Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-107

Ultrapräzisionsschleifen von CTE modifizierbaren Formwerkzeugwerkstoffen für das PGM

Ultrapräzisionsschleifen von MAX-Phasen-Kompositen

D. P. Wilhelm, K. Jahnel, S. Herzog, C. Broeckmann, T. Bergs

ZUSAMMENFASSUNG MAX-Phasen-Kompositwerkstoffe bieten großes Potenzial, die Prozesskette des Präzisionsblankpressens zur replikativen Fertigung von Präzisionsoptiken aus Glas zu vereinfachen. Durch Variation der chemischen Zusammensetzung lassen sich Eigenschaften dieser Werkstoffe gezielt anpassen. Dies ermöglicht es, den Ausdehnungskoeffizienten der Formwerkzeuge auf den des Glases anzupassen und somit aufwendige Korrekturschleifen bei den Formwerkzeugen zu umgehen.

STICHWÖRTER

Ultrapräzisionsbearbeitung, Schleifen, Werkstoffe

Ultra-precision grinding of MAX phase composites – Ultra-precision grinding of CTE customizable mould material for PGM

ABSTRACT MAX phase composites offer great potential for simplifying the process chain of precision glass moulding for the replicative manufacturing of precision optics made of glass. The properties of these materials can be customized by varying the chemical composition. This allows the expansion coefficient of the moulding tools to be adapted to that of the glass, thus avoiding the need for time-consuming corrective grinding of the moulding tools.

1 Formwerkzeuge für das Präzisionsblankpressen

1.1 Replikative Glasoptikfertigung mittels Präzisionsblankpressen

Konventionell werden Präzisionsoptiken in einem Direktfertigungsverfahren mittels iterativem Schleifen und Polieren hergestellt. Ein alternativer Ansatz ist die replikative Glasoptikfertigung. Dieser Ansatz ermöglicht durch seine Skalierbarkeit eine Kostenreduktion der Optikfertigung – besonders im Bereich komplexer Optikdesigns. [1]

Eingesetzt wird das Fertigungsverfahren Präzisionsblankpressen (engl.: precision glass molding, PGM). Bei diesem Verfahren wird ein Glasrohling zwischen zwei Formwerkzeughälften positioniert. Durch Zusammenfahren der Werkzeughälften unter Anwendung von Temperatur und Kraft wird in einer Schutzgasatmosphäre die Optik in ihre Soll-Geometrie überführt. [2, 3] Die benötigte Umformtemperatur ist abhängig von der umzuformenden Glassorte. Jede Glassorte weist eine spezifische Glasübergangstemperatur auf, ab der das Glas ein viskoelastisches Materialverhalten vorweist und eine schädigungsfreie Umformung des Glases erfolgen kann. [4]

1.2 Anforderungen an Formwerkzeugwerkstoffe beim PGM

Aus diesen prozessbezogenen Randbedingungen können Anforderungen an die Formwerkzeugwerkstoffe abgeleitet werden. Nach heutigem Stand der Technik haben sich Hartmetalle, wie zum Beispiel binderloses Nanokorn-Wolframcarbid (n-WC), als Werkstoffe für das Formwerkzeug etabliert. [5, 6] WC kann aufgrund seiner Temperaturbeständigkeit bei Umformprozessen bis 650 °C eingesetzt werden. Dieser Temperaturbereich deckt einen Großteil an Transformationstemperaturen optischer Gläser ab, wie zum Beispiel für Kalk-Natron- (450–600 °C) oder Low-Tg-Gläser (~ 400–600 °C) [7].

Zusätzlich zu der hohen Einsatztemperatur weist WC einige weitere wichtige Werkstoffeigenschaften (hohe Härte, Thermoschockbeständigkeit sowie hohe Temperaturleitfähigkeit) auf, welche für den Einsatz beim PGM Voraussetzung sind. Die hohe Härte des Werkstoffs macht diesen jedoch schwer zerspanbar. Vor diesem Hintergrund wird das Fertigungsverfahren Ultrapräzisionsschleifen (UP-Schleifen) eingesetzt, da eine Fertigung mit definierter Schneide vor diesem Aspekt nicht wirtschaftlich ist [8].

Einige Eigenschaften des Formwerkzeugwerkstoffs stehen in Abhängigkeit seines Fertigungsprozesses. Insbesondere die Korngröße und die Isotropie des Gefüges wird maßgeblich durch die Pulveraufbereitung und Sinterung bestimmt. Geringe durchschnittliche Korngrößen im Sub-Mikrometerbereich, wie sie bei binderlosem n-WC nach heutigem Stand der Technik erreicht werden, bieten beste Voraussetzungen zum Erzeugen geringer Oberflächenrauheiten bei sprödharten Werkstoffen. Im Fall von Kornausbrüchen entstehen nur geringe Defekte, welche die Rauheit beeinflussen. Im Bereich von Oberflächen mit optischer Funktion werden Rauheiten $Sq < \lambda/100$ gefordert [9]. Hieraus ergeben sich Rauheiten im Spektrum der Wellenlängen des sichtbaren Lichts bis $Sq < 4$ nm.

Die Isotopie bestimmt die Homogenität der Temperaturausdehnung und ist somit von hoher Bedeutung für die Präzision der

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-107 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

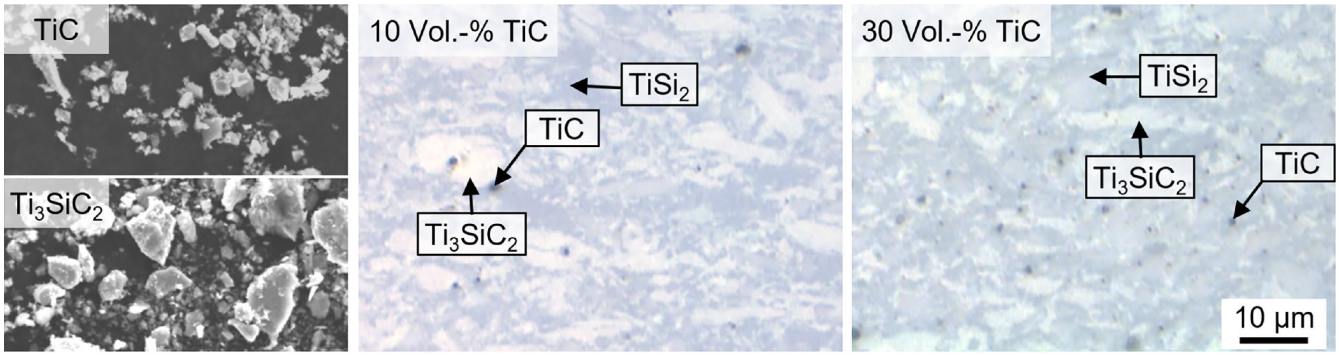

Bild 1. Aufgemahlene Pulverpartikel im Rasterelektronenmikroskop (links), lichtmikroskopische Aufnahme der Mikrostruktur der gesinterten MAX-Komposite mit 10 und 30 Vol.-% TiC Hartphase (rechts). Gleicher Maßstab für alle Teilbilder. *Grafik: IWM RWTH Aachen*

Glasumformung. Hintergrund hierfür sind Kompensationen des Formwerkzeugdesigns, welche Schrumpfungsabweichungen zwischen den sich unterscheidenden Temperaturausdehnungen zwischen Glas und Formwerkzeugwerkstoff ausgleichen. Nur bei einer deterministischen temperaturabhängigen Dehnung der Werkstoffe können diese Kompensationen des Formwerkzeugdesigns erreicht werden.

Binderloses n-WC besitzt einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (engl.: coefficient of thermal expansion, CTE) von $\alpha_{200-500°C} \sim 4{,}5x10^{-6}\ K^{-1}$, während der CTE von Low Tg-Glas $\alpha_{200-500°C} \sim 7x10^{-6}\ K^{-1}$ beträgt. Diese CTE-Unterschiede führen bei einem Formwerkzeug mit einem Durchmesser von 10 mm zu einer Formabweichung im Bereich mehrerer Mikrometer. Ein grober Richtwert für die zulässige Formabweichung von abbildendenden Präzisionsoptiken ist λ/10 der Zielwellenlänge für $\lambda \leq 1$ µm [8]. Dies bedeutet für eine Anwendung im sichtbaren Wellenlängenbereich eine Formabweichung im Sub-Mikrometerbereich.

Konventionell wird diese temperaturbedingte Formabweichung zwischen Formwerkzeug und Glas durch iterative Korrekturschleifen kompensiert. Hierfür wird eine Optik mit dem initialen Werkzeugdesign umgeformt und anschließend vermessen. Die Abweichung der Optikgeometrie zum Soll wird durch das Anpassen (Schleifen) der Werkzeuggeometrie kompensiert. Dieses Verfahren wird iterativ wiederholt, bis die Optik der Spezifikation entspricht.

1.3 MAX-Phasen-Komposite als Werkstoff für den Formwerkzeug

Die Fertigungsprozesskette des PGM könnte deutlich effizienter werden, wenn Formwerkzeuge mit einstellbarem CTE an das Ausdehnungsverhalten des umzuformenden Glases angepasst werden könnten. Der Einsatz eines Werkstoffkomposits, bestehend aus einer Phase mit hohem CTE und einer zweiten Phase mit niedrigerem CTE, bietet diese Möglichkeit, indem der resultierende CTE des Komposits in Abhängigkeit der jeweiligen Phasenanteile eingestellt wird. Ziel der Werkstoffentwicklung ist ein CTE im Bereich von Low Tg-Glas $\alpha_{tech,\ 200-500°C} \sim 7x10^{-6}\ K^{-1}$.

Neben WC existieren weitere Monokarbide wie Siliciumcarbid (SiC) oder Titancarbid (TiC) mit ähnlichen mechanischen und thermophysikalischen Eigenschaften. Ein solcher karbidischer Hartstoff, aber auch Refraktärmetalle wie Molybdän oder Tantal, weisen aufgrund ihrer hohen atomaren Bindungskräfte und Schmelzpunkte stets hohe Härten und vergleichsweise niedrige CTE auf. In der vorliegenden Studie wurde daher TiC als Hartphase mit niedrigem CTE ($\alpha_{20-500°C} \sim 7{,}6x10^{-6}\ K^{-1}$ [10]) ausgewählt. Für die Zweitphase mit hohem CTE wurde auf einen Werkstoff aus der Gruppe der MAX-Phasen zurückgegriffen. Der Begriff MAX-Phase leitet sich aus der chemischen Zusammensetzung $M_{n+1}AX_n$ ab. M steht für ein Übergangsmetall der Gruppe 3 bis 6 im Periodensystem, A für ein Element der Gruppe 13 bis 16 und X für Kohlenstoff oder Stickstoff. In dieser Studie wurde die MAX-Phase Ti_3SiC_2 ausgewählt, um mit einer geringen Anzahl verschiedener Elemente die Interdiffusion mit dem Glas und der Hartphase zu limitieren. Die Elementarzelle von Ti_3SiC_2 weist, wie auch andere MAX-Phasen, einen Wechsel von TiC-Oktaedern und Si-Ebenen auf, wodurch eine einzigartige Kombination typischer keramischer und metallischer Eigenschaften resultiert. Der CTE von Ti_3SiC_2 ist mit $\alpha_{20-1000°C} \sim 9{,}1x10^{-6}\ K^{-1}$ etwa doppelt so hoch, wie der von WC [11]. Bei Verstärkung von Ti_3SiC_2 mit 10–30 Vol.-% TiC kann laut linearer Mischungsregel ein CTE im Bereich $\alpha_{tech,\ 200-500°C} \sim 8{,}2–7{,}8x10^{-6}\ K^{-1}$ erwartet werden. Grundsätzlich wurde der Nachweis eines solcherart einstellbaren CTE von Formwerkzeugen durch Zugabe SiC zu der Ti_3SiC_2 bereits erbracht [12].

Um die höchste Härte des Komposits zu erzielen, ist eine vollständige Verdichtung der gemischten Ausgangspulver TiC und Ti_3SiC_2 (**Bild 1**, links) erforderlich. Das feldunterstützte Sintern erleichtert die Sinterung, indem gepulster Gleichstrom durch das Pulver und das Presswerkzeug geleitet wird. Bei einer Aufheizrate von 200 K/min und einer axialen Druckbeaufschlagung wurde die Pulvermischung innerhalb von 10 Min. bei 1 300 °C zu einem volldichten Kompositwerkstoff gesintert. Die kurzen Haltezeiten vermeiden starkes Kornwachstum im Prozess. Im resultierenden Gefüge liegen die Phasen TiC und Ti3S$_i$C2, aber auch eine neu gebildete Tertiärphase TiSi2 h$_{om}$ogen verteilt und ohne Richtungsabhängigkeit vor (siehe Bild 1, rechts). Die Phasenidentifikation erfolgte mittels Elektronenrückstreubeugung, einem Verfahren, das zusätzlich die Detektion der Korngröße erlaubt. Mit mittleren Korngrößen von 0,41 µm für Ti_3SiC_2, 0,26 µm für TiC und 0,59 µm für $TiSi_2$ liegen die hergestellten Komposite im geforderten Sub-Mikrometerbereich für Formwerkzeuge.

2 Ultrapräzisionsschleifen (UP)

2.1 Diamant-Feinschleifwerkzeuge

In der Studie wird der Einfluss unterschiedlicher Diamant-Feinschleifwerkzeuge auf das Zerspanverhalten in Abhängigkeit

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-107 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle 1. Konfiguration der Schleifwerkzeuge [13].

Maschenweite	Mittlerer Korndurchmesser [µm]	Bindung	Korn-konzentration	Abrasiv	Härte Bindung	Geometrie
#12000	1,25	MB1	C40	Diamant	N	Mounted wheel
#7000	2,14	MB1	C40	Diamant	N	Mounted wheel
#2000	7,5	MB1	C40	Diamant	N	Mounted wheel

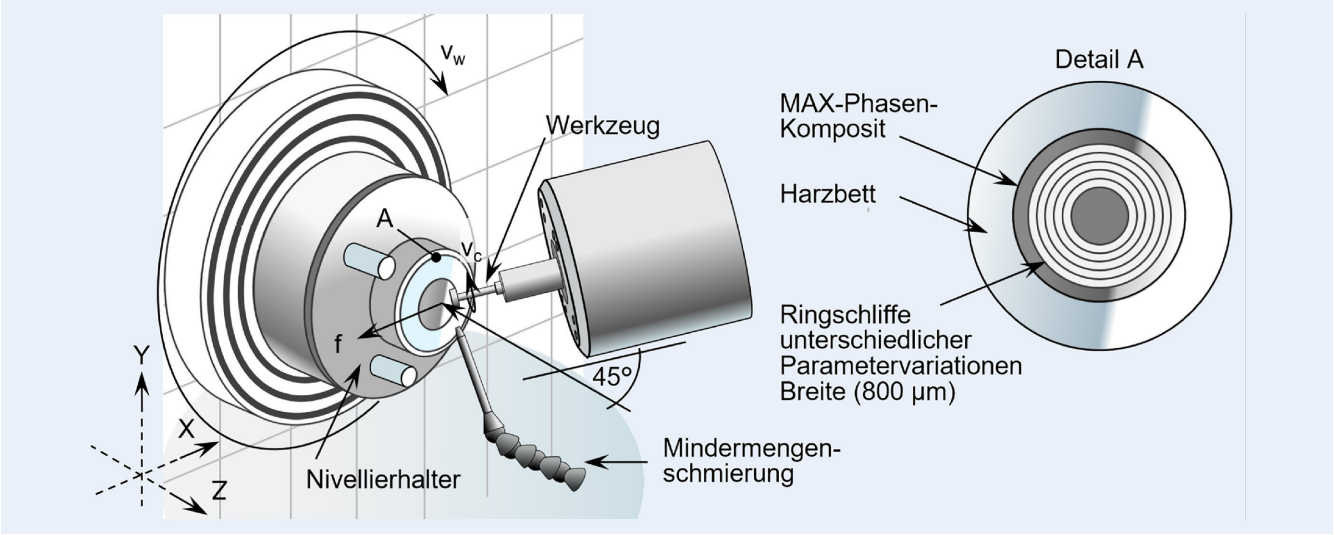

Bild 2. Versuchsaufbau in UP-Maschine (links) und Detailansicht zur Anordnung der Ringschliffe (rechts). *Grafik: Fraunhofer IPT*

des Hartphasenanteils und der Vorschubgeschwindigkeit (v_f) beim UP-Schleifen untersucht. Für diese Untersuchungen wurden drei verschiedene Feinschleifwerkzeuge der Firma Tokyo Diamond Tools MFG. Co., Ltd. verwendet. Die Schleifwerkzeuge unterscheiden sich in ihren mittleren Diamantkorndurchmessern. Alle weiteren Kennwerte sind identisch. **Tabelle 1** zeigt die Konfigurationen der Schleifmittel.

Die Maschenweite beschreibt den mittleren Durchmesser der Abrasivkörner in Mikrometern durch die Gleichung 15000/Maschenweite (#). Die verwendete Bindung MB1 ist eine Metall/Harz-Hybrid-Bindung. Diese Bindung bietet einen Kompromiss aus Verschleißbeständigkeit und erzeugbarer Oberflächengüte (Metall: qualitativ hohe Rauheit und niedriger Verschleiß, Harz: qualitativ niedrige Rauheit und hoher Verschleiß) [13]. Die Geometrie der Schleifwerkzeuge ist in **Bild 2** dargestellt. Der Umfang des zylinderförmigen Schleifmittels ist 8 mm.

Die Auswahl der Bindung und des Abrasivmittels stützt sich auf bereits gewonnene Erkenntnisse vergangener Untersuchungen zum UP-Schleifen am Fraunhofer IPT. Alle weiteren Kennwerte folgen Herstellerempfehlungen. Ziel der Werkzeugauswahl ist es, Oberflächenrauheiten Sq (mittlere quadratische Höhe) und Sa (mittlere arithmetische Höhe) von etwa 5 nm zu erzeugen (siehe Kapitel 1.2).

2.2 UP-Maschine und Schleifkinematik

Die erzeugten Oberflächen wurden auf einer 5-Achs-UP-Maschine („Moore Nanotech 350FG Ultra-Precision Freeform“ Generator) gefertigt. Diese besitzt eine Positioniergenauigkeit im Bereich weniger Nanometer und ist zur Reduktion von Störgrößen in einer schwingungsentkoppelten und temperaturgeregelten Klimakammer installiert. Die Temperatur der Klimakammer ist auf ±0,1 K geregelt. Diese Maßnahmen dienen dem Erhalt der Fertigungspräzision. Bild 2 zeigt schematisch den Versuchsaufbau innerhalb der UP-Maschine sowie die Anordnung der Bearbeitungsversuche (Ringschliffe) auf der Probenoberfläche.

In der Maschinenkammer wurde ein Nivellierhalter mit einem Null-Punkt-Spannsystem auf der Werkstückspindel montiert. Dieses System dient als Aufnahme für die in Harz eingebetteten und vorpolierten Proben. Die Proben weisen eine Ebenheit < 1 µm auf, sind jedoch durch den Polierprozess verkippt. Die Verkippung wurde vor der Bearbeitung durch einen konfokalen Wegmesssensor („CL-3000“ von Keyence) vermessen und durch den Nivellierhalter ausgeglichen. Die Schleifwerkzeuge wurden durch eine luftgelagerte Werkzeugspindel angetrieben, welche sich relativ zu der Probe bewegte. Die Schleifkinematik folgte dem Plan-Umgangs-Längsschleifen mit kreisförmiger Vorschubbewegung mit Punktkontakt im Gleichlauf. Hierbei war das Werkzeug in einem 45°-Winkel zur Probenoberfläche angestellt. Die Schmierung wurde in Form einer Mindermengenschmierung mit Isoparaffin umgesetzt.

2.3 Versuchsdurchführung (UP-Schleifen)

Wie in Kapitel 1.3 erläutert, steht der CTE in Abhängigkeit von dem Hartstoffanteil des MAX-Phasen-Komposits. Um den Mengeneinfluss des Hartstoffs auf das Zerspanverhalten zu beurteilen, werden zwei unterschiedliche Werkstoffkonfigurationen

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-107 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle 2. Übersicht der Prozessparametervariation.

Probe	Maschenweite	Schnittgeschwindigkeit v_c	Schnitttiefe a_e	Vorschub-geschwindigkeit v_f
10 Vol.-% TiC	#2000, #7000, #12000	40 m/s	1 µm	0,1 mm/min, 0,5 mm/min
30 Vol.-% TiC	#2000, #7000, #12000	40 m/s	1 µm	0,1 mm/min, 0,5 mm/min

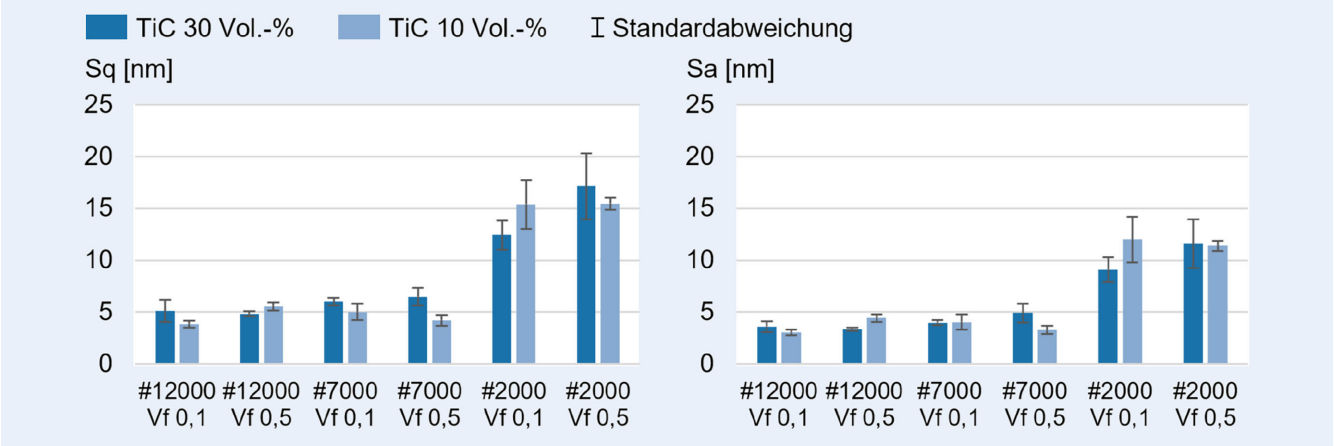

Bild 3. Auswertung der Rauheiten Sq (links) und Sa (rechts). *Grafik: Fraunhofer IPT*

untersucht, 10 und 30 Vol.-% TiC. Ein vorheriges Polieren dient zur Herstellung einheitlicher Einsatzbedingungen vor der Schleifbearbeitung und soll ebenso eine Probenoberfläche mit schädigungsfreier Randzone erzeugen.

Um mehrere Prozessparameter unterschiedlicher Faktoren auf einer Probenoberfläche abzubilden, wurden jeweils sechs Ringe mit einer Breite von 800 µm pro Probe geschliffen. Zum Erhalt der kinematischen Rauheit und somit eines Bahnabstands von 1,6 µm wurde die Werkstückdrehzahl (v_w) auf die Vorschubgeschwindigkeit (v_f) des Werkzeugs angepasst. Hierbei beträgt die Differenz der relativen Schnittgeschwindigkeit (v_{c_rel}) vom äußersten bis zum innersten Ring weniger als 0,5 % und ist somit vernachlässigbar gering. **Tabelle 2** zeigt die variierten Prozessparameter.

Aus dieser Variation entstehen 12 Kombinationen, die jeweils eine Oberfläche ergeben.

Die Analyse der gefertigten Oberflächen wird mithilfe diverser Messtechnik durchgeführt. Zur quantitativen Bewertung der Oberflächenrauheit wird ein Konfokalmikroskop der Firma NanoFocus, Typ „µsurf“, eingesetzt. Zur qualitativen Bewertung der Oberflächen werden hochauflösende Aufnahmen mittels der Rasterelektronenmikroskopie (REM) des Herstellers Carl Zeiss AG, Typ „GeminiSEM 360“, erzeugt. Zuletzt sollen anhand des DME DualScope (Typ „DS95–50“) Rasterkraftmikroskops (engl.: Atomic Force Microscope, AFM) Schleifriefen quantitativ und qualitativ ausgewertet werden.

3 Versuchsergebnisse

Bild 3 zeigt die mithilfe der Konfokalmikroskopie (Messfeldgröße 100 x 100 µm) ermittelten Flächenrauheiten Sq und Sa grafisch.

Die im Bild gezeigten Messwerte ergeben sich aus dem arithmetischen Mittel von je fünf Einzelmessungen. Zu erkennen ist, dass das Werkzeug mit der Maschenweite #2000 Rauheiten Sq und Sa ≥ 9 nm erzeugt. Dem gegenüber stehen die Werkzeuge mit den Maschenweiten #7000 und #12000. Diese Werkzeuge erzeugen Rauheiten im Bereich Sq 5 ± 1 nm und Sa 4 ± 1 nm. Die Differenz der Messwerte Sq zu Sa beträgt im Bereich des Werkzeugs mit der Maschenweite #2000 ~ 5 nm. Bei den Werkzeugen mit den Maschenweiten #7000 und #12000 beträgt die Differenz ~ 2 nm.

Bild 4 zeigt ausgewählte Messfelder (160 µm x 160 µm) der Konfokalmikroskopie.

Zu erkennen ist, dass der Peak-to-Valley-Wert (P-V) mit steigender Diamantkorngröße zunimmt. Zudem wird im Detailausschnitt des linken Bildes der Bahnabstand (1,6 µm) sichtbar. Das hell abgegrenzte Gefüge deutet auf den sogenannten Spring-Back-Effekt hin. Hierbei wird die Hartphase durch den Krafteinfluss des Werkzeugs in die im Verhältnis weiche Bindephase gedrückt. Die Hartphase federt nach der Bearbeitung aus der elastischen Bindephase zurück, es entsteht eine Höhendifferenz. Die gemessene Höhendifferenz dieser Phase beträgt ~ 20 nm.

Zur Beurteilung des Zerspanverhaltens im Bereich der Nano-Rauheit wurden Bilder im Rasterelektronenmikroskop aufgenommen. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf eine spröde oder duktile Zerspanung im Bereich der Nano-Rauheit. **Bild 5** zeigt den Einfluss der Maschenweite der Schleifwerkzeuge sowie des Mengengehalts der Hartphase auf das Zerspanverhalten.

Wie bereits quantitativ festgestellt, erzeugt das Werkzeug mit der Maschenweite #2000 die raueste Topografie. Die Topografie zeigt im Vergleich zu den Oberflächen der anderen Werkzeuge breite Schleifriefen mit teilweise sprödem Materialverhalten. Des Weiteren können vermehrt Ausbrüche (> 1 µm) aus der Probenoberfläche beobachtet werden (Bild 5, links oben). Global

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-107 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

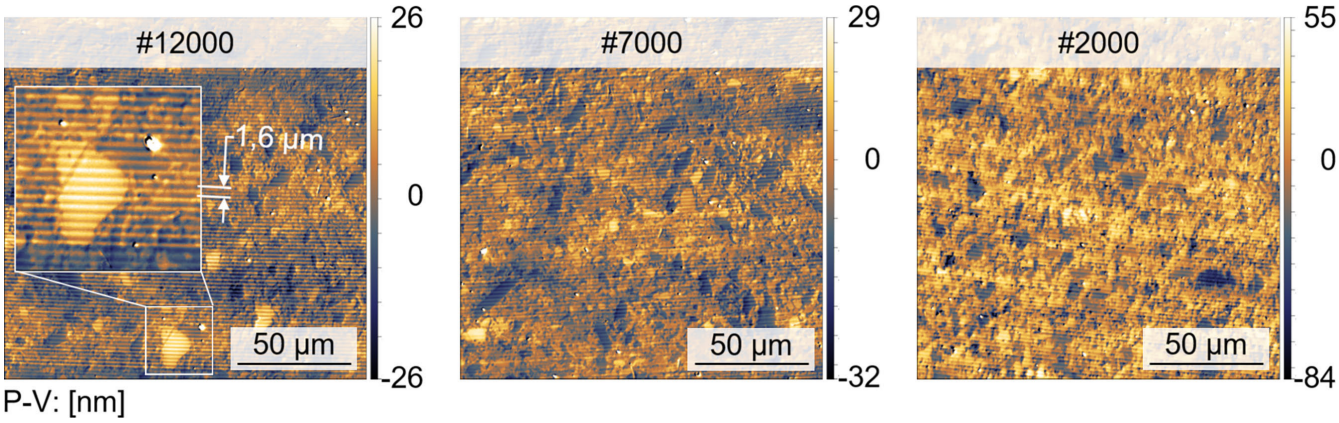

Bild 4. Messfelder Konfokalmikroskop 30 Vol.-% TiC mit v_f 0,5 mm/min Vorschubgeschwindigkeit. *Grafik: Fraunhofer IPT*

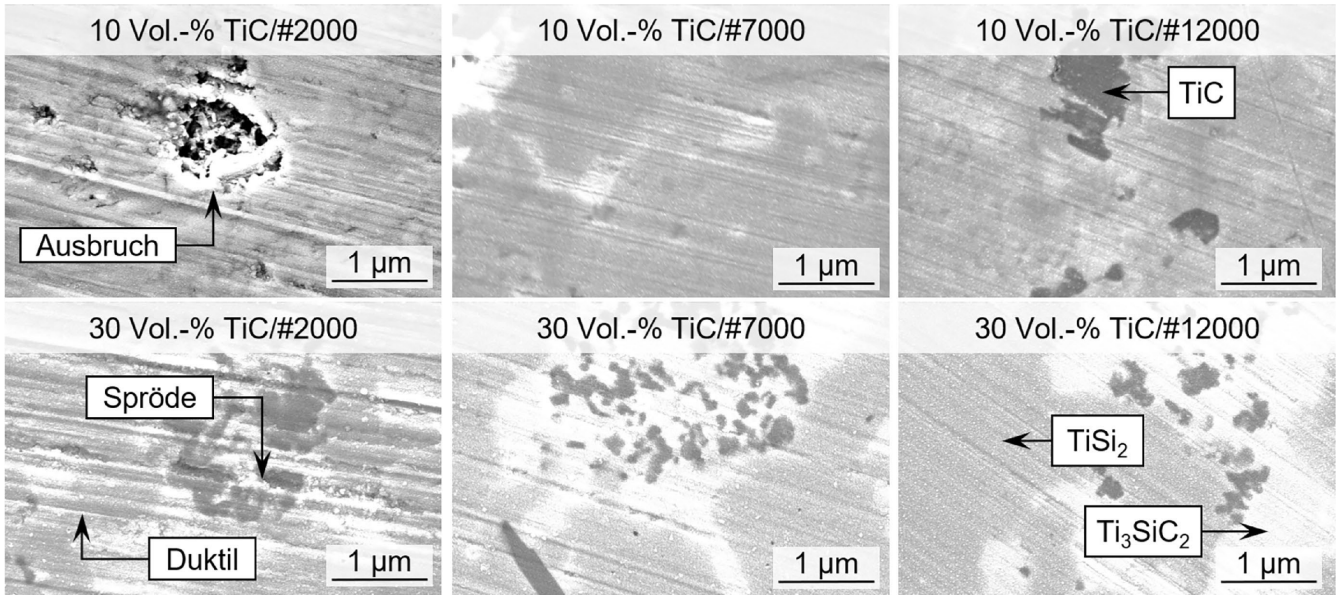

Bild 5. Sekundärelektronenbilder zum Einflussverhalten des Mengengehalts der Hartphase und der Maschenweite der Werkzeuge bei einer Vorschubgeschwindigkeit v_f = 0,5 mm /min. *Grafik: Fraunhofer IPT*

betrachtet ist das Zerspanverhalten der Bearbeitung mit dem Werkzeug der Maschenweite #2000 als spröde zu bewerten. Diese Beobachtung steht nicht in Abhängigkeit mit dem Mengengehalt der Hartphase, da kein signifikanter Unterschied der Topografie zu erkennen ist. Mit sinkender Maschenweite verringert sich die Breite der Schleifriefen, während die Frequenz der Schleifriefen steigt. Die durch diese Werkzeuge erzeugten Riefen weisen eine vollständig duktil verlaufende Zerspanung auf.

Defekte der Topografie in Form von Sprödbruch sind nicht dokumentiert. Eine Abhängigkeit vom Mengenanteil der Hartstoffphase besteht nicht, da auch hier keine signifikanten Unterschiede der Topografie beobachtet werden können. Die Aufnahmen zeigen zudem, dass die Zerspanung unabhängig von einzelnen Phasen im polykristallinen Gefüge ist, da sich das Zerspanverhalten im Übergang einzelner Phasen nicht ändert.

Ein beschreibbarer Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit kann nur im Bereich des Schleifwerkzeugs mit den Maschenweiten #2000 beobachtet werden. **Bild 6** zeigt eine Gegenüberstellung der erzeugten Topografien bei variierenden Maschenweiten und Vorschubgeschwindigkeiten.

Es ist festzustellen, dass bei den mit dem Werkzeug der Maschenweite #2000 gefertigten Oberflächen ein Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf das Zerspanverhalten besteht. Eine Vorschubgeschwindigkeit von v_f = 0,5 mm/min führt im Vergleich zu einer geringen Vorschubgeschwindigkeit von v_f = 0,1 mm/min zu häufiger auftretenden Schleifriefen mit einem spröden Zerspanverhalten (Schleifriefen zeigen Sprödbruch). Die durch Werkzeuge mit den Maschenweiten #7000 und #12000 bearbeiteten Oberflächen zeigen keine beschreibbaren Unterschiede hinsichtlich der Topografie.

Durch die Analyse der AFM-Messungen wird die Erstellung detaillierter dreidimensionaler Aufnahmen der Schleifriefen ermöglicht. Hierbei kann die Tiefe und Breite der einzelnen Schleifriefen quantitativ bestimmt werden. **Bild** 7 zeigt die mithilfe des AFM aufgenommen Messfelder der Probe mit 30 Vol.-% TiC und einer Vorschubgeschwindigkeit v_f = 0,1 mm/min.

Schleifriefen mit der geringsten Breite und Tiefe konnten bei dem Werkzeug mit den Maschenweite #12000 identifiziert werden. Im Detail A des linken Bildes werden diese dargestellt. Die Schleifriefen im Zentrum der Kavität des Detailausschnitts A besitzen einen mittleren Abstand von ~ 130 nm und eine mittlere

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-107 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

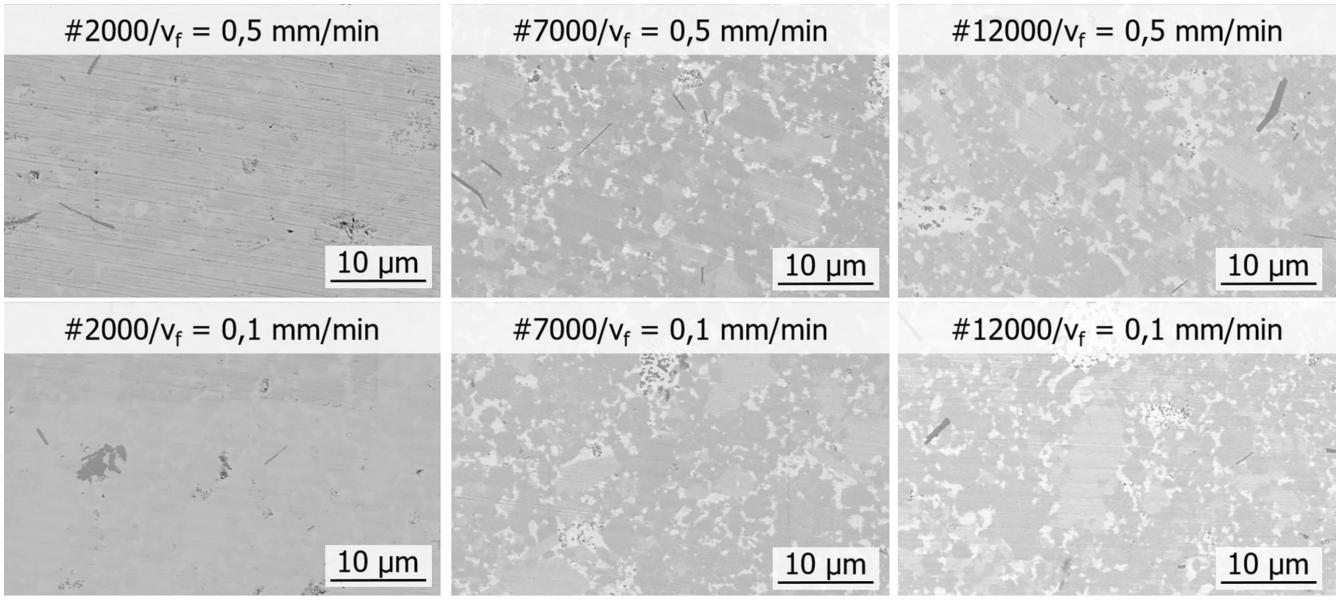

Bild 6. Sekundärelektronenbilder zum Einflussverhalten der Maschenweite der Werkzeuge und der Vorschubgeschwindigkeit. Probe mit 30 Vol.-% TiC. *Grafik: Fraunhofer IPT*

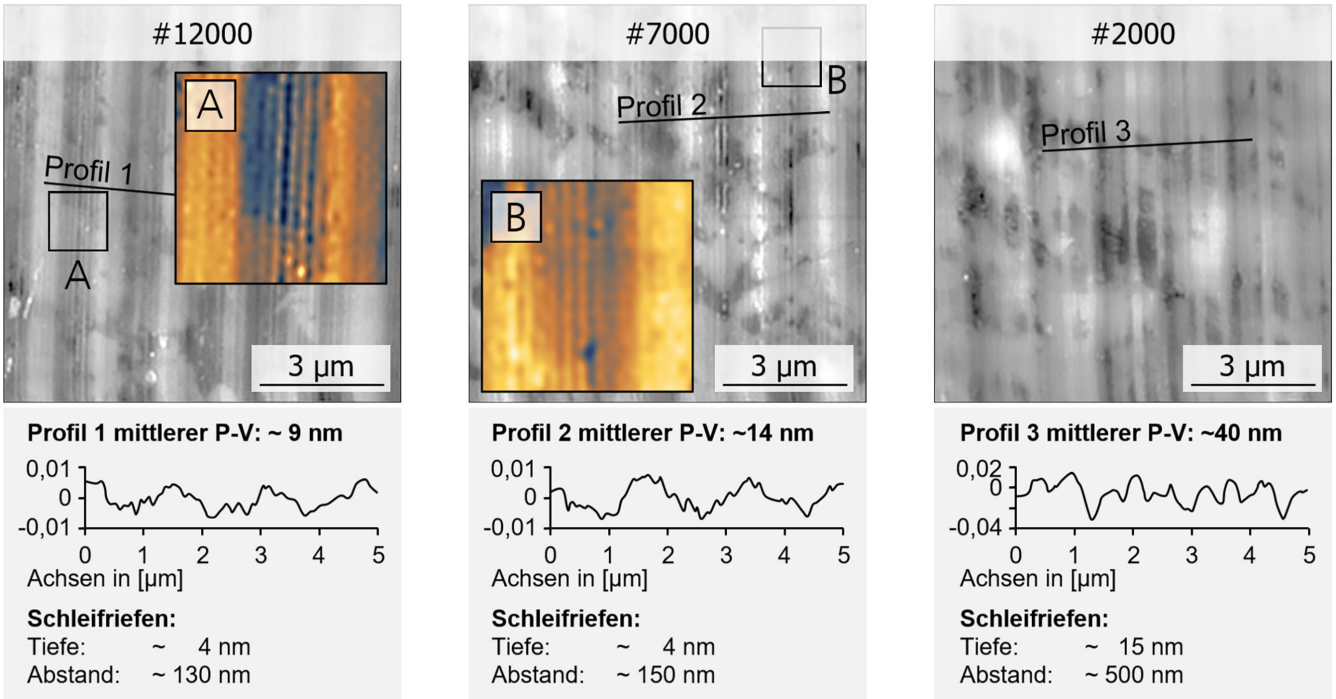

Bild 7. AFM-Aufnahmen der geschliffenen Probenoberfläche mit Detailauflösung von Schleifriefen und Profilschnitten. Probe 30 Vol.-% TiC bei einer Vorschubgeschwindigkeit v_f = 0,1 mm/min. *Grafik: Fraunhofer IPT*

Tiefe von ~ 4 nm. Im Profilschnitt 1 kann die mittlere Welligkeit (P-V) pro Periode des Bahnabstands mit ~ 9 nm angegeben werden. Schleifriefen, welche aus der Bearbeitung mit dem Werkzeug der Maschenweite #7000 entstanden sind, besitzen einen ähnlichen Abstand von ~ 150 nm (Detail B). Ebenso ist die mittlere Tiefe der Schleifriefen des ausgewerteten Messfeldes B ähnlich (~ 4 nm). Lediglich die mittlere Welligkeit pro Periode des Bahnabstands ist mit ~ 14 nm unterschiedlich. Die Auswertung der Schleifriefen, welche mit dem Werkzeug der Maschenweite #2000 gefertigt wurden, ergeben einen mittleren Abstand von ~ 500 nm und einer mittleren Tiefe von ~ 15 nm. Die mittlere Welligkeit pro Periode des Bahnabstands beträgt ~ 40 nm.

4 Diskussion der Ergebnisse

Die quantitative Auswertung zeigt, dass die Maschenweite der Schleifwerkzeuge – somit die Größe der Diamantkörner – im Vergleich zu den anderen betrachteten Faktoren (Vorschubgeschwindigkeit und Mengenanteil Hartphase) einen signifikanten Einfluss auf die erzeugte Rauheit besitzt. Eine Kausalität der wei-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-107 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

teren Einflussfaktoren auf die Oberflächentopografie und somit auf die Rauheit kann nicht festgestellt werden, da keine systematischen und signifikanten Abweichungen der Rauheiten nachgewiesen werden.

Die Gegenüberstellung der Rauheiten der beiden Auswertemethodiken Sq und Sa stützen die mithilfe der anderen Analysemethoden (REM und AFM) gewonnen Erkenntnisse. Geringe Abweichungen der Rauheiten zwischen Sq und Sa im Bereich der Werkzeuge mit den Maschenweiten #7000 und #12000 weisen auf ein duktiles Zerspanverhalten hin, da die Methodik Sq die Z-Profilhöhe quadratisch berücksichtigt und somit Peaks, welche aus Artefakten eines Sprödbruchs resultieren, verstärkt in die Rauheit eingehen. Dieses Phänomen zeigt sich bei der Auswertung der Rauheiten der Werkzeuge mit der Maschenweite #2000. Hier wird eine Differenz von ~ 5 nm zwischen den Sq und Sa Werten sichtbar. Es kann auf ein im Verhältnis sprödes Zerspanverhalten rückgeschlossen werden.

Der Erklärungsansatz zum Einflussverhalten der Diamantkorngrößen auf die Oberflächentopografie basiert auf den Erkenntnissen der REM- und AFM-Analysen. Diese hochauflösenden Aufnahmen zeigen, dass die variierenden Rauheiten in Abhängigkeit variierender Schleifriefen existieren. Hierbei wird die Ausprägung der Schleifriefen maßgeblich durch die Diamantkorngrößen der Werkzeuge bestimmt. Die großen Schleifkörner des Werkzeugs mit der Maschenweite #2000 führen im Vergleich zu den Werkzeugen mit den Maschenweiten #7000 und #12000 zu großen Schleifriefen (Breite: ~500 nm, Tiefe: ~15 nm). Die daraus resultierende Topografie zeigt häufig auftretende Charakteristiken eines spröden Zerspanverhaltens (Sprödbruch).

Ebenso können vermehrt Ausbrüche > 1 µm (Bild 5) aus der Probenoberfläche beobachtet werden. Ein Erklärungsansatz zur Ursache dieses Phänomens ist, dass aus der Bearbeitung mit der Maschenweite #2000 und der Vorschubgeschwindigkeit v_f = 0,5 mm/min im Verhältnis zu den anderen Faktorvariationen hohe Schleifkräfte resultieren. Diese hohen Schleifkräfte folgen aus hohen Spanungsdicken, welche aus der beschriebenen Faktorvariation folgen. Diese Kräfte induzieren verhältnismäßig hohe Spannungen im polykristallinen Gefüge, sodass lokale, kritische Spannungen zu den massiven Ausbrüchen des Gefüges führen. Eine Korrelation zwischen der Spanungsdicke und Eigenspannungen konnte bereits beschrieben werden. Geringere Spanungsdicken führen zu geringeren Eigenspannungen [14]. Ein anderer Erklärungsansatz ist, dass bereits strukturgeschwächte Gefügebestandteile den induzierten Spannungen dieser Bearbeitung nicht standhalten und als Folge derer ausbrechen. Eine Dominanz des zweiten Erklärungsansatz scheint wahrscheinlicher. Die Regelmäßigkeit des Auftretens dieser Ausbrüche lässt dies vermuten. Durch Schleifkräfte hervorgerufene Ausbrüche dieser Art sollten regelmäßiger auftreten als beobachtet.

Die verhältnismäßig geringen Diamantkorngrößen der Werkzeuge mit den Maschenweiten #7000 und #12000 erzeugen Schleifriefen, welche zu einer vollumfänglich duktilen Zerspanung führen. Zu erwähnen ist, dass alle Werkzeuge die gleiche Kornkonzentration (C40) aufweisen. Hierbei gibt der Hersteller der Werkzeuge die Konzentration der Diamanten in Karat an. Somit besitzen alle Werkzeuge die gleichen Massenanteile Diamant. Die Schneidendichte ist aus diesem Grund abhängig von der Diamantkorngröße. Die Schneidendichte bestimmt die Schleifriefenabstände (die Frequenz der Schleifriefen). Da die mittleren Diamantkorngrößen der Werkzeuge mit den Maschenweiten #12000 und #7000 nur geringfügig abweichen (~ 1 µm), ergibt sich eine ähnliche Schneidendichte. Dieses Phänomen kann in Bild 7 (Detailausschnitte) beobachtet werden. Das Fehlen dieser feinen Schleifriefen in der rechten Darstellung von Bild 7 wird auf die größeren Diamantkörner der Maschenweite #2000 zurückgeführt. Eine mögliche Erklärung des Zerspanverhaltens ist das Über- oder Unterschreiten einer kritischen materialspezifischen Spanungsdicke [15]. Die nur wenige Nanometer tiefen Schleifriefen der Werkzeuge mit den Maschenweiten #7000 und #12000 sind – so vermutet – unterhalb der kritischen Spanungsdicke. Die mit der Maschenweite #2000 gefertigten Oberflächen zeigen tiefere und breitere Schleifriefen. Diese sind – so vermutet – teilweise oberhalb der kritischen Spanungsdicke und führen zu einem spröden Zerspanverhalten.

Diese Beobachtung deckt sich mit bereits gewonnenen Erkenntnissen anderer Arbeiten. So wurde bereits beschrieben, dass das Reduzieren der Schneidendichte dazu führt, dass tiefere Schleifriefen resultieren. Hierbei entstehen an den Schneiden lokal höhere Schneidkräfte. Diese höheren Schneidkräfte bedeuten ebenso eine höhere mechanische Belastung der zu bearbeitenden Oberfläche. [14] Dies begünstigt ein sprödes Zerspanverhalten.

Zuletzt zeigen die Analysen der REM-Aufnahmen (Bild 5), dass die Zerspanung unabhängig der verschiedenen Phasenanteile des polykristallinen Gefüges ist. Die Ausprägung der Schleifriefen wird nicht durch den Übergang unterschiedlicher Phasen beeinflusst. Diese Erkenntnis stützt die quantitativen Ergebnisse der Rauheit. Bei diesen Untersuchungen konnte keine beschreibbare Abhängigkeit der Rauheit zum Massenanteil der TiC-Verstärkung dokumentiert werden.

5 Zusammenfassung

Im Kontext der Formwerkzeugfertigung für das PGM kann gezeigt werden, dass die MAX-Phasen-Komposite im Rahmen der UP-Schleifbearbeitung duktil zerspant werden können. Die erzielten Oberflächenrauheiten entsprechen einer optischen Güte (Sq ~ 5 nm) und sind somit zur Replikation von Präzisionsoptiken aus Glas geeignet. Diese Aussage gilt für die Werkzeuge mit den Maschenweiten #7000 und #12000. Das Werkzeug mit der Maschenweite #2000 konnte diese Oberflächengüte nicht erreichen.

Ein signifikantes Einflussverhalten des Mengengehalts der Hartphase TiC auf das Zerspanverhalten konnte nicht beobachtet werden. Ebenso ist ein beschreibbarer Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die gefertigte Oberflächentopografie nur bei dem Werkzeug mit der Maschenweite #2000 dokumentiert.

Da der in dieser Studie vorliegende Werkstoff noch nicht im Zusammenhang mit der UP-Schleifbearbeitung zerspant wurde, sollen die Ergebnisse dieser Arbeit einer Einschätzung zur Eignung des Werkstoffs im Bereich dieser Zerspanung dienen. Zukünftige Untersuchungen müssen nun Prozessgrenzen im Kontext dieser Zerspanung definieren und die Bearbeitung im Sinn einer industriellen Nutzung optimieren.

FÖRDERHINWEIS

Förderorganisation (Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG)
Förder-Projekt-Kennung (506535305)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-107 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Literatur

[1] Yi, A. Y.; Huang, C.; Klocke, F. et al.: Development of a compression molding process for three-dimensional tailored free-form glass optics. Applied optics 45 (2006), 25, pp. 6511–6518
[2] Friedrichs, M.; Grunwald, T.; Bergs, T.: Mold protective coatings for precision glass molding. Proceedings Volume 12219, Polymer Optics and Molded Glass Optics: Design, Fabrication, and Materials 2022, San Diego, United States, doi.org/10.1117/12.2633076
[3] Zhang, L.; Liu, W.: Precision glass molding: Toward an optimal fabrication of optical lenses. Frontiers of Mechanical Engineering 12 (2017) 1, pp. 3–17
[4] Vu, A. T.; Vu, A. N.; Grunwald, T. et al.: Modeling of thermo-viscoelastic material behavior of glass over a wide temperature range in glass compression molding. Journal of the American Ceramic Society 103 (2020) 4, pp. 2791–2807
[5] Sun, S.; Li, K.; Chu, W. et al.: Tungsten carbide molds for precision glass molding process: Mechanism of high-temperature degradation. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 105 (2022) #105841
[6] Chao, C.-L.; Chang, C.-J.; Chen, C.-C. et al.: Precision grinding of tungsten carbide mold insert for molding of sub-millimeter glass aspheric lenses. Proceedings Volume 8769, International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology (icOPEN2013), Singapore, 2013, doi.org/10.1117/12.2021120
[7] Ohara GmbH: L-LAH53. Datenblatt. Stand 12/2019 Internet: www.ohara-gmbh.com/fileadmin/user_upload/export-data/pdf/product_datasheets/L-LAH53_Deutsch_.pdf. Zugriff am 20.09.2024
[8] Brinksmeier, E.; Mutlugünes, Y.; Klocke, F. et al.: Ultra-precision grinding. CIRP Annals 59 (2010) 2, pp. 652–671
[9] Jahnel, K.; Michels, R.; Wilhelm, D. P. et al.: Investigation of Surface Integrity Induced by Ultra-Precision Grinding and Scratching of Glassy Carbon. Micromachines 14 (2023) 12, #2240; doi.org/10.3390/mi14122240
[10] Song, G.-M.; Zhou, Y.; Kang, S.-J. L. et al.: Effect of carbon fibers on the thermophysical properties of TiC composites. Journal of Materials Science Letters 21 (2002) 24, pp. 1733–1736
[11] Barsoum, M. W.: MAX phases. Properties of machinable ternary carbides and nitrides. Weinheim: Wiley-VCH 2013
[12] Fries, S.; Herzog, S.; Wilhelm, D. P. et al.: Moulding Materials with Tailored Coefficient of Thermal Expansion for Glass Forming. Ceramic forum international cfi 101 (2024) 1, pp. E73-E76 (2024).
[13] Tokyo Diamond Tools MFG. Co., Ltd.: Basic information about grinding tools. Types & characteristics of bonds. Stand: 2024. Internet: www.tokyodiamond.com/english/technical/grindingtool#technical_detail_content5. Zugriff am 20.09.2024
[14] Hauk, V. (Hrsg.): Residual stresses. Papers presented at the European Conference on Residual Stresses, 1992, Frankfurt a. M., Germany. Oberursel: DGM Informationsgesellschaft 1993
[15] Bifano, T. G.; Dow, T. A.; Scattergood, R. O.: Ductile-Regime Grinding: A New Technology for Machining Brittle Materials. Journal of Engineering for Industry 113 (1991) 2, pp. 184–189

Dennis Patrick Wilhelm, M.Sc.
info@mti.rwth-aachen.de
Tel. +49 / 241 80-274 01
Foto: Fraunhofer IPT

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs
RWTH Aachen University
Manufacturing Technology Institute MTI
Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen
www.mti.rwth-aachen.de

Kirk Jahnel, M.Sc.
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Steinbachstr. 17, 52074 Aachen
Tel. +49 241 8904-0
info@ipt.fraunhofer.de
www.ipt.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Simone Herzog

Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann
RWTH Aachen University
Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau IWM
Augustinerbach 4, 52062 Aachen
Tel. +49 241 80 95315
sekretariat@iwm.rwth-aachen.de
www.iwm.rwth-aachen.de

LIZENZ
Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-107 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access -