

„Hauptüberschrift“

Laserbearbeitete Diamantwerkzeuge ermöglichen hocheffiziente Bearbeitung von CFK für die Luftfahrtindustrie

„Autoren“

Marcel Henerichs, Claus Dold und Konrad Wegener

„Vorspann“

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) verfügen über herausragende mechanische Eigenschaften bei geringem Gewicht. Diese Eigenschaften macht die Verwendung des Werkstoffes insbesondere für die Luftfahrtindustrie, den Automobilbau, Sportgerätehersteller sowie die Energiegewinnung interessant. Die zunehmende Verwendung von CFK erfordert effiziente Maschinenlösungen und leistungsfähige Zerspanwerkzeuge. Das Material ist sehr abrasiv, es erfordert hochharte Schneidwerkstoffe bei gleichzeitig scharfer Schneidkante, da nur eine scharfe Schneidkante eine Oberfläche von zufriedenstellender Qualität gewährleisten kann. Laserbearbeitete Schneidwerkzeuge aus polykristallinem Diamant (PKD) kombinieren eine hohe Härte mit geringem Schneidkantenradius und hoher geometrischer Freiheit bei der Schneidkantengestaltung.

„Zwischenüberschrift“

Einleitung

„Text“

Die präsentierte Studie besteht aus zwei zusammengesetzten Teilen: Im ersten Teil wird die Herstellung von PKD-Wendeschneidplatten mittels ultrakurzen Laser-Pulsen dargestellt. Der zweite Teil fokussiert auf Drehversuchen von CFK mit geschliffenen und gelaserten PKD-Wendeschneidplatten. CFK wurde zunächst in der Luftfahrtindustrie in industriellem Maßstab eingeführt. Frühe Forschung fokussierte auf das Fräsen und Bohren von CFK als übliche Bearbeitungsverfahren in diesen Industrien [1]. Die hohe Abrasivität des Werkstoffes sorgt für eine geringe Standzeit beschichteter und unbeschichteter VHM-Werkzeuge. Nitridische Beschichtungen halten dem Verschleißangriff nicht stand. Erhältliche Diamantbeschichtungen verfügten über eine zu geringe Schichthftung [2-3], wenngleich heutige Diamantbeschichtungen eine gute Verschleißbeständigkeit und Schichthftung zeigen. Einzige Bearbeitungsalternative blieben teure geschliffene PKD-Werkzeuge geringer geometrischer Flexibilität. Laserbearbeitete PKD-Werkzeuge versprechen eine bessere Werkstückqualität aufgrund der an den Werkstoff anpassbaren Schneidengeometrie sowie eine höhere Standzeit aufgrund der möglichen Verwendung eines größeren Diamantkorns. Gegenüber diamantbeschichteten VHM-Werkzeugen weisen PKD-Werkzeuge generell einen geringeren Schneidkantenradius und damit eine höhere Schärfe auf, da eine Diamantbeschichtung aufgrund der hohen Schichtdicke (5-10 µm) eine

Schneidkantenverrundung verursacht. Die Entwicklung neuer ultrakurz gepulster Lasersysteme ermöglicht heute Materialbearbeitung mit einer vernachlässigbar kleinen wärmebeeinflussten Zone im verbleibenden Material. In dieser ersten Studie vergleicht das Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (IWF) der ETH Zürich laserbearbeitete sowie geschliffene PKD-Wendeschnidplatten zur Bearbeitung von CFK. Substrat und Geometrie der Wendeschneidplatten sind identisch gewählt, um den Effekt des Einflusses der Herstellungsmethode auf die Werkzeugeigenschaften und -standzeit isolieren zu können.

„Text“

Die Verwendung von CFK hat in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen, neben der Luftfahrtindustrie sowie der Sportartikelindustrie findet der Werkstoff inzwischen umfangreiche Verwendung im Automobilbau sowie dem Bereich der Energieerzeugung. In diesen Feldern werden in den kommenden Jahren die höchsten Wachstumsraten für CFK erwartet.

„Zwischenüberschrift“

Versuchsaufbau

(Abbildung 1)

„Text“

Das verwendete Lasersystem zur Bearbeitung der Wendeschneidplatten ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Pikosekundenlaser arbeitet mit einer Pulslänge von 10 ps. Die Werkzeugmaschine ist mit 3 translatorischen sowie 2 rotatorischen Achsen zur Bewegung des Werkstückes ausgestattet. Die Strahlführung erfolgt mittels zwei Spiegelgalvanometer sowie einem Fokushifter. Bei einer Pulslänge von $t_p = 10$ ps konnten gemäß Ramanathan et al. sowie Dold et al. keine Graphitisierungseffekte des Diamanten nachgewiesen werden [4-5]. Entsprechende Untersuchungen wurden daher im Rahmen dieser Studie nicht durchgeführt. Eine Graphitisierung des Diamanten hätte eine deutliche Standzeitverschlechterung der Werkzeuge zur Folge. Die Bearbeitung der Wendeschneidplatten erfolgt in zwei Schritten. In einer Schruppbearbeitung wird die Diamantschneide mit einem Aufmaß von etwa 100 μm vorbereitet, in der anschließenden Schlichtbearbeitung die Endkontur der Schneidkante fertig bearbeitet. Die verwendete Maschine zur Laserbearbeitung aus dem Hause EWAG AG ist in Abbildung 2 dargestellt.

(Abbildung 2)

„Aufzählung“

Verwendete Laserparameter:

Pulslänge	10 ps
Wellenlänge	1064 nm
Fokusbildmesser:	35 μm
Fluenz	$0,179 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$
Pulsenergie	47.5 μJ
Scangeschwindigkeit	$2000 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

„Text“

Das CFK wird in einer Drehoperation unter konstantem Faserwinkel zerspant. Die 3 unterschiedlichen Werkstücke sind aus 20 Lagen mit den Faserwinkeln $\Theta = 30^\circ$, 90° oder 150° aufgebaut. Die Faserrichtung ist immer relativ zur Schnittrichtung angegeben. Die verwendete Faser ist eine IMA-12K-Faser in Kombination mit einer M21E-Matrix wie sie auch im kommenden Airbus A350 verwendet wird. Der Faservolumengehalt beträgt 60%. Die Werkzeuge sind PKD-Wendescheidplatten mit einer durchschnittlichen Korngröße von 2-4 μm und einem Diamantgehalt von 90%. Freiwinkel α , Spanwinkel γ , Einstellwinkel κ , Schnittgeschwindigkeit v_c , Vorschubgeschwindigkeit v_f , Schnitttiefe a_e sowie Anstellwinkel $\lambda = 0^\circ$ sind über sämtliche Versuche konstant und in der nachfolgenden Tabelle angegeben.

„Aufzählung“

α	7°
γ	0°
κ	90°
v_c	$200 \frac{\text{m}}{\text{min}}$
v_f	$0.032 \frac{\text{m}}{\text{min}}$
a_e	1 mm
Q_w'	$20 \frac{\text{mm}^3}{\text{mm} \cdot \text{min}}$
V_w'	$47\,124 \frac{\text{mm}^3}{\text{mm}}$

„Text“

Die Vermessung der Wendeschneidplatten wird mittels eines optischen 3D-Mikroskops mit 20-facher Vergrößerung durchgeführt. Die vertikale Auflösung beträgt $0,2\ \mu\text{m}$, die laterale Auflösung $1\ \mu\text{m}$. Die Bestimmung des Schneidkantenradius erfolgt nach der Methode von Wyen [6].

„Zwischenüberschrift“

Ergebnisse

(Abbildung 3)

(Abbildung 4)

„Text“

Die bearbeiteten Schneidkanten sind auf den REM-Bildern in Abbildung 3 dargestellt. An der laserbearbeiteten Wendeschneidplatte sind die Diamanten durchtrennt, die Schneidkante hat eine durchgehend homogene Oberfläche. Die geschliffene Wendeschneidplatte zeigt Kornausbrüche an der Schneidkante, da beim Schleifen die Diamantkörner nicht durchtrennt werden. Bei der Wahl von PKD mit größerem Diamantkorn ist eine schleifende Bearbeitung aufgrund der entstehenden großen Ausbrüche nicht sinnvoll. Eine homogene, scharfe Schnittkante an einer grobkörnigen PKD-Wendeschneidplatte kann nur mittels einer Laserbearbeitung erreicht werden. Abbildung 4 zeigt die Schneidkante einer laserbearbeiteten PKD-Grobkorn-Platte. Die durchschnittliche Korngröße des verwendeten PKD beträgt $20\ \mu\text{m}$. Die durchtrennten Diamantkörner sind deutlich zu erkennen, die Schneidkante zeigt ein ebenso gleichmäßiges Aussehen wie die gelaserte Wendeschneidplatte in Abbildung 3. Die ermittelten Schneidkantenradien der geschliffenen und der gelaserten Wendeschneidplatten sind in Abbildung 5 dargestellt. Die neuen Werkzeuge haben Schneidkantenradien von $r_\beta = 5$ bis $5,3\ \mu\text{m}$ im Falle der geschliffenen Werkzeuge sowie $r_\beta = 4,3$ bis $6,5\ \mu\text{m}$ im Falle der gelaserten Werkzeuge. Für derartig kleine Schneidkantenradien beträgt die Messunsicherheit bis zu $3,9\ \mu\text{m}$, dementsprechend können die erreichten Schneidkantenradien als sehr ähnlich beschrieben werden. Die Bearbeitungszeit für die geschliffenen Wendeschneidplatten beträgt 8 Minuten, jene der gelaserten Wendeschneidplatten 6,5 Minuten.

(Abbildung 5)

„Text“

Das Verschleißverhalten der geschliffenen und der gelaserten Wendeschneidplatten ist in Abbildung 5 in Form der resultierenden Schneidkantenradien dargestellt. Der Verschleiß ist bei einer Bearbeitung CFK mit einem Faserwinkel von $\Theta = 150^\circ$ sehr gering. Der Schneidkantenradius erhöht sich bei einem bezogenen Zerspanvolumen von

$V_w' = 47.124 \text{ mm}^3/\text{mm}$ von etwa $r_\beta = 5 \text{ }\mu\text{m}$ auf $8 \text{ }\mu\text{m}$ (geschliffen) bzw. $7.5 \text{ }\mu\text{m}$ (gelasert). Der Verschleiß steigt bei einer Faserorientierung von $\Theta = 30^\circ$ bzw. 90° markant an, der Schneidkantenradius beträgt zu Versuchsende $r_\beta = 31$ bis $37 \text{ }\mu\text{m}$. Der Verschleiß der gelaserten sowie der geschliffenen Werkzeuge ist auch in diesem Fall sehr ähnlich, demzufolge kann eine signifikante Graphitisierung des Diamanten aufgrund der Laserbearbeitung ausgeschlossen werden. Die Vorschubkraft verdoppelt sich in nahezu allen durchgeführten Versuchsreihen, siehe Abbildung 6. Bei $\Theta = 90^\circ$ und 150° sind die Kraftverläufe nahezu identisch für geschliffene und gelaserte Platten. Die Vorschubkraft bei einer Zerspanung unter $\Theta = 30^\circ$ ist signifikant höher für die gelaserten als für die geschliffenen Wendeschneidplatten. Die resultierende Oberflächenrauheit am Werkstück ist quasi identisch für $\Theta = 30^\circ$ sowie 90° , siehe Abbildung 7. Die Oberflächenrauheit beträgt unabhängig vom Werkzeugverschleiß etwa $R_a = 2 \text{ }\mu\text{m}$. Für $\Theta = 150^\circ$ ist die Oberflächenrauheit um etwa 20% geringer für gelaserte als für geschliffene Wendeschneidplatten ($R_a = 5\text{-}7 \text{ }\mu\text{m}$ zu $R_a = 7\text{-}12 \text{ }\mu\text{m}$).

(Abbildung 6)

(Abbildung 7)

„Text“

Abbildung 8 zeigt rasterelektronische Aufnahmen der Schneidkante nach einem auf die im Eingriff befindliche Schneidlänge bezogenes Zerspanvolumen von $V_w' = 47.124 \text{ mm}^3/\text{mm}$. Die obere Reihe zeigt die geschliffenen, die untere Reihe die gelaserten Werkzeuge. Die drei Spalten sind von links nach rechts in absteigender Reihenfolge nach dem Faserwinkel während der Zerspanung abgebildet: Die linke Spalte zeigt die Werkzeuge nach einer Zerspanung unter einem Faserwinkel von $\Theta = 150^\circ$, die mittlere Spalte $\Theta = 90^\circ$, die rechte Spalte $\Theta = 30^\circ$. Die geschliffenen Platten erscheinen auf mikroskopischer Ebene strukturierter, während die Oberflächen der gelaserten Platten einen verschmierten Eindruck machen. Obwohl die Platten mit $\Theta = 150^\circ$ nur einen geringen Anstieg des Schneidkantenradius zeigen, erscheint die Schneidkante beider Werkzeuge einem starken Verschleiß ausgesetzt. Die Wendeschneidplatten mit $\Theta = 90^\circ$ zeigen einen sehr symmetrischen Verschleiß der Schneidenecke, während der Verschleiß unter $\Theta = 30^\circ$ weit in die Freifläche ausläuft. Die geschliffenen Werkzeuge zeigen Längsrillen an der Schneidenecke. Dieses Verschleißphänomen tritt bei unbeschichteten Hartmetallplatten erheblich intensiver auf, es bildet sich insbesondere bei $\Theta = 30^\circ$. Es kann davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei um einen selbstverstärkenden Effekt handelt. Die Fasern werden in die sich bereits gebildeten Rillen hineingezogen und sorgen dort für zusätzlichen abrasiven Verschleiß.

(Abbildung 8)

„Zwischenüberschrift“

Zusammenfassung und Ausblick

„Text“

Die erzielten Ergebnisse für geschliffene und gelaserte Wendeschneidplatten sind sehr ähnlich, beide Arten von Werkzeuge können in Bezug auf Werkstückqualität, Verschleißwiderstand und Prozesskräfte als gleichwertig bezeichnet werden. Eine Qualitätsminderung oder Beschädigung der PKD-Wendeschneidplatte aufgrund der Laserbearbeitung kann daher ausgeschlossen werden. Bei Verwendung des gleichen PKD-Materials sowie identischer Werkzeuggeometrie sind Schleif- und Laserbearbeitung ebenbürtig. Die Laserbearbeitung ermöglicht die Verwendung von grobkörnigerem PKD sowie eine höhere Flexibilität in der Werkzeuggeometrie. Die vermutete höhere Standzeit der Werkzeuge aufgrund einer PKD-Körnung $>10\ \mu\text{m}$ sowie die resultierende verbesserte Werkstückqualität aufgrund der angepassten Werkzeuggeometrie sind Gegenstand zukünftiger Forschung.

„Zwischenüberschrift“

Danksagung

„Text“

Wir bedanken uns bei der Kommission für Innovation und Technologie (KTI), die das Projekt „Zerspanung von CFK“ unter der Nummer 11300.3 fördert. Weiterhin bedanken wir uns bei der EWAG AG für die Unterstützung dieser Studie.

„Literatur“

- [1] Teti R. Machining of composite materials. CIRP Annals – Manufacturing Technology 2002; 51/2:611-634.
- [2] Sun FH, Zhang ZM, Chen M, Shen HS. Fabrication and application of high quality diamond-coated tools. Journal of materials processing technology 2002;129:435-440.
- [3] Murphy C, Byrne G, Gilchrist MD. The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fiber-reinforced epoxy composite materials. Journal of engineering manufacture 2002;216:143-152.
- [4] Dold C, Transchel R, Rabiey M, Langenstein P, Jaeger C, Pude F, Kuster F, Wegener K. A study on laser touch dressing of electroplated diamond wheels using pulsed picosecond laser sources. CIRP Annals – Manufacturing Technology 2011;60:363-366.
- [5] Ramanathan D, Molian PA. Micro- and sub-micromachining of type IIa single crystal diamond using a Ti:Sapphire femtosecond laser. Journal of manufacturing science and engineering 2002;124/2:389-396.

[6] Wyen C, Wegener K. Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium. CIRP Annals – Manufacturing technology 2010;59:93-96.

„Kontakt-Info“

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (IWF)
Tannenstrasse 3, CLA G15.2
CH-8092 Zürich
Schweiz
Tel. +41 44 632 53 09
henerichs@iwf.mavt.ethz.ch
www.inspire.ethz.ch

Prof. Dr.-Ing. Konrad Wegener ist Professor für Produktionstechnik und Werkzeugmaschinen an der ETH Zürich und leitet das Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (IWF) und die inspire AG.

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Marcel Henerichs ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am IWF und beschäftigt sich mit der Zerspanung von CFK für die Luftfahrtindustrie

Dipl.-Ing. Claus Dold ist wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der inspire AG und beschäftigt sich mit der Laser-Präparation von Diamanten

„Abbildung 1“

Abbildung 1. Schematischer Aufbau Laser-Bearbeitungsmaschine. (1) Laserquelle, (2) Strahlaufweitung, (3) Umlenkspiegel, (4) Leistungsmessung, (5-6) Polarisatoren, (7) Fokusschifter, (8) Online Kamera, (9) Iris Blende, (10) 2D Scan Einheit, (11) 5-Achs-CNC-System, (12) 3D-Messeinheit, (13) Werkstück, (14) zusätzliche Gasdüsen

„Abbildung 2“

Abbildung 2. Werkzeugmaschine „LASER LINE“ der EWAG AG

„Abbildung 3“

Abbildung 3. REM-Bilder von neuen PKD-Wendeschnidplatten. Geschliffene (a) und gelaserte (b) Schneidkante. Kornausbrüche sind mit weißen Kreisen verdeutlicht.

„Abbildung 4“

Abbildung 4. REM-Bild einer gelaserten PKD-Wendescheidplatte mit Grobkorn. Die durchschnittliche Korngröße beträgt 20 μm .

„Abbildung 5“

Abbildung 5. Vergleich des Schneidkantenradius zwischen geschliffenen (G) und gelaserten (L) Wendeschneidplatten. Schneidkantenradien neuer Wendeschneidplatten sind mit schwarzen Kreisen dargestellt, Schneidkantenradien von Wendeschneidplatten nach $V_w' = 47.124 \text{ mm}^3/\text{mm}$ sind mit roten Kreisen dargestellt. Faserorientierung Θ relativ zur Schnitttrichtung.

„Abbildung 6“

Abbildung 6. Vorschubkraft für geschliffene (G) und gelaserte (L) Wendeschneidplatten während der Zerspaltung von CFK.

„Abbildung 7“

Abbildung 7. Oberflächenrauheit der CFK-Werkstücke. Vergleich der Drehversuche von geschliffenen (G) und gelaserten (L) Wendeschneidplatten unter verschiedenen Faserorientierungen Θ .

„Abbildung 8“

Abbildung 8. Vergleich Schneidkanten unter dem REM nach einem bezogenen Zerspanvolumen von $V_w' = 47.124 \text{ mm}^3/\text{mm}$, beschrieben von links nach rechts. Die Bilder zeigen den Verschleiß an der Schneidkante bei einer Zerspaltung mit einem Faserwinkel Θ relativ zur Schnitttrichtung, $\Theta = 150^\circ$ (a, d), $\Theta = 90^\circ$ (b, e), $\Theta = 30^\circ$ (c, f). In der oberen Zeile sind die geschliffenen, in der unteren Zeile die gelaserten Werkzeuge dargestellt.