

Diss. ETH No. 21598

Picosecond laser processing of diamond cutting edges

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zürich)

presented by
CLAUS ALEXANDER DOLD
MSc Masch.-Ing. ETH, Dipl. Arch. ETH
born March 28th 1977
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. K. Wegener, examiner
Prof. Dr. rer. nat. R. Poprawe M.A., co-examiner
Prof. Dr. F. Pude, co-examiner

2013

Abstract

Ultrahard materials utilized in tooling are currently a very active research field in a multitude of manufacturing techniques such as drilling, turning, milling, grinding and laser processing. New application fields such as the processing of carbon fiber reinforced plastics for automotive and aerospace industries have led to a large demand on new machining processes due to the highly abrasive nature of the carbon fibers. Diamond as the hardest material is ideal in terms of its durability and hence ideally suited as cutting edge material. This study is concerned with the generation of cutting edges on diamond for defined and undefined (stochastic) geometries, such as turning and milling cutting inserts or on dressing wheels. Various aspects of ablation using ultrashort laser pulses such as ablation threshold determination on amorphous and dielectric materials, laser treated diamond characterization and laser beam specific properties due to picosecond pulse duration are presented. Regarding cutting edge geometries on geometrically undefined cutting edges, a new process named "Laser Touch Dressing" is introduced which can, by using a combined CNC-controlled 3-axis system with a fourth polygon scanner based system, generate three-dimensional structures on diamond plated dressing wheels. This is achieved by generating a homogeneous diamond grain protrusion height in a way that an envelope with a given final diameter over the circumference of the wheel is generated. Validation experiments are carried out by dressing of silicon carbide (SiC) wheels and it is shown that tangential and normal dressing forces can be reduced compared to conventionally processed (ground) diamond wheels. Furthermore a strategy is presented which turns the initially stochastic diamond grain distribution on the wheel with undefined cutting edges, into a wheel with defined rake and clearance angles by introducing a two-step approach of radial- followed by a tangential process over the entire circumference of the wheel. Cutting edge geometries are generated with a distance corresponding to average grain size from cutting edge to cutting edge. With respect to defined cutting edges, a strategy for optimized beam path control using a two-dimensional scanhead based on a user defined spiral geometry is derived. Main characteristics of this strategy are sinusoidal-like control patterns for X - and Y -deflection with a continuously varying amplitude. This approach is ideal for galvanome-

ter mirrors which typically oscillate in a range of $\pm 12^\circ$. Alternative hatch patterns, in the range of linear-, meander- and arc-figures as well as mathematical functions such as spirograph, Lissajous and Archimedes spiral figures and a homogeneous spacing Hilbert curve scheme are evaluated. Target values for optimization include the cutting edge radius, material removal rate and surface roughness values. The archimedes spiral figure exhibits most favorable characteristics with respect to these target values. The spiral figure is defined via an outer radius value, a variable exponent value which can be used to modify the ablation profile characteristics in combination with an outer spiral line spacing of the two outermost spiral lines. This allows for precise definition of energy input on the effective laser material interaction on the final cutting edge geometry. In order to validate the ablation characteristics of the developed spiral figure, a comparison study against ground cutting tool inserts using fine (2 to 4 μm) and coarse grain (25 μm) cutting tool inserts is carried out. Achieved cutting edge radii of laser treated cutting edges are slightly better than ground cutting edges. Cutting and feed forces are compared by turning highly abrasive CFRP material. Laser treated cutting edges perform slightly better, depending on the orientation of the unidirectional carbon fibers relative to the cutting direction. Processing times are about 20% lower for laser prepared cutting edges. In a last step, a plausibility study of laser-material interaction is presented in form of a comparison study of the classical heat conduction model and the two-temperature model for pulse durations between 100 fs and 20 ns. Hereby, the transition from thermal to athermal material response behavior with respect to electron-phonon equilibrium can be studied on copper as sample material. A good fit between simulation and the experimental data is achieved. In a further step, the two-temperature model is extended to a dielectric, specifically diamond, by introducing another energy loss term by a free electron generation mechanism based on multiphoton absorption and kinetic energy transfer mechanism of conduction band electrons when colliding with valence band electrons. Again, experimental data is compared with simulation results in various fluence and scan velocity ranges.

Zusammenfassung

Ultraharte Werkstoffe und die dazugehörigen Bearbeitungsverfahren wie z.B. Bohren, Drehen, Fräsen, Schleifen und Laserbearbeitung im Rahmen der Werkzeugfertigung sind in den letzten Jahren ein häufig frequentiertes Forschungsgebiet. Neue Anwendungsfelder, wie z.B. die Bearbeitung von Verbundwerkstoffen im Rahmen kohlenfaserverstärkter Kunststoffe in den Bereichen Automobilindustrie und Luft- und Raumfahrt fördern die Nachfrage nach neuen Bearbeitungsverfahren, welche den hochabrasiven Eigenschaften der Kohlefaserstrukturen möglichst lange widerstehen können. Diamant, als das härteste bekannte Material und seiner sehr hohen Widerstandsfähigkeit gegenüber Verschleisserscheinungen, eignet sich ideal als Material für die Schneidkantenerzeugung. Diese Arbeit befasst sich mit der Erzeugung von Schneidkanten in Diamant, sowohl für geometrisch definierte, wie z.B. Dreh- und Fräswerkzeuge, als auch für geometrisch undefinierte (stochastische) Schneidkantengeometrien, z.B. für Abricht- und Schleifwerkzeuge. In einem ersten Schritt werden verschiedene Aspekte der Ablation mit ultrakurzen Laserpulsen, wie z.B. die Betrachtung der Ablationsschwelle auf amorphen, als auch auf dielektrischen Materialien, sowie die Eigenschaften laserbearbeiteter Diamanteigenschaften, als auch Laserstrahl-spezifische Einflüsse bei Pikosekunden-Pulsdauern erläutert. Im Bezug auf Schneidkantengeometrien auf geometrisch undefinierten Schneiden wird ein neues Abrichtverfahren, welches "Laser Touch Dressing" genannt wird, vorgestellt. Dieses basiert auf einer 4-achsigen, CNC-gesteuerten Vorrichtung, welche aus 4 Linear- und Rotationsachsen und einem Polygonspiegel besteht. Hiermit können dreidimensionale Strukturen auf rotationssymmetrischen Bauteilen, wie z.B. Abricht- oder Schleifscheiben in deren superabrasiven Belag eingebracht werden. Im Bereich des Abrichtens werden hierbei definierte Kornüberstände der einzelnen Diamantkörner auf der Abrichtscheibe erzeugt und somit eine einhüllende Umfangsfläche um den Aussendurchmesser der Scheibe generiert. Bestätigungsexperimente, welche geschliffene mit laserbearbeiteten Abrichträdern bei einer Bearbeitung einer Siliziumkarbid-Scheibe vergleichen, zeigen, dass die Abrichtkräfte, bestehend aus Normal- und Tangentialkräften, bei Laserbearbeitung deutlich gesenkt werden können. Im weiteren kann aus der stochastischen Verteilung der Schneidkörper einer Abrichtscheibe auch

eine geometrisch definierte Schneidenanordnung erzeugt werden. Hierbei wird eine radiale und danach eine tangentielle Laserbearbeitung der Abrichtscheibe durchgeführt, was zur Entstehung von Span- und Freiflächen im Abrasivbelag führt. Der entstehende Schneidenabstand ist hierbei im mittleren Kornabstand der Abrasivkörner ausgeführt, sodass lediglich definierte Schneidgeometrien nach der Bearbeitung auf dem Abrasivbelag der Scheibe vorzufinden sind. Im Bereich der definierten Schneidkanten wird ein Verfahren für eine optimierte Strahlableitungsbewegung auf Basis eines 2D-Scankopfes und einer, vom Benutzer definierbaren, Spiralgeometrie vorgestellt. Das Augenmerk bei der vorgestellten Strategie sind sinusform-ähnliche Bewegungen in der X - und der Y -Richtung der Strahlableitung, welche mit einer kontinuierlichen Änderung der Amplitude in beiden Raumachsen ausgeführt wird. Dieses Vorgehen erweist sich als ideal für bestehende 2D-Scanköpfe mit einem typischen Auslenkwinkel von $\pm 12^\circ$. In einem ersten Schritt werden diverse Ansteuervarianten, insbesondere diverse Schraffurformen wie beispielsweise Linear-, Mäander- und Bogenkonturen, aber auch mathematisch basierte Geometrien wie z.B. Spirograph-, Lissajous- und Archimedesspiral-Figuren und einer weiteren ideal raumfüllenden Kurve, nämlich der Hilbert-Kurve, miteinander verglichen. Zielgrößen bei diesen Versuchen sind der Einfluss verschiedener Eigenschaften der entstehenden Kontur, nämlich Schneidkantenradius, Materialabtragsrate und Oberflächenrauheitseigenschaften. Hierbei zeigt die Archimedesspirale äusserst vorteilhafte Eigenschaften. Um nun die gewünschten Abtrags-eigenschaften präzise einstellen zu können wird die Spiralgeometrie nicht als Archimedes Spirale, sondern als zusammengesetzte Spirale aus Halbkreissegmenten erzeugt. Über Steuerparameter wie den gewünschten Aussenradius, einen Exponenten, mit welchem der aktuelle Radiuswert potenziert wird, sowie mit dem Linienabstand zwischen den beiden äussersten Spiralbahnsegmenten kann ein ideales Abtragsprofil und eine Schneidkantenverrundung erzeugt werden. Laserseitig kann der Energieeintrag präzise für die ideale Laser-Material Interaktion in der Schnittfuge und an der endgültigen Schneidkante eingestellt werden. Die somit erzeugte Spiralgeometrie wird in einer weiteren Vergleichsstudie mit konventionell geschliffenen Wendeschneidplatten mit feiner ($2 - 4 \mu\text{m}$) und grober Diamantkörnung ($25 \mu\text{m}$) verglichen. Die erzeugten Schneidkantenradien der laserbearbeiteten Schneidwerkzeuge sind im Vergleich zu den geschliffenen Werkzeugen leicht besser. Auch bei den Schnitt- und Vorschubkräften können zum teil bessere Werte beim zerspanen von kohlefaserverstärkten Kunststoffen bei einer um 20% kürzeren Bearbeitungszeit erreicht werden. Die Resultate sind stark von der Faserorientierung relativ zur Schnittichtung abhängig. Im letzten Kapitel wird eine Plausibilitätsbetrachtung zur Interaktion kurzer und ultrakurzer Laserpulse und deren Strahl-Material Interaktion vorgestellt. In einem ersten Schritt wird ein auf dem Zwei-Temperatur-Modell basierender Ansatz, bestehend aus zwei gekoppelten Wärmeleitungsgleichungen mit der einer klassischen Fourier'schen

Wärmeleitungsgleichung für Laserpulsdauern im Bereich von 100 fs und 20 ns aufgestellt. Anhand dieses Beispiels kann der Übergang vom thermischen Gleich- ins Ungleichgewicht zwischen der Elektronen- und Photonentemperatur im Falle kurzer zu ultrakurzer Laserpulse auf Basis von Kupfer gezeigt werden. Ein Vergleich mit experimentellen Daten zeigt eine gute Übereinstimmung mit den simulierten Daten. In einem weiteren Schritt wird das Zwei-Temperatur-Modell zur Beschreibung der Laser-Material Interaktion mit Dielektrika, hier im Bezug auf Diamant, angepasst. Hierzu wird ein weiterer Energieterm, welcher die Erzeugung freier Elektronen im Dielektrikum aufgrund von Multiphotonenabsorption und auch kintetischem Energieübertrag durch beschleunigte, zuvor bereits erzeugte oder bereits vorhandene freie Elektronen im Leitungsband auf Elektronen im Valenzband, in die Wärmeleitungsgleichung des Elektronensystems berücksichtigt. Auch hier werden die simulierten mit experimentellen Daten diskutiert.