

1 Einleitung

Introduction

Technischen Keramiken kommen aufgrund ihrer essentiellen Funktionalität und vielfältigen Leistungsfähigkeit Schlüsselrollen in vielen hochspezialisierten Bereichen wie der Chemieindustrie, der Medizintechnik, der Raumfahrt oder dem Werkzeugbau zu. Der hohe Bedarf an diesen Werkstoffen zeigt sich unter anderem durch den von 2019 bis 2021 um 18,9 % gestiegenen Umsatz der deutschen Keramikindustrie im Bereich der technischen Keramiken [STAT22]. Die hohe Festigkeit, Härte und Abriebfestigkeit in Kombination mit geringer Dichte, chemischer Beständigkeit und thermischer Stabilität bilden die vorteilhaften Eigenschaften, die in diesen Anwendungsgebieten gefordert sind. Diese Eigenschaftskombinationen ermöglichen unter anderem ein hervorragendes tribologisches Verhalten in korrosiven Medien, weshalb Keramiken beispielsweise als Hülsen oder Zahnräder in chemischen Pumpen sowie als Gleitlager oder Schneidwerkzeuge eingesetzt werden. Darüber hinaus finden Keramiken als Gehäusestrukturen für optische Messsysteme Anwendung, da diese Bauteile sowohl eine hohe Steifigkeit als auch eine geringe thermische Ausdehnung bei gleichzeitig geringer Dichte aufweisen müssen. Trotz dieser hohen Vielfältigkeit können die Keramiken nicht in allen Anwendungsgebieten, in denen diese vorteilhaften Eigenschaften gefordert sind, verwendet werden. Die limitierte Einsetzbarkeit ist weitestgehend auf die hohe Härte und das spröde Bruchverhalten zurückzuführen, weshalb überwiegend nur Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide wie das Schleifen, Läppen oder Polieren genutzt werden können. Zur Fertigung komplexer Geometrien muss die Prozesskette derart gestaltet werden, dass ein Grünling vor dem Sinterprozess zerspanend bearbeitet wird. Durch Schwindungsvorgänge während des Sinterprozesses kann es am Endbauteil zu Formfehlern und somit zum Ausschuss kommen. Bedingt durch die Fertigungseinschränkungen können die Potenziale der Keramiken nicht vollumfänglich ausgeschöpft werden.

Die hohe Härte und das spröde Bruchverhalten der Keramiken erfordern zur präzisen Fertigung komplexer Geometrien ein Verfahren wie die Drahtfunkenerosion. Das kontaktlose und kraftfreie Wirkprinzip der Funkenerosion, das sich durch die thermische Einwirkung von elektrischen Entladungen ergibt, ist unabhängig von den mechanischen Werkstoffeigenschaften. Deshalb ist die Fertigung von filigranen Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen in hochfesten Werkstoffen wie Hartmetallen oder Keramiken möglich. Dennoch bedarf das Prinzip einer elektrischen Mindestleitfähigkeit, die bei den meisten Keramiken nicht gegeben ist. In den letzten Jahrzehnten wurde an der Entwicklung neuartiger Kompositkeramiken geforscht, die mindestens eine weitere Phase mit einer elektrischen Leitfähigkeit enthalten. Durch die homogene Verteilung einer leitfähigen Dispersion, auch Dotieren genannt, bildet sich im Werkstoff ein Perkolationsnetzwerk aus, das eine elektrische Leitfähigkeit des gesamten Bauteils und eine damit einhergehende Erodierbarkeit ermöglicht.

Moderne Drahterosionsmaschinen verfügen über eine Vielzahl an implementierten Standarderosionstechnologien für unterschiedliche metallische Werkstoffklassen, da

die thermischen und elektrischen Eigenschaften eines Werkstoffs Auswirkungen auf den Prozess haben. Bislang existieren jedoch keine Standardtechnologien zur Bearbeitung von Keramiken, was unter anderem auf das breite Spektrum an Keramiken mit unterschiedlichen thermischen und elektrischen Eigenschaften zurückzuführen ist. Des Weiteren liegen bei Keramiken, neben dem von metallischen Werkstoffen bekannten Abtragmechanismus Schmelzen und Verdampfen, noch weitere Abtragmechanismen vor. Bisherige Forschungsarbeiten widmeten sich hauptsächlich der Identifikation der Abtragmechanismen, wobei sich ein starker Einfluss des Sauerstoffs im wasserbasierten Dielektrikum auf die resultierende Oberflächenintegrität in Form von Korrosion ergeben hat. Generell bestehen weder Untersuchungen hinsichtlich der Auswirkung dieser Abtragmechanismen auf charakteristische Zielgrößen des Drahterosionsprozesses noch liegen Erkenntnisse vor, wie eine Erosionstechnologie zur optimalen Bearbeitung einer spezifischen Keramik angepasst werden muss. Darüber hinaus wurden keine drahtfunkenerosiven Untersuchungen unter Verwendung eines kohlenwasserstoffbasierten (CH-basierten) Dielektrikums durchgeführt, was aufgrund des fehlenden Sauerstoffs vielversprechende Ergebnisse liefern kann.

Da die thermische Energie der Funkenentladung die Oberflächenintegrität verändert und diese wiederum eine Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften hat, werden Nachschnitte mit geringer Entladeenergie zur Reduktion dieser Veränderungen genutzt. Für keramische Werkstoffe ist der Einfluss von niederenergetischen Nachschnitten auf die Verbesserung der Oberflächenintegrität und die resultierenden mechanischen Eigenschaften bisher wissenschaftlich nicht erforscht. Aufgrund der fehlenden Untersuchungen ist ein werkstoff- und anwendungsgerechter Einsatz der Drahtfunkenerosion zur Bearbeitung von Keramiken mit unterschiedlichen Abtragmechanismen aktuell nicht möglich. Daher soll in dieser Arbeit die drahtfunkenerosive Bearbeitung von elektrisch leitfähigen Keramiken im CH-basierten Dielektrikum detailliert analysiert werden.

Zunächst werden in Abhängigkeit von den elektrischen Prozessparametern die dominierenden Abtragmechanismen von drei unterschiedlichen Keramiken im CH-basierten Dielektrikum identifiziert sowie deren Einfluss auf die Prozessproduktivität und -stabilität ermittelt. Danach wird die erzielbare Verbesserung der Oberflächenintegrität durch die Verwendung von Nachschnitten analysiert, um darauffolgend die Auswirkung unterschiedlicher Oberflächenintegritäten auf die Biegefestigkeit zu untersuchen. Zusätzlich wird ein erster Ansatz für eine FEM-Simulation vorgestellt, mit dem thermisch induzierte Spannungen berechnet werden, um die Randzonenschädigung abschätzen zu können. Durch diese Analysen kann eine Klassifikation der Bearbeitbarkeit elektrisch leitfähiger Keramiken im CH-basierten Dielektrikum auf Basis der dominierenden Abtragmechanismen ermöglicht werden. Zum einen befähigt diese Klassifikation die Maschinenhersteller zur Implementierung keramikspezifischer Erosionstechnologien. Zum anderen dient sie zur Auswahl einer initialen Technologie, die mithilfe einer selbstentwickelten Optimierungssoftware so angepasst wird, dass eine Steigerung der Prozessproduktivität erreicht werden kann.

Introduction

Due to their essential functionality and versatile performance, technical ceramics play key roles in many highly specialized sectors such as the chemical industry, medical technology, aerospace and toolmaking. The high demand for these materials is reflected, for instance, by the 18.9% increase in sales of technical ceramics in the German ceramics industry from 2019 to 2021 [STAT22]. The high strength, hardness and abrasion resistance in combination with low density, chemical resistance and thermal stability provide the advantageous properties required in these application areas. These property combinations enable, among other things, excellent tribological behavior in corrosive media, which is why ceramics are used, for example, as sleeves or gear wheels in chemical pumps and as plain bearings or cutting tools. In addition, ceramics are used as housing structures for optical measuring systems, since these components must have both high stiffness and low thermal expansion combined with low density. Despite this high versatility, ceramics cannot be used in all applications where these advantageous properties are required. The limited applicability is largely due to the high hardness and brittle fracture behavior, for which reason only manufacturing processes with geometrically undefined cutting edges, such as grinding, lapping or polishing, can be used. For the production of complex geometries, the process chain must be designed in such a way that a green compact is machined before the sintering process. Shrinkage occurs during the sintering process, which can lead to shape defects in the final component and thus to rejects. Due to the manufacturing restrictions, the potential of the ceramics cannot be fully exploited.

The high hardness and brittle fracture behavior of ceramics require a process such as wire electrical discharge machining (EDM) for the precise production of complex geometries. The non-contact and force-free working principle of EDM, which results from the thermal action of electrical discharges, is independent of the mechanical material properties. Therefore, the production of filigree structures with high aspect ratios in high-strength materials such as hard metals or ceramics is possible. Nevertheless, the principle requires a minimum electrical conductivity, which is not present in most ceramics. In recent decades, research has been conducted into the development of new types of composite ceramics that contain at least one additional phase with electrical conductivity. Through the homogeneous distribution of a conductive dispersion, also known as doping, a percolation network is formed in the material, which enables electrical conductivity of the entire component and the associated erodibility.

Modern wire EDM machines have a variety of implemented standard EDM technologies for different metallic material classes, since the thermal and electrical properties of a material have an impact on the process. To date, there are no standard technologies for machining ceramics, which is partly due to the wide range of ceramics with different thermal and electrical properties. In addition to the melting and vaporization mechanisms familiar from metallic materials, ceramics also have further removal mechanisms. Previous research has been mainly devoted to the identification of the

removal mechanisms, showing a strong influence of oxygen in the water-based dielectric on the resulting surface integrity in the form of corrosion. In general, there are no investigations regarding the impact of these removal mechanisms on characteristic target parameters of the wire EDM process, nor is there any knowledge on how to adapt an erosion technology for optimal machining of a specific ceramic. Furthermore, no wire erosion tests have been performed using a hydrocarbon-based (CH-based) dielectric, which may provide promising results due to the lack of oxygen.

Since the thermal energy of the electrical discharges changes the surface integrity, which in turn has an effect on the mechanical properties, low energy trim cuts are used to reduce these changes. For ceramic materials, the influence of low energy trim cuts on the improvement of surface integrity and the resulting mechanical properties has not been scientifically investigated so far. Due to the lack of investigations, a material- and application-oriented use of wire EDM for the machining of ceramics with different removal mechanisms is currently not possible. Therefore, the wire EDM of electrically conductive ceramics in CH-based dielectric will be analyzed in detail in this work.

First, the dominant removal mechanisms of three different ceramics in CH-based dielectrics are identified as a function of the electrical process parameters and their influence on the process conditions is determined. Afterwards, the achievable improvement of the surface integrity by using trim cuts is analyzed in order to subsequently investigate the effect of different surface integrities on the bending strength. In addition, a first approach for a FEM simulation is presented to calculate thermally induced stresses in order to estimate rim zone damage. These analyses enable a classification of the machinability of electrically conductive ceramics in CH-based dielectrics based on the dominant removal mechanisms. On the one hand, this classification enables machine manufacturers to implement ceramic-specific erosion technologies. On the other hand, it serves to select an initial technology, which is adapted with the aid of self-developed optimization software in such a way that an increase in process productivity can be achieved.