

Diss. ETH No. 20386

# **Failure mechanisms of heavily-loaded brazed diamonds**

A dissertation submitted to  
**ETH Zurich**

for the degree  
**Doctor of Sciences**

presented by  
Sebastian Buhl  
Dipl.-Ing. Universität Stuttgart  
born on 10th February 1981  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Konrad Wegener, examiner  
Prof. Dr. Ralph Spolenak, co-examiner  
Dr. Christian Leinenbach, co-examiner

2012

# Abstract

Diamond crystals are the hardest material known to mankind; therefore they are predestined as abrasive components in material removal tools. Brazing is the method of choice to attach diamond grits to a grinding wheel body. The enhancement of the reliability and integrity of brazed steel-diamond joints is of great importance for economic reasons. In this work it was determined that the brazing parameters strongly affect the joint properties. It was found that in-between the diamond and the already known titanium carbide layer a copper interlayer is formed, tremendously decreasing the residual stresses by matching the two lattices. If the titanium carbide layer thickness exceeds a threshold value, the bond strength decays. In addition, intermetallic interlayers of type  $\text{Fe}_2\text{Ti}$  and/or  $\text{FeTi}$  are formed at the steel-filler alloy interface. The thicker these interlayers the more probable a failure therein. This corresponds to a lower bond strength compared to the maximum, which is obtained when the crack progresses in the ductile filler alloy, provoking large plastic deformation. Depending on the brazing parameter, there is either no dependency of the residual stresses on them or a transition from compressive to tensile stress. The magnitude of the measured residual stress is rather low (-350 MPa to +150 MPa) compared to the strength of the diamond. A slower cooling rate leads to smaller compressive stresses due to the longer time range for stress relief by creep processes. Standard polyhedral diamond grains were taken for the determination of the failure mechanisms. The two failure mechanisms observed are grain fracture and grain pullout. The single grain scratch test reveals that small grits were preferentially pulled out, whereas larger ones tended to fail by fracture. This is supported by a simple mechanical model. It is concluded that the occurrence of a certain failure mechanism is a result of the bending torque exerted on the grain and of the grain size-dependent failure strength of the diamond. If the grain moves in a circular arc, corresponding to grinding kinematics, the predominant failure mechanism is grain pullout. It is concluded from the results that with a higher strength filler alloy the grain pullout failure mechanism disappears. The cutting tests revealed a strong influence of the rake angle on the grinding forces, i.e. with higher absolute values of rake angle the higher the forces that were obtained.

# Zusammenfassung

Diamant ist die härteste vorkommende Substanz, aus diesem Grund ist sie prädestiniert als Abrasivkomponente in Zerspanwerkzeugen. Löten ist dabei die bevorzugte Haftmethode von Diamanten auf dem Schleifwerkzeuggrundkörper. Die Verbesserung der Zuverlässigkeit und der Integrität von gelöteten Stahl-Diamant-Verbindungen ist aus wirtschaftlichen Gründen von großer Bedeutung. Diese Arbeit zeigt, dass die Verbindungseigenschaften wesentlich von der Lötparameterwahl abhängen. Die Bildung einer Kupferschicht im Nanometer-Bereich zwischen Diamant und Titankarbid trägt stark zum Spannungsabbau durch die gegenseitige Anpassung der Kristallgitter bei. Bei der Titankarbidsschicht existiert eine obere Grenzschichtdicke, ab welcher es zu einem Abfall in der Bindungsfestigkeit kommt. Zusätzlich bilden sich an der Stahl-Lot-Grenzfläche intermetallische Zwischenschichten vom Typ  $\text{Fe}_2\text{Ti}$  und/oder  $\text{FeTi}$  aus. Je dicker diese Zwischenschichten sind, umso geringer ist die resultierende Festigkeit. Ein Rissverlauf durch das duktile Lot führt zu den größten Werten aufgrund der grossen plastischen Verformungsmöglichkeiten. Bei den Eigenspannungen als Funktion der Lötparameter zeigt sich: entweder gibt es keinen Einfluss oder es findet ein Übergang von Druck- zu Zugspannungen statt. Die Grösse der Eigenspannungen (-350 MPa bis +150 MPa) ist bezogen auf die Festigkeit des Diamantkristalls sehr klein. Eine langsamere Abkühlung ergibt im Diamanten geringere Druckeigenspannungen, wegen einer verlängerten Zeitspanne zum plastischen Abbau der Spannungen durch Kriechprozesse. Für die Untersuchung der Fehlermechanismen wird auf polygonale Diamantkörner zurückgegriffen. Zwei Versagensmechanismen werden beobachtet, nämlich Kornbruch und Kornausbruch. In den Einzelkornkratzversuchen werden die kleinen Körner eher herausgerissen, wohingegen die Grösseren bevorzugt durch Bruch versagen. Dies wird mithilfe eines einfachen mechanischen Modells erklärt. Der Versagensmechanismus wird durch Interaktion des ausgeübten Biegemomentes sowie der grössenabhängigen Bruchfestigkeit bestimmt. Bei Bewegung des Korns auf einem Kreisbogen entsprechend einer Schleifkinematik ist Kornausbruch der vorherrschende Versagensmechanismus. Es wird schlussgefolgert, dass bei höherfesten Loten der Versagensmechanismus Kornausbruch verschwindet. Die Schnittversuche ergaben einen markanten Einfluss des Spanwinkels auf die gemessenen Kräfte, es gilt: je negativer der Spanwinkel, desto grösser die erhaltenen Kräfte.