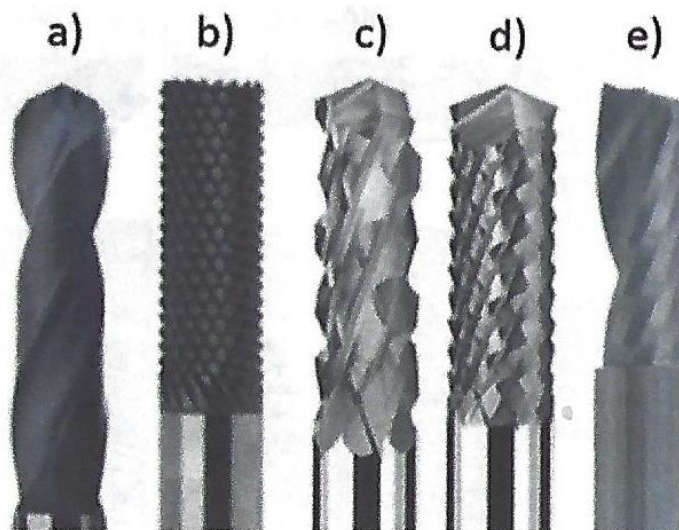


פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020

מגוון גיאומטריות כלים נבדקו, אפשר לראות את רובן בתרשים 30. לא דווח על מצטיין ספציפי, אלא רק על האפקט.

Fig. 30 a $\varnothing 11.138$ mm double point angle twist drill (by Seco) b $\varnothing 10$ (mm) burr tool (by Seco); c $\varnothing 10$ mm burr tool (coarse tooth by Fraisa) and d $\varnothing 10$ mm burr tool (medium tooth by Fraisa); e $\varnothing 10$ mm helical helix end mill (by Tivoly) (Geier and Pereszlai 2020)



מצ"ב REF מהספר :

References

- Ashworth S et al (2019) Effects of machine stiffness and cutting tool design on the surface quality and flexural strength of edge trimmed carbon fibre reinforced polymers. *Compos Part A* 119(May 2018):88–100
- Astakhov VP, Davim JP (2008) Tools (geometry and material) and tool wear. In: *Machining*. Springer, London
- Can A (2017) Effect of edge trimming parameters on surface quality of carbon fiber reinforced polymer composites. *J Sci Eng* 17:302–311
- Chen T, Wang D, Gao F, Liu X (2017) Experimental study on milling CFRP with staggered PCD cutter. *Appl Sci* 7(9):934

- Colligan K, Ramulu M (1992) The effect of edge trimming on composite surface plies. *Manuf Rev* 5(4):274–283
- Corporation H (2013) HexPly prepreg technology
- Cunningham CR, Shokrani A, Dhokia V (2018) Edge trimming of carbon fibre reinforced plastic. *Procedia CIRP (Hpc)*:6–10
- Davim JP, Reis P (2005) Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments. *J Mater Process Technol* 160(2):160–167
- Duboust N et al (2017) An optical method for measuring surface roughness of machined carbon fibre-reinforced plastic composites. *J Compos Mater* 51(3):289–302
- El-hofy HA (2014) Fundamentals of machining processes; conventional and nonconventional processes, 2nd ed. CRC Press, Taylor & Francis Group
- El-Hofy MH, Soo SL, Aspinwall DK, Sim WM, Pearson D, Harden P (2011) Factors affecting workpiece surface integrity in slotting of CFRP. *Procedia Eng* 19:94–99
- Gara S, Tsoumarev O (2016) Effect of tool geometry on surface roughness in slotting of CFRP. *Int J Adv Manuf Technol* 86(1–4):451–461
- Gara S, Tsoumarev O (2017) Optimization of cutting conditions in slotting of multidirectional CFRP laminate. *Int J Adv Manuf Technol* 95:3227–3242
- Geier N, Pereszlai C (2020) Analysis of characteristics of surface roughness of machined CFRP composites. *Period Polytech Mech Eng* 64(1):67–80
- Haddad M, Zitoun R, Eyma F, Castanie B (2013) Influence of tool geometry and machining parameters on the surface quality and the effect of surface quality on compressive strength of carbon fibre reinforced plastic. *Mater Sci Forum* 763:107–125
- Hosokawa A, Hirose N, Ueda T, Furumoto T (2014) High-quality machining of CFRP with high helix end mill. *CIRP Ann Manuf Technol* 63(1):89–92
- Janardhan P, Sheikh-ahmad J, Cheraghi H (2006) Edge trimming of CFRP with diamond interlocking tools edge trimming of CFRP with diamond interlocking tools. *SAE Int* 2006-01-31 (Sept)
- König W, Wulf C, Graß P, Willerscheid H (1985) Machining of fibre reinforced plastics. *CIRP Ann Manuf Technol* 34(2):537–548
- Liu G, Qian X, Chen H, Gao F, Chen T (2017) Development of a staggered PCD end mill for carbon fiber reinforced plastic. *Appl Sci* 7(3):245
- López de Lacalle A, Lamikiz LN (2010) Milling of carbon fiber reinforced plastics. *Adv Compos Mater* 83–86:49–55
- López de Lacalle N, Lamikiz A, Campa FJ, Valdivielso AF, Etxeberria I (2009) Design and test of a multitooth tool for CFRP milling. *J Compos Mater* 43(26):3275–3290
- Mallik PK (2008) Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design. CRC Press, Taylor & Francis Group
- Mallik PK (2018) Processing of polymer matrix composites. CRC Press, Taylor & Francis Group
- Mazumdar SK (2002) Composites manufacturing. In: *Materials, product and process engineering*, vol 32, no 1. CRC Press
- Morgan P (2005) Carbon fibers and their composites
- Nguyen-dinh N, Hejjaji A, Zitoun R, Bouvet C, Salem M (2020) New tool for reduction of harmful particulate dispersion and to improve machining quality when trimming carbon/epoxy composites. *Compos Part A* 131(Feb):105806
- Ondrej Břlek MZ, Rusnáková S (2016) Cutting-tool performance in the end milling of carbon-fiber-reinforced plastics. *Mater Tehnol* 50(5):819–822
- Prakash R, Krishnaraj V, Zitoun R, Sheikh-Ahmad J (2016) High-speed edge trimming of CFRP and online monitoring of performance of router tools using acoustic emission. *Materials (Basel)* 9(10):798
- Rana S, Figueiro R (2016) Advanced composite materials for aerospace engineering: processing, properties and applications. Woodhead Publishing WP
- Sheikh-Ahmad JY (2009) Machining of polymer composites. Springer
- Sheikh-Ahmad J, Urban N, Cheraghi H (2012) Machining damage in edge trimming of CFRP. *Mater Manuf Process* 27(7):802–808



פרק ב' חתוך וכרסום חלקי CFRP

המחקרים הרלוונטיים 1985-2020