

Aufbau und Bindungsmatrix hochbeanspruchter keramisch gebundener Zerspanungswerkzeuge

Bindungsmatrix entscheidet über Arbeitssicherheit. Sinter- oder Schmelzbindung? Sinterkorund ist „selbstschärfend“.

H. J. Padberg*

Keramische Bindungen bestehen aus Tonen, Kaolinen, Feldspäten, Glasfritten und weiteren Zusatzstoffen, wobei abhängig vom Bindungstyp, dem Anforderungsprofil der Schleifaufgabe - gekennzeichnet durch Prozeßführung, Maschine und Werkstoff -, den dafür notwendigen Abrasivstoffen und Umfangsgeschwindigkeiten und den durch die Produktion festgelegten Brenntemperaturen die Mischungsverhältnisse beliebig variiert bzw. angepaßt werden können. Charakteristische Kennzahlen für die verschiedenen Bindungstypen - die wie die Schmelzbindungen glas- oder wie die Sinterbindungen porzellanartigen Charakter aufweisen - stellen die sogenannten Sinter- und HKP-Punkte dar, die aus Erhitzungs-Mikroskopaufnahmen ermittelt werden können. Es werden exemplarisch markante Anwendungsbeispiele aufgeführt, die verdeutlichen, wie durch Bindungsanpassung merkliche Leistungssteigerungen erreicht werden konnten.

1 Aufbau und Rezeptursystematik von Schleifwerkzeugen

1.1 Dreistoff-System-Darstellung

Im Gegensatz zu den aus homogenen gesinterten Werkstoffen bestehenden Zerspanungswerkzeugen mit definierten Schneiden liegt bei den Werkzeugen mit undefinierten Schneiden ein inhomogener Körper, bestehend aus Bindung (BV), Abrasivstoff (KV) und Poren (PV), vor (Bild 1). Die prozentualen Volumenanteile dieser drei Komponenten lassen sich in einem gleichseitigen Dreieck auf den drei Höhenlinien auftragen (Bild 2). Allgemein ist eine solche Dreistoff-Darstellung immer dann angebracht, wenn ein Rezepturpunkt bzw. eine Stoffzusammensetzung durch drei charakteristische Größen darstellbar ist [1]. Der Existenzbereich der machbaren Scheiben ist herausgehoben. Innerhalb dieses Bereichs lassen sich die drei Komponenten KV, BV und PV anteilmäßig und unabhängig voneinander beliebig variieren, d. h. fast jeder gewünschte Rezepturpunkt ist realisierbar. Dieser machbare Bereich, der abhängig von Kornart, Korngröße und Bindungsart ist, liegt im Kornvolumen zwischen ca. 28 und 60 %, im Bindungsvolumen zwischen ca. 5 und 40 %; die Differenz zu 100 ergibt jeweils das Porenvolumen.

1.2 Struktur und Gefüge

Die Beschreibung und Charakterisierung des volumetrischen Schleifkörperraufbaus erfolgt durch die Begriffe Struktur und Gefüge [2]. Die Strukturbezeichnung ist gekoppelt mit dem Kornvolumen und beschreibt den Abstand der einzelnen Körner in der Scheibe. Je kleiner das Kornvolumen, desto größer der Kornabstand und umgekehrt. Wird das Kornvolumen „KV“ dagegen konstant gehalten und erhöht man z. B. das Bindungsvolumen „BV“, kommt es zu einer Gefügeänderung. Das „Gefüge“ - ein weiterer wichtiger Begriff für die Schleifkörper-Charakterisierung - ist als Maß für die Größe und Verteilung des Porenraums anzusehen. Gefügeänderungen führen zu einer Verstärkung der Bindungsstege unter Reduzierung des Porenvolumens. Das Einzelkorn wird fester eingebunden - es kommt zu einer Härtesteigerung. Erhöht man dagegen bei konstantem KV das Porenvolumen, so wird das Bindungsvolumen reduziert, die Bindungsstege werden schmaler, die Härte der Scheibe sinkt.

*Dr. Hans-J. Padberg, Diplom-Chemiker; nach Diplom und Promotion wissenschaftlicher Mitarbeiter am anorganischen Institut der Universität Bonn. 1978 Eintritt in das Feldmühle-Werk Wesseling (heute Cerasivwerk Wesseling). Seit 1981 Leiter der Forschung und Entwicklung Schleifkörper. - Ausarbeitung eines Posterbeitrags von der DKG-Jahrestagung 1992 in Bayreuth.

Eine Gefügeänderung ohne Veränderung des Poren-, Korn- und Bindungsvolumens zeigt Bild 3. Unter Verbreiterung der Bindungsstege werden kleinere Poren zugunsten größerer zusammengelagert. Über eine solche Gefügeänderung kann vorteilhaft die häufig durchzuführende Anpassung des Schleifkörperraufbaus an das Zerspanungsverhalten bestimmter Werkstoffe erfolgen. Der Art und Größe des sich bildenden Spans entsprechend wird durch sogenannte Ausbrennstoffe der Schleifkörper-Porenraum, der als Spankammer dient, exakt eingestellt. Diese Ausbrennstoffe sublimieren oder verbrennen während des Trocken- bzw. Brennprozesses und hinterlassen definierte Porenräume.

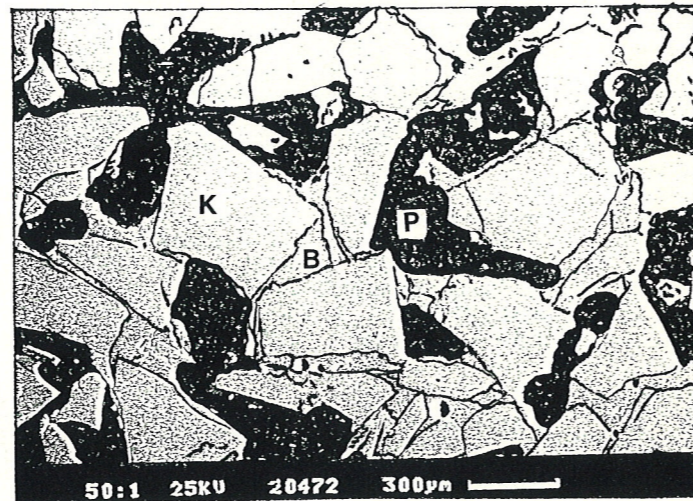


Bild 1 Gefüge einer Schleifscheibe
Fig. 1 Microstructure of a grinding wheel

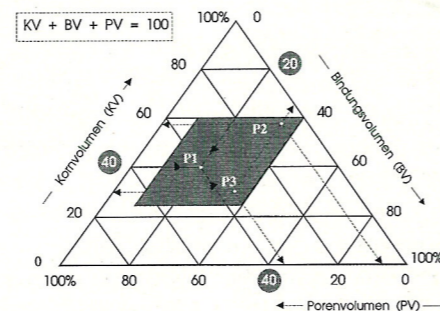


Bild 2 Dreistoff-System-Darstellung
Fig. 2 Ternary system

Kornvolumen (KV) = grain volume (KV)
Bindungsvolumen (BV) = bonding volume (BV)
Porenvolumen (PV) = pore volume (PV)

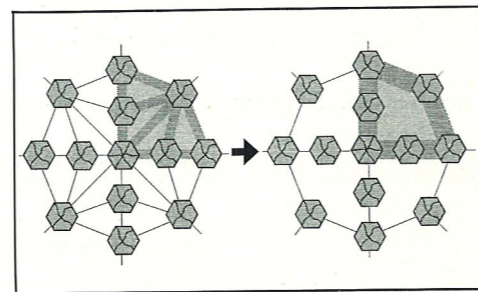


Bild 3 Gefügeänderung durch Porenvergrößerung
Fig. 3 Change in the microstructure due to the enlargement of the pores

Neben dieser anwendungsbedingten sogenannten „effektiven“ Verfüllung kennt man noch die sogenannte „notwendige“ Verfüllung, die ab einem bestimmten Porenvolumen erfolgen muß, um die Grünfestigkeit und Dimensionsstabilität des betreffenden Schleifkörpers zu gewährleisten.

2 Bindungsmatrix keramisch gebundener Schleifwerkzeuge

2.1 Eigenschafts- und Anforderungsprofil

Als dynamisch belastetes, rotierendes Werkzeug stellt der Schleifkörper besonders hohe Anforderungen an die Bruchfestigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit (TWB) der keramischen Bindungsmatrix. Daneben verlangen die modernen CNC-gesteuerten automatisierten Fertigungsabläufe absolute Reproduzierbarkeits- und Sicherheitskonstanz des Werkzeugs.

Doch trotz eines für jeden Hersteller vorgeschriebenen proof tests, bei dem der Schleifkörper kurzzeitig einer dynamischen Belastung oberhalb der Arbeitsgeschwindigkeit ausgesetzt ist, kommt es in der Betriebspraxis häufiger zu Scheibenbrüchen, die - unsachgemäße Behandlung ausgeschlossen - meist auf das kritische Rißwachstum vorher nicht festgestellter Mikrorisse zurückgeführt werden. Da zur Erkennung dieser Risse praxisnahe, zerstörungsfreie Prüfmethode nicht vorliegen bzw. sich nicht durchsetzen konnten und Untersuchungen bruchmechanischer Art erst in letzter Zeit durchgeführt wurden [3], kommt der Güte und Sicherheit der Bindungsmatrix wesentliche Bedeutung zu. Die Sinter- und Schmelzintervalle der Bindungen müssen so eingestellt werden, daß übliche Rohstoff- und Brenntemperatur-Schwankungen das thermische Verhalten der Bindungen nicht beeinflussen.

2.2 Bindungsentwicklung und -charakteristik

Allgemein bestehen keramische Bindungen aus Tonen, Kaolinen, Feldspäten, Glasfritten und weiteren Zusatzstoffen, wobei abhängig von der Kornart, Korngröße, Scheibenhärte, -struktur und -abmessung, sowie den durch die Produktion festgelegten Brenntemperaturen, die Mischungsverhältnisse beliebig variiert bzw. angepaßt werden können [4].

Zur Herstellung der Schleifkörper werden die Bindungen an das mit einem temporären Bindemittel befeuchtete Schleifkorn gegeben und zu einer homogenen rieselfähigen Masse vermischt. Die anschließende Formgebung erfolgt in der Regel durch Preß- und Rüttelverfahren. Feinkörnige Abrasivstoffe werden vorteilhaft mit der Bindung zu einem Schlacker verarbeitet und durch Gieß- bzw. nach Trocknung durch Preßverfahren in die gewünschte Form gebracht.

Entsprechend des Anforderungsprofils der Schleifaufgabe, gekennzeichnet durch Prozeßführung, Maschine und Werkstoff und den dafür notwendigen Abrasivstoffen und Umfangsgeschwindigkeiten, werden speziell entwickelte Bindungen eingesetzt. Man unterscheidet hierbei

- Schmelzbindungen mit hohem Glasphasenanteil
- Bindungen mit mittlerem Glasphasenanteil
- Sinterbindungen mit geringem oder keinem Glasphasenanteil.

Im Gegensatz zu Sinterbindungen erfolgt die Bindekraft bei Schmelzbindungen nicht über Umlagerungs- bzw. Feststoffreaktionen, sondern über eine niedrigviskose Glasphase. Während Zähigkeit und E-Modul der reinen Bindung bei steigendem Schmelzbindungscharakter sinken, steigt die Fließstrecke an. Die E-Module von Schleifkörpern mit Sinter- und Schmelzbindungen liegen dagegen in ähnlichen Bereichen, da an der Korn-Bindungs-Grenzschicht vergleichbare Adhäsionskräfte wirksam sind.

Die Überprüfung der charakteristischen Bindungsdaten erfolgt mit physikalischen und chemischen Untersuchungsmethoden. Durch Erhitzungsmikroskop-Aufnahmen wird das thermische Verhalten der betreffenden Bindung ermittelt und mittels Flußmitteln (Fritten) oder Magerungsmitteln (z. B. Tonerde) den festgelegten Produktions-Brenntemperaturen angepaßt. Danach werden durch Dilatometeraufnahmen die Wärmeausdehnungskoeffizienten und durch Differenzthermoanalysen (DTA) endo- und exotherme Reaktionen gemessen. Je gleichmäßiger der Kurvenverlauf, d. h. je weniger exotherme bzw. endotherme Reaktionen ablaufen, desto höher ist die Fertigungssicherheit dieser Bindung. Sprunghafte Änderungen des Ausdehnungs-

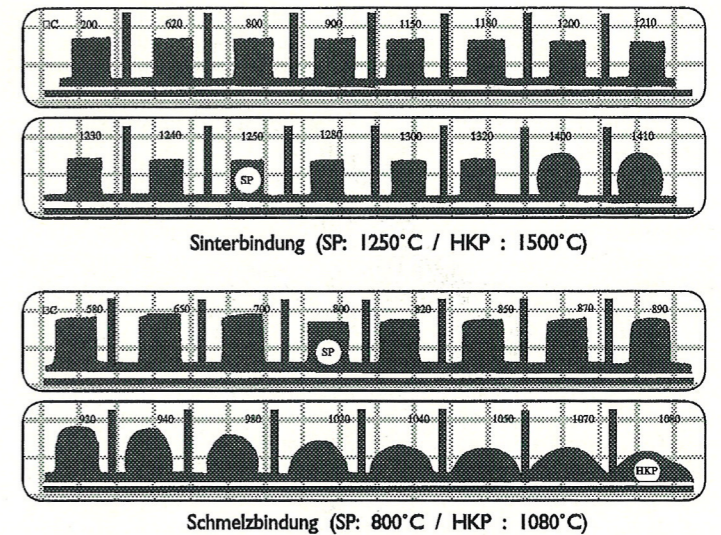


Bild 4 Erhitzungs-Mikroskop-Aufnahmen typischer Bindungen
Fig. 4 Heating microscope images of typical bonds

Tab. 1 Zeiss-Mackensen Einblastiefen-Härte und E-Modul unterschiedlich gebrannter Schleifkörper (KV = 48 % / BV = 10 %)

Temperatur [°C]	Zeiss-Mackensen Härte (1,0 bar)	E-Modul [kN/mm ²]
800	>600	5,6
950	520	22,4
1100	290	34,9
1300	260	34,2

Tab. 2 Verschiebung der Sinter- und HKP-Punkte bei Austausch der Einzelkomponenten

Variante	SP [°C]	HKP [°C]
Grundrezeptur	800	990
Austausch der Fritte	1000	1200
Austausch von Ton	755	990
Austausch von Feldspat	790	1060

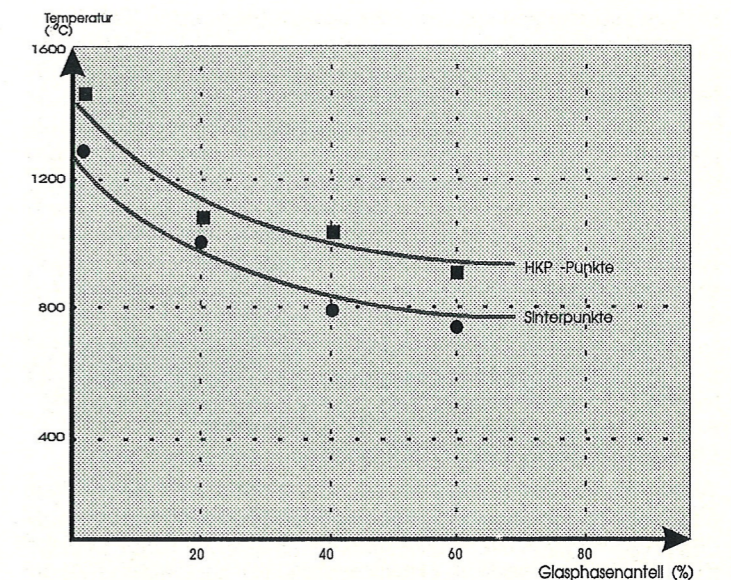


Bild 5 Abhängigkeit der Sinter- und HKP-Punkte keramischer Bindungen vom Glasphasenanteil
Fig. 5 Sintering and melting points as a function of the glass phase content

verhaltens führen beim Aufheizen der Schleifkörper zu Spannungen und damit zu Festigkeitsabfällen und ggf. zu Ribbildungen. Die wichtigsten Kenndaten für die Bindungscharakteristik stellen die aus den Erhitzungsmikroskop-Aufnahmen ermittelten Sinter (SP)- und Halbkugelfallpunkte (HKP) dar. Bild 4 zeigt Erhitzungsmikroskop-Aufnahmen einer typischen Schmelz- und einer Sinterbindung. Während die Sinterbindung nur oberhalb 1250 °C (SP) optimal gebrannt werden kann, ist die Schmelzbindung ab 800 °C (SP) einsetzbar. Wie Tab. 1 zeigt, treten härte- und festigkeitsmäßig bei verschiedenen Brenntemperaturen jedoch merkliche Unterschiede auf; dies kann anwendungstechnisch gezielt genutzt werden. Die Abhängigkeit der Sinter- und HKP-Punkte keramischer Bindungen vom Glasphasenanteil zeigt Bild 5. Die Steuerung der Sinter- und HKP-Punkte bzw. des Bindungscharakters erfolgt über die eingesetzten Rohstoffe. Besonders die Art und chemische Zusammensetzung der Glasphasenbildner - der Fritten - beeinflussen in hohem Maße das thermische Bindungsverhalten. Tab. 2 zeigt die Verschiebung der Sinter- und HKP-Punkte nach Austausch des Frittenanteils (35 %) bei sonst gleicher Rezeptur. Ein Austausch der Tone und Feldspäte (bei gleichem Frittentyp) weist dagegen merklich kleinere Verschiebungseffekte auf.

2.3 Festigkeitsuntersuchungen

Nach positivem Abschluß der physikalischen Untersuchungen erfolgt die Herstellung von Probeschleifkörpern bei den entsprechenden Brenntemperaturen. Anhand von Biegebruchstäben werden die Biegespannung und der Elastizitätsmodul ermittelt. Nach Untersuchungen von Decneut et al. [6] entspricht dieser statische Modul dem nach dem Grindo Sonic-Verfahren ermittelten dynamischen E-Modul. Aus den Biegebruchwerten kann ebenfalls nach der Formel von Münnich [7] die von der volumetrischen Schleifkörper-Zusammensetzung abhängige Bruchumfangs-Geschwindigkeit berechnet werden.

3 Anpassung der Bindungsmatrix an die Bearbeitungsaufgabe

Die folgenden Beispiele zeigen exemplarisch, wie durch Variation der Bindungszusammensetzung eine anwendungsorientierte Anpassung der Bindungsmatrix an die Bearbeitungsaufgabe möglich ist.

3.1 Anpassung an die Kornart

Siliciumcarbid und gewisse Sinterkorunde sind gegenüber der Bindungsmatrix besonders empfindlich. So müssen bei Siliciumcarbid-Schleifkörpern beim Brand Si-, SiO- und Kohlenstoff-Verunreinigungen oxidiert werden, da sonst eine Schwächung der Bindungsbrücken und damit ein Festigkeits- und Härteabfall erfolgt. Aus diesem Grund können hier nur Sinterbindungen eingesetzt werden, da eine Schmelzbindung leicht zur frühzeitigen Verglasung führt, die eine Sauerstoff-Penetration in das Innere der Scheibe verhindert.

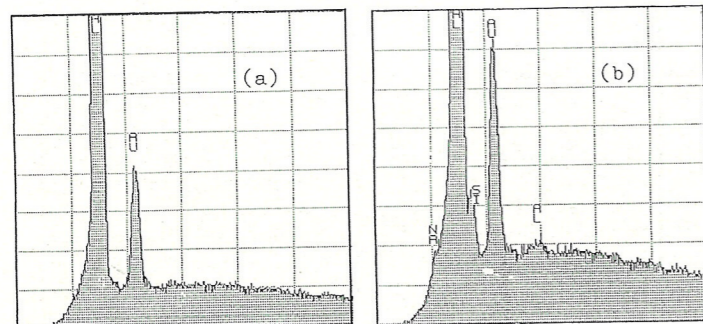


Bild 6 Mikrosonden-Untersuchungen von Sinterkorunden
Fig. 6 Microprobe analysis of sintered alumina

Bestimmte Sinterkorunde dagegen werden von Alkali-Silicaten angegriffen. So zeigen Mikrosonden-Aufnahmen des Korninneren bei der Kornart (b) im Gegensatz zur Kornart (a) deutlich penetriertes Natrium und Silicium (Bild 6). Neben dieser chemischen Reaktivität spielt auch die Höhe der Brenntemperatur eine wichtige Rolle. Im Gegensatz zu den Schmelzkorunden besitzen Sinterkorunde ein mikrokristallines

Gefüge, das eine sehr kontrolliert ablaufende Selbstschärfung des Schleifwerkzeugs bewirkt. Bei höheren thermischen Belastungen kommt es jedoch zum Wachstum dieser im µm-Bereich liegenden Kristallite und damit zu unkontrollierter Selbstschärfung. Vorteilhaft für diese Sinterkorunde sind daher möglichst niedrig schmelzende alkalische Schmelzbindungen.

3.2 Verbesserung der Selbstschärfung

Die bereits erwähnte Selbstschärfung eines Schleifwerkzeugs ist von ausschlaggebender Bedeutung für das Prozeßverhalten [8]. Im Gegensatz zu den Sinterkorunden erfolgt bei den Schmelzkorunden diese Selbstschärfung meist durch das rechtzeitige Ausbrechen größerer Kornbruchstücke oder des gesamten abgestumpften Kornes. Wird das Restkorn von der Bindungsmatrix zu sehr festgehalten, steigen die Schnittkräfte rapide an und es kommt zur thermischen Schädigung der Werkstückrandzonen. Die Bindungsmatrix muß daher so eingestellt werden, daß bei Anstieg der Schnittkräfte das Korn sofort freigegeben wird und neue scharfe Schneidkörner nachrücken können. Erreicht wird dieser Effekt durch eine Veränderung der Zähigkeit der Bindungsmatrix.

3.3 Verbesserung der Festigkeit

Die Bruch- und Sprengfestigkeit eines Schleifkörpers ist das wichtigste Kriterium jeder Bindungsentwicklung. Während der Nutzungsdauer muß die Bruchwahrscheinlichkeit auf ein Minimum reduziert werden. Die Energien, die z. B. über 60 m/s umlaufende Scheiben beim Bruch freisetzen, können - abgesehen von Verletzungen des Bedienungs-personals - an den Maschinen Schäden mit sechsstelligen Beträgen hervorrufen.

Schleifkörper für erhöhte Arbeitsgeschwindigkeiten verlangen daher besonders sichere und feste Bindungen. Erreicht werden diese erhöhten Sprengfestigkeiten u. a. durch Zusatz von Lithium- und Bor-Verbindungen. Tab. 3 zeigt - unter vergleichbaren Bedingungen - Sprengfestigkeiten und E-Module von Schleifkörpern mit einer alkali- und einer borhaltigen Bindungs-Matrix.

Tab. 3 Festigkeitsvergleich verschiedener Bindungen

Bindungs-Matrix	Sprengfestigkeit [nach Münnich, m/s]	E-Modul [kN/mm ²]
Borhaltig	147	48,3
Alkalihaltig	125	45,1

3.4 Verbesserung der Profilhaltigkeit und Abrichtbarkeit

Die Bearbeitung neuer, schwer zerspanbarer Werkstoffe und neue Schleifverfahren erfordern Bindungen von besonderer hoher Profilhaltigkeit und Abrichtbarkeit [2]. Eine merkliche Erhöhung der Glasphasenanteile führt zu harten und hochfesten Schmelzbindungen, die aufgrund ihrer niedrigeren Viskosität das Einzelkorn fester einbinden und dadurch die Profilhaltigkeit deutlich verbessern. Gleichzeitig wird die Profilier- und Abrichtbarkeit des Schleifkörpers durch Diamantwerkzeuge merklich erleichtert.

Literatur

- [1] Stock, K. O.: Neue Methoden zur Gütekontrolle abrasiver Werkstoffe. Proceedings Intergrind 79, S. 225
- [2] Padberg, H. J.: Die Schleifscheibe - Partner intelligenter Maschinen. Haus der Technik Essen, Arbeitsunterlagen, T 30-244-133-2, 1992
- [3] Thies, J.: Bruchmechanische und zerstörungsfreie Untersuchungen an keramisch gebundenen Korundschleifscheiben. Diss. TH Hannover 1986
- [4] S. Buchner: Keramische Schleifmittelbindungen. Keram. Z. 6 (1976) 293
- [5] Padberg, H. J.: Entwicklung anwendungsorientierter Bindungssysteme für Schleifwerkzeuge. Jahrbuch der Schleif-, Hon-, Läpp- und Poliertechnik 57. Ausgabe 1992 (in Vorbereitung)
- [6] Decneut, A.; Snoeys, R.; Peters, J.: Sonic testing of grinding wheels. Report CRIF MC 36 University of Louvain, Nov. 1970
- [7] Münnich, H.: Beitrag zur Sicherheit von umlaufenden Schleifkörpern. Diss. TH Hannover 1956
- [8] Brandin, H.: Einflußgrößen beim Außenrund-Kurzhubhonen. Techn. Mitteilungen 73 (1980) [8]

The Structure and Bonding of Highly Stressed Vitrified Bonded Cutting Tools

Bonding matrix is a decisive factor in the determination of operational safety. Sintered or fused bonds? Sintered alumina with „self-sharpening effect“.

H. J. Padberg*

Vitrified bonds consist of clays, kaolins, feldspars, frits and other additives. Depending on the bond type, the firing process, the requirements of the grinding task (characterized by the grinding process, grinding machine and workpiece to be machined), the abrasives, the rotation speeds and firing temperatures, the ratio of these components can be varied and modified according to specific requirements. Characteristic criteria for the different bond types - which like fused bonds possess a glassy character -, or which like the sintered bonds possess a porcelain-like character - are the so-called sinter point and hemispherical temperature (HKP), which can be determined with the help of a heating microscope. Practical examples will be given illustrating how considerable improvements in effectivity can be achieved by the modification of the bond matrix to correspond to the specific requirements of the grinding task.

1. Characteristics and Specifications of Grinding Tools

1.1 Ternary System

In contrast to cutting tools made from homogeneous, sintered materials with geometrically defined cutting edges, cutting tools with undefined cutting edges are inhomogeneous, consisting of a bond (BV), an abrasive (KV) and pores (PV) (Fig. 1). The percentual volumes of these three components can be plotted on three tie lines of an equilateral triangle (Fig. 2). Such a ternary system can be particularly useful, when a body consists of three characteristic components [1]. The shaded area represents all feasible specifications for the production of grinding wheels. Within this area the proportions of the three components, KV, BV and PV can be varied independently of each other as per specific requirements, i.e. almost every combination of components within this area is possible. This area of feasibility, which is, however, dependent on the grain type, grain size and bond type, lies for the grain volume between around 28 and 60 %, for the bond volume between around 5 and 40 %; the difference between the sum of the grain volume and the bond volume to 100 corresponds to the pore volume (PV).

1.2 Structure and Microstructure

The volumetric grinding wheel can be described and characterized in terms of its structure and microstructure [2]. The structure is related to the grain volume (KV) and describes the distance between the individual grains. The smaller the grain volume (KV), the greater the distance between grains and vice versa. If, on the other hand, the grain volume „KV“ is kept constant and the bond volume „BV“ is increased, a change in the microstructure results. The „microstructure“ - another important reference term in the characterization of grinding wheels - can be understood as a measure of the size and distribution of the pore space. The microstructural changes lead to a strengthening of the bond bridges and a reduction of the pore volume (PV). The individual grains are more tightly bonded to the matrix and the grinding wheel becomes harder. Conversely, if the pore volume (PV) is increased at constant grain volume (KV), the bond volume (BV) is reduced, the bond bridges become narrower and the hardness of the wheel decreases. A change in the microstructure without any change in the pore, grain or bond volume is illustrated in Fig. 3. Due to the widening of the bond bridges smaller pores agglomerate into larger ones. The change in pore size is very important for the adaption of the grinding wheel structure to the machining behaviour of certain materials. Corresponding to the type and size of the chips removed from the material, the cavities formed by the pores in the grinding wheel, which have to accommodate

these chips, can be adjusted exactly by means of so-called opening materials, i.e. the pore volume must always be greater than that of the chips removed from the material. These organic opening materials are added to the grinding wheel body, but sublimate or burn during drying or firing, leaving behind defined pore spaces. Besides this application-dependent so-called „effective“ filling with opening materials, a so-called „essential“ filling is also known, which is necessary when the pore volume reaches a certain level in order to guarantee the green strength and dimensional stability of the grinding wheel.

2 The Bond Matrix of Vitrified Bonded Tools

2.1 Characteristics and Requirements

As a dynamically stressed and rotating tool, the grinding wheel places particularly high demands on the fracture toughness and thermal shock resistance of the vitrified bond matrix. As well as this, modern CNC controlled automatic production processes demand absolute consistency in regard to the reproducibility and safety of the tool. Although every manufacturer is obliged to conduct a proof test according to DSA guidelines, during which the grinding wheel is exposed to a dynamic stress above working speed for a short time, wheels frequently break during machining, which, except in cases of improper handling, can usually be attributed to the critical crack growth of previously undetected microcracks. Since no practice-oriented, non-destructive testing methods are available, respectively have proved successful for the detection of such cracks, and since fracture mechanic studies have only been recently conducted [3], the strength and safety of the bond are of crucial significance. The sintering and melting intervals of the bonds have to be adjusted so that the usual raw material and firing temperature fluctuations do not influence the thermal behaviour of the bonds.

2.2 Development and Characteristics of the Bonds

Generally, vitrified bonds consist of a mixture of clays, kaolins, feldspars, frits and other additives. Depending on the grain type, size, the hardness, structure and size of the grinding wheel and the firing conditions required for production, the proportions of the various mixture components can be varied and modified to satisfy specific requirements [4].

For the production of grinding wheels, bonds are added to the grain wetted with a temporary binder and mixed to a homogeneous, pourable body. The bonded abrasives are then shaped by pressing, in rare cases with vibrators. Finer grained abrasives mixed with the bond produce a better quality slip which can be shaped as required either by casting or, after drying, by pressing.

In accordance with the requirements of task for which the grinding wheel is to be used, characterized by the grinding process, machine and the workpiece, and the abrasive materials and the peripheral speeds required by the process, specially developed bond types were selected. The main types can be differentiated as follows:

- fused bonds with a high glass phase content
- bonds with medium glass phase content
- sintered bonds with a low level of or no glass phase content.

In contrast to the sintered bonds, the bond strength of the fused bonds depends on a viscous glass phase and not on transposition resp. solid-solid reactions. While the toughness and the modulus of elasticity of the pure bond decrease with increasing fused bond character, the flow length increases. Conversely, the modulus of elasticity of grinding wheels with sintered and fused bonds lie in a similar range, because of comparable adhesive forces on the grain-bond boundary layer.

The bond characteristics were tested by means of both physical and chemical methods. The thermal behaviour of the respective bond was determined by heating microscope analysis and adjusted by means of fluxing agents (frits) or shortening materials (e.g. alumina) to comply with the firing temperature set by the production processes. Following this the thermal expansion co-efficients were measured with a dilatometer and the endo- and exothermic reactions were recorded by means of differential thermal analysis (DTA). The more symmetrical the DTA and DTA curves are, that is the fewer exothermal or endothermal reactions taking place, the higher the safety of the bonds. Sudden changes in the expansion behaviour of the grinding wheel while it is heated lead to stresses and consequently to decreases in strength and, in certain cases, to the formation of cracks.

Table 1 Zeiss-Mackensen penetration hardness and the modulus of elasticity of grinding wheels (KV=48/BV=10 %) fired at different temperatures

Temperature [°C]	Zeiss-Mackensen Hardness (1,0 bar)	Young's Modulus [kN/mm ²]
800	>600	5,6
950	520	22,4
1100	290	34,9
1300	260	34,2

Table 2 Changes in the SP and HKP values by altering the proportions of the individual components

Variant	SP [°C]	HKP [°C]
Basic Batch	800	990
Exchange of Frit	1000	1200
Exchange of Clay	755	990
Exchange of Feldspar	790	1060

The most important values for the characteristics of the bond are the sintering point (SP) and the melting point (HKP) determined by heating microscope analysis. Fig. 6 shows images made by a heating microscope of typical fused and sintered bonds. While the optimal firing temperature for sintered bond lies above 1250°C (SP), it is possible to use the fused bond from 800°C (SP). As Table 1 shows, different firing temperatures can result in considerable differences in the hardness and strength of the grinding wheel, the Table shows the Zeiss-Mackensen-penetration hardness and the E-module of a grinding wheel with KV = 48 % and PV = 10 %. These differences may be exploited according to specific requirements. Fig. 5 shows the SP and HKP values of vitrified bonds as a function of the glass phase content. The type and proportions of the starting materials selected determine the SP and HKP values, and respectively the bond type. The most important components are those responsible for the formation of the glass phase, i.e. the frits, since they have an extensive influence on the thermal behaviour of the bonds. Table 2 shows how the SP and HKP values can be adjusted simply by altering the frit content (35 %) maintaining an otherwise identical composition. Altering the proportions of the other components, e.g. the clays and feldspars, results in noticeably small modifying effects.

2.3 Flexural Strength Experiments

After the physical tests had been completed, sample grinding wheels were produced at corresponding firing temperatures and cut to form transverse rupture testing rods which were then tested for flexural strength and their modulus of elasticity. According to the studies of Decneut et al [6], the modulus of elasticity from this static bending test is comparable to the dynamic E-value obtained with the Grindo Sonic method. From the transverse rupture values the bursting rate which is dependent on composition of the grinding wheel can also be calculated according to Münnich's formula [7].

3 Adaption of the Bond Matrix to the Grinding Process

The following examples show how by varying the bond composition it is possible to adapt bond matrix to meet the requirements of the grinding process.

3.1 Adaption to the Abrasive

Silicon carbides and certain sintered alumina are especially sensitive to the bond matrix. For instance, silicon carbides must be fired in an oxidizing atmosphere so that the Si, SiO and carbon impurities are oxidized in order to avoid a weakening of the bond bridges (black core) and a decrease in strength and hardness. For this reason, only sintered bonds without a glass phase may be used, because the fused bonds can easily lead to a premature glazing of the grain and prevent a penetration of the oxygen into the interior of the grinding wheel. The chemical resistance of sintered alumina - especially against alkali silicates - at high temperatures is more critical than in the case of fused alumina. Microprobe images of the grain interior of grain type b show in contrast to grain type a clearly penetrated sodium and silicon (Fig.8). In addition to this chemical reactivity, the firing temperatures also play a significant rôle. In contrast to the fused alumina, sintered alumina possesses a microcrystalline microstructure, which brings about a very controlled self-sharpening effect of the grinding tool. At higher thermal stresses, however, this results in the growth of the crystallites in the µm range and, thus, to uncontrolled self-sharpening. Fused bonds with the lowest possible alkali content and which sinter at low temperatures are there the most suitable for sintered alumina.

3.2 Improvement of the Self-Sharpening Effect

The above-mentioned self-sharpening of an abrasive is crucially important for the grinding process [8]. In contrast to sintered alumina, with the fused alumina the self-sharpening usually takes place by the breaking out of larger blunt grain fragments or of the whole blunt grain, leaving new sharp edges. If the remaining grain is held too tightly by the bond matrix, the cutting forces increase rapidly and surface quality of the work piece is thermally damaged. The bond matrix has to be thus adjusted, that when the cutting forces increase, the grain is immediately released so that new sharp cutting grains can replace it. This effect is achieved by adjusting the toughness of the bond matrix.

3.3 Improvement of Strength

The fracture toughness and the resistance to bursting of the grinding wheel is a very important criterion in the development of every bond. During use the probability of fracture has to be reduced to a minimum. The energies, which can be released by a over 60 m/s revolving wheel can - apart from injuring the operators - cause extensive and expensive to repair damage to the machinery. Grinding wheels for high operating speeds demand particularly strong and safe bonds. The resistance to bursting can be improved by, for example, the addition of lithium and boron compounds. Table 3 shows the resistance to bursting and the modulus of elasticity of grinding wheels with an alkali and a boron containing bond matrix tested in comparable conditions.

Table 3 Comparison of the strength of different bonds

Matrix of Binder	Bursting Strength [after Münnich, m/s]	Young's Modulus [kN/mm ²]
Boron Containing	147	48,3
Alkali Containing	125	45,1

3.4 Improvement in Profile Durability and Dressing

The machining of new, difficult to cut materials and new grinding processes needs bonds with excellent shape durability and dressing qualities [2]. Increasing the glass phase of the bond results in hard and extremely strong fused bonds, which, because of their low viscosity, bind the individual grain more tightly and thus clearly improve the durability of the shape. Simultaneously, the dressing of grinding wheels has been made easier with the use of diamond tools.

References

Please see German text

*Dr Hans-J. Padberg studied chemistry and after completing his degree and receiving his doctorate, he worked as a scientific research assistant and at the Institute of Inorganic Chemistry at the University of Bonn. In 1978 he joined the Feldmühle-Werk Wesseling (renamed to CERASIV-Werk Wesseling in July 1991). Since 1981 he has been head of research and development for grinding wheels. Revised poster contribution from the German Ceramic Society Conference 92 in Bayreuth.