

Erosionsschutzschichten für Flugtriebwerke

Erosion Resistant Coatings for Aircraft Engines

Kai Ortner¹⁾, Andreas Kohns²⁾, Felix Turley³⁾ und Thomas Jung¹⁾

Unter bestimmten Betriebsbedingungen gelangen verstärkt mineralische Partikel, z.B. Sand, in die Luftströmung von Flugtriebwerken. Aufgrund der hohen Gasgeschwindigkeit und der großen Schaufelgeschwindigkeit im Verdichter können diese Partikel einen intensiven Materialabtrag an den Schaufelblättern bewirken (Erosion) und damit deren Funktionalität ernsthaft beeinträchtigen. Eine Beschichtung der Schaufeln mit speziellen Schutzschichten ermöglicht eine beträchtliche Verlängerung der Einsatzdauer der Schaufeln.

Under certain operation conditions, increased amounts of sand particles may be injected into the air inlet duct of jet engines. Because of the high air speed and the high velocity of the compressor blades, an intense material removal from the airfoils by erosion can occur, resulting in a significant deterioration of their functionality. By protecting the airfoils with a special protective coating, a considerable extension of the service life can be achieved.

1 Einleitung

Vor allem bei Start und Landung sowie in bestimmten geografischen Regionen gelangen bei turbinengetriebenen Flugtriebwerken (Strahltriebwerke, Turbinen-Propeller-Triebwerke) in größerem Umfang mineralische Partikel in den Ansaugluftstrom **[Abb. 1]**. Erreichen diese Partikel den Verdichter, können sie dort auf die Schaufelblätter treffen, deren Umfangsgeschwindigkeit bei einer Geschwindigkeit von mehreren 100 m/s liegt. Bei der Kollision kommt es zum Materialabtrag an der Schaufeloberfläche. Dieser Abtragsmechanismus wird Erosion genannt.

Generell besteht bei der Entwicklung von Verdichtern das Bestreben zur Verringerung des Bauteilgewichts. Aufgrund dessen weisen die Verdichterschaufeln meist nur vergleichsweise geringe Wandstärken (etwa 1 mm) auf. Dies kann unter ungünstigen Bedingungen dazu führen, dass das Schaufelblatt infolge von Erosion bereits vor Ende des eigentlichen Wartungszyklus deutlich an Größe verliert. Hierdurch kann der Betrieb des Triebwerks beeinträchtigt werden, so dass es zu verkürzten Wartungszyklen und stark erhöhten Ersatzteilkosten kommt.

Insbesondere bei starkem Abtrag an der Schaufelspitze verschlechtert sich die Abdichtung der Schaufel gegenüber dem Verdichtergehäuse, wodurch die Rückströmung ansteigt und damit der Verdichtewirkungsgrad sinkt. Weiterhin

können die durch Erosion hervorgerufenen Beschädigungen der Schaufel zu einer Verschlechterung der Dauerschwingfestigkeit und damit zu einer Verringerung der Lebensdauer führen.

Eine mögliche Lösung dieses Problems besteht in der Beschichtung der erosionsgefährdeten Bereiche der Schaufeln mit einer geeigneten Schutzschicht. Im Folgenden werden derartige Schichten und ein dafür geeignetes Beschichtungsverfahren beschrieben.

2 Beschichtung von Blisks

Axialverdichter in Flugtriebwerken haben die Aufgabe, die angesaugte Luft zu komprimieren und in die Brennkammer weiterzuleiten. Bei konventionellen Verdichtern werden einzelne Verdichterschaufeln in entsprechenden Nuten befestigt, so dass die Schaufeln bei Beschädigung ersetzt werden können. Weiter wird hierdurch das Beschichten von Einzelschaufeln ermöglicht, z.B. mit Erosionsschutzschichten, was heute bereits zum Stand der Technik zählt [1]. In jüngster Zeit wird jedoch bei Neuentwicklungen von Verdichtern verstärkt auf die *Blisk*-Bauweise (*Bladed Disk*) zurückgegriffen. Mit Hilfe von Blisks, bei denen die Schaufeln (Blades) und die Scheibe (Disk) aus einem einzigen Rohling gefertigt werden, lässt sich die Baugröße reduzieren und Gewicht einsparen. Auf der anderen Seite macht die komplexe Blisk-Geometrie neuartige Reparatur- und Beschichtungs-Technologien notwendig, da beschädigte Einzelschaufeln nicht mehr einfach im Rahmen der Instandsetzung ersetzt werden können. Im Gegensatz zu Einzelschaufeln ist die Zugänglichkeit der Schaufelzwischenräume für Beschichtungsprozesse stark eingeschränkt. Dennoch muss ein Beschichtungsverfahren eine Dickenverteilung auf dem Schaufelblatt liefern, die der realen Erosionsbelastung Rechnung trägt.

Erosionsschutzschichten, die auftreffenden Partikeln von über 100 Mikrometern Durchmesser widerstehen müssen, benötigen eine Mindestschichtdicke, die in der Regel im Bereich einiger zehn Mikrometer liegt. Damit kommen Beschichtungsverfahren mit geringer Aufwachsrate nicht in Betracht. Aus Sicht des Triebwerkdesigns scheinen vor allem oberflächenabbildende Abscheideverfahren dünner Schichten vorteilhaft zu sein, da diese meist nicht zu einer signifikanten Vergrößerung der Oberflächenrauheit führen und ein Einhalten enger Designtoleranzen gewährleisten.

Im Triebwerksbau, ebenso bei landgestützten Gasturbinen zur Energieerzeugung, werden heute dicke Schichten durch Elektronenstrahlverdampfen (EB-PVD) und Plasmaspritzen (Atmosphärendruck-Plasmaspritzen, APS und Vakuum-Plasmaspritzen, VPS) abgeschieden. Da Erosionsschutzschichten den Verschleißschutz- bzw. Hartstoffschichten zugerechnet werden können, wird ein Verfahren benötigt, das dichte und porenfreie Schichten liefert. In dieser Hinsicht

sind Sputterverfahren den zuvor genannten Verfahren überlegen, da sie hohe Teilchenenergien und Ionendichten besitzen. Des Weiteren wird ein Verfahren benötigt, das in der Lage ist, die Zwischenräume der komplexen Blisk-Geometrie zu beschichten. Hierbei erscheint ein strömungsbasierter Teilchentransport einem rein diffusionsbasierten Transportmechanismus überlegen.

Die Gasfluss-Sputtertechnik (GFS) [2], [3], [4] bietet eine Kombination der zuvor genannten Forderungen: Als Sputterverfahren mit hoher Ionendichte lassen sich kompakte, porenfreie Schichten erzeugen. Mikroskopische Schichteigenschaften wie die Stängelstruktur lassen sich bei der ionengestützten Abscheidung graduell beeinflussen und so auch makroskopische Eigenschaften wie mechanische Härte, Eindring-Modul, Elastizität und Eigenspannung einstellen. Der wesentliche Parameter hierbei ist die elektrische Substratvorspannung (Bias). Mit dem Gasfluss-Sputtern, das auf einer intensiven Hohlkatoden-Glimmentladung beruht, lassen sich, verglichen mit dem Magnetron-Sputtern, hohe lokale Beschichtungsraten erzielen, die mehrere zehn Mikrometer/Stunde erreichen können. Schließlich ermöglicht es das Gasfluss-Sputtern, in der Hohlkatode abgestäubte Atome durch einen intensiven Argonstrom in die Schaufelzwischenräume zu transportieren **[Abb. 2]**. Im Unterschied zum Elektronenstrahlverdampfen (bei dem der Materialtransport rein diffusionsbasiert erfolgt) und zum Plasmaspritzen (das allein durch Strömung angetrieben ist), wird das Gasfluss-Sputtern als Kombination beider Mechanismen verstanden: Im Zentimetermaßstab — zwischen Quelle und Bauteiloberfläche — erfolgt der Transport mittels Strömung. Die Effizienz, mit der Beschichtungsmaterial in Hohlräume transportiert wird, lässt sich im Wesentlichen durch die Trägergas-Geschwindigkeit erhöhen. Im Bereich direkt über der Bauteiloberfläche kommt der Gasstrom durch Wandreibung zum Erliegen, und die eigentliche Abscheidung erfolgt per Diffusion.

3 Erosionsschutzschichten

Die Erosionswirkung an Verdichterbauteilen ist von einer Vielzahl von Einflussfaktoren bestimmt, darunter Auftreffwinkel, kinetische Energie, sowie Materialeigenschaften von Partikel und Schaufeloberfläche. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei, dass sich das Erosionsverhalten von metallisch-duktilen und keramisch-spröden Oberflächen erheblich unterscheidet. In der Regel weisen duktile Materialien bei flachem Einfallswinkel eine hohe Erosionsrate auf, der Abtragsmechanismus ähnelt häufig einem Zerspanungsprozess. Dagegen erreicht der Materialabtrag von keramisch-spröden Oberflächen bei senkrechtem Aufprallwinkel ein Maximum, der Erosionsmechanismus wird meist durch die Ausbildung eines Rissnetzwerks eingeleitet. In der Folge kommt es später zum Ausbrechen von Fragmenten.

Da in ein Triebwerk eintretende Partikel die Schaufeloberflächen unter verschiedenen Winkeln treffen, muss eine Erosionsschutzschicht möglichst metallisch-duktil und keramisch-hart Eigenschaften miteinander kombinieren. Aus diesem Grund wurde das Konzept einer Multilagenschicht mit alternierenden metallischen und keramischen Einzellagen verfolgt.

Bereits in den 1990er Jahren wurden in einem öffentlich geförderten Projekt verschiedene Materialkombinationen mit Hilfe klassischer PVD-Verfahren abgeschieden und bezüglich ihres Erosionsverhaltens untersucht [5], [6]. Dabei hat sich die Kombination Wolfram/Titandiborid ($W-TiB_2$) als besonders wirkungsvoll auf den im Verdichterbau gebräuchlichen Titanwerkstoffen erwiesen. Im Vergleich mit anderen Metall-Hartstoff-Kombinationen weisen diejenigen, die Wolfram als Metallkomponente besitzen, eine besonders hohe Resistenz gegenüber Erosion auf. Bei der Betrachtung dieser Materialkombination wurde im Erosionstest beobachtet, dass es erst nach einer bestimmten Testdauer bzw. Menge an Strahlmedium zu einem erkennbaren Materialabtrag kam. Die Zeitspanne, bis es zum Materialverlust kommt, wird als *Inkubation* bezeichnet. Neben $W-TiB_2$ konnte dieses Verhalten auch für $W-WN_x$ - und $W-WC$ -Kombinationen beobachtet werden [7]. Die diesem Effekt zugrunde liegenden Mechanismen sind bislang nicht vollständig geklärt, jedoch lässt sich vermuten, dass Wolfram durch seinen hohen Elastizitätsmodul [8], [9], in der Kombination mit Hartstoffschichten vorteilhaft ist [7]. Ziel bei der Weiterentwicklung solcher Schichten ist es vor allem, die Inkubationszeit zu maximieren.

Im Rahmen eines gemeinsamen Entwicklungsprojektes von Rolls-Royce Deutschland und dem Fraunhofer IST zur Beschichtung der Blisk-Schaufeln einer mehrstufigen Verdichtertrommel mit einer Erosionsschutzschicht mittels GFS wurde das genannte $W-TiB_2$ -System um einen Ni_xAl_y -Haftvermittler erweitert [10], [11]. Die Beschichtungen wurden mit drei Gasfluss-Sputterquellen in einer angepassten Vakuumanlage durchgeführt. Mit Hilfe geeigneter Maskierungen lassen sich mehrere Schaufelkränze simultan beschichten **[Abb. 2]**.

4 Ergebnisse

Erosionsmessungen wurden an der Universität Cranfield (UK) mit SiO_2 -Partikeln der Größe 75-200 μm bei Partikelgeschwindigkeiten zwischen 50 und 400 m/s durchgeführt [12].

In den **Abbildungen [3] und [4]** sind Erosionsergebnisse des mittels GFS abgeschiedenen $Ni_xAl_y-W-TiB_2$ -Multilagensystems auf flachen Ti6246-Proben qualitativ dargestellt. Die Messungen zeigen den durch Erosion verursachten Masseverlust, aufgetragen über der Masse des auftreffenden Strahlmediums, bei flachem (30°) und senkrechtem (90°) Auftreffwinkel und einer Gastemperatur von $450^\circ C$. Bei flachem Winkel war innerhalb der Messdauer kein Erosionsschaden messbar, bei senkrechtem Einfall setzt der Masseverlust um die Inkubationszeit

verzögert ein. Anhand der Erosionsergebnisse konnte das bereits aus vorangegangenen Untersuchungen bekannte Erosionsverhalten des W-TiB₂-Systems (s. Kap. 3) auch nach Erweiterung um den Ni_xAl_y-Haftvermittler und unter Verwendung des GFS reproduziert werden.

Im Anschluss an die Erosionsexperimente wurden Querschliffe der getesteten Proben angefertigt und im Rasterelektronenmikroskop ausgewertet **[Abb. 5 und 6]**. Die metallisch-keramische Viellagenschicht ist deutlich zu erkennen (hell: Wolframlagen; dunkel: Titandiboridlagen; unterhalb der ersten Wolframschicht ist die metallische Haftschrift aufgebracht). Es ist zu erkennen, dass die Partikelenergie sowohl durch plastische Verformung des Schichtsystems **[Abb. 5]** als auch durch Scherbewegungen einzelner Schichtsegmente entlang der kolumnaren Wachstumsrichtung absorbiert wird **[Abb. 6]**. Dabei werden diese Segmente um bis zu 6 µm in das Grundmaterial gedrückt. Solange es zu plastischer Verformung oder Scherbewegung ohne Materialabtrag kommt, kann das Grundmaterial wirkungsvoll geschützt werden.

Weitere Untersuchungen zum Erosionsverhalten erfolgen derzeit in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Metallkunde und Werkstofftechnik der BTU Cottbus. Hier konnte unter Verwendung eines gemeinsam errichteten Erosionsteststands das vom Cranfield-Teststand bekannte Erosionsverhalten der Schicht bestätigt werden. Es konnte nachgewiesen werden, dass auch bei radialer Beschichtung einer Blisk **[Abb. 2]**, und damit unter flachem Beschichtungswinkel, eine vergleichbare Schutzwirkung für die Bauteiloberfläche erzielt werden kann, wie für Flachproben, die unter senkrechtem Winkel beschichtet wurden. Weiterhin zeigen REM-Aufnahmen bei Raumtemperatur getesteter Proben, dass es nach Ende der Inkubationszeit nicht zu einem sofortigen Schichtversagen über die Gesamtschichtdicke kommt. Vielmehr ist zu beobachten, dass der im Erosionstest zu beobachtende Materialverlust zunächst durch das Herauslösen einzelner Schichtsegmente bzw. das Abtragen von Einzellagen hervorgerufen wird. Während dieser Zeit ist die Schaufeloberfläche weiterhin vor Erosion geschützt.

5 Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass sich das Schichtsystem mittels GFS erfolgreich abscheiden lässt und auch bei geänderter Anströmung (im Vergleich zu Flachproben) gute Erosionsergebnisse liefert. Aktuell konzentrieren sich die Entwicklungen unter anderem auf eine bessere Anpassung der Schichtdickenverteilung an das Belastungsprofil durch Erosion. Im Rahmen laufender und künftiger Entwicklungsaktivitäten soll das Inkubationsverhalten solcher Systeme genauer untersucht und auf weitere Materialkombinationen ausgeweitet werden.

Abbildungen

- Abbildung 1: Extreme Erosionsbelastung von Flugtriebwerken auf Start- und Landebahnen in Wüstengebieten [13]
- Abbildung 2: Blisk-Schaufelbeschichtung durch gezieltes radiales Anströmen der zu beschichtenden Verdichterstufen mit einer Gasfluss-Sputterquelle, schematisch
- Abbildung 3: Erosionsverhalten des W-TiB₂-Schichtsystems auf Ti6246-Flachproben bei flachem Auftreffwinkel (30°) und 450°C Gastemperatur
- Abbildung 4: Erosionsverhalten des W-TiB₂-Schichtsystems auf Ti6246-Flachproben bei senkrechtem Auftreffwinkel (90°) und 450°C Gastemperatur. Das Abknicken der unteren Kurve markiert das Ende der Inkubationszeit.
- Abbildung 5: Plastische Verformung einer W-TiB₂-Multilagenschicht durch Partikeleinschlag
- Abbildung 6: Vertikale Scherbewegung von Segmenten des W-TiB₂-Schichtsystems in den Grundwerkstoff durch Partikeleinschlag
- .

Literatur

- [1] W. Tabakoff, G. Simpson, Proc AIAA 2002-0373 (2002)
- [2] K. Ishii, J. Vac. Sci. Technol. A, 7, (1989), S. 256.
- [3] T. Jung, A. Westphal, Mat. Sci. Eng. A, 140, (1991), S. 528.
- [4] K. Ortner, M. Birkholz, T. Jung, Vak. Forsch. Prax. 15 (2003), S. 236.
- [5] D. S. Rickerby, Development of advanced erosion resistant coatings for gas turbine compressor applications – final technical report, BRITE Programm No. BE-3339 (1994)
- [6] D. S. Rickerby, P. Monge-Cadet, G. Farges, United States Patent (US005952085A): Multiple layer erosion resistant coating and a method for its production. September (1999)
- [7] P. Monge-Cadet, F. Pellerin, C. Farges, D. Rickerby, E. Quesnel: Revetements anti-erosion multicouches. In: Proceedings of AGARD conference 558 on erosion, corrosion and foreign object damage effects in gas turbines. Neuilly-sur-Seine, (1994)
- [8] T. Chudoba, M. Griepentrog, Z. Metallkd. 96 (2005), S. 1242
- [9] R. G. Munro, J. Res. Natl. Inst. Stand Technol 105 (2000), S. 709
- [10] D. Roth-Fagaraseanu, T. Haubold, Offenlegungsschrift (DE 10 2004 017 646 A1): Verfahren zur Beschichtung von Bauteilen für Flugzeugtriebwerke. Oktober, (2005)
- [11] A. Kohns, K. Ortner, T. Jung, Adv. Eng. Mater. 11 (2009), S. 67
- [12] R. G. Wellman, J. R. Nicholls, Surf. Coat. Technol. 177 (2004), S. 80
- [13] Airbus Picture Gallery, URL: <http://www.airbusmilitary.com>, Stand: 19.4.2008

Autoren

Dr. Kai Ortner, Diplom-Physiker, ist Mitarbeiter der Gruppe Hohlkathoden-Verfahren am Fraunhofer IST mit den Schwerpunkten Gasflusssputtertechnik und Hochtemperatur-Schutzschichten.

Dipl.-Ing. Andreas Kohns arbeitet seit 2005 bei Rolls-Royce Deutschland (Oberursel) im Bereich "Capability Acquisition Special Processes" und ist dort schwerpunktmäßig zuständig für die Entwicklung von Reparatur- und Beschichtungsprozessen.

Dipl.-Ing. Felix Turley, seit 2006 Mitarbeiter bei Rolls-Royce Deutschland in der Abteilung "Materials Technology", hauptsächlich zuständig für Material- und Prozessentwicklung im Bereich Erosionsschutzschichten und TiAl-Werkstoffen.

Dr. Thomas Jung, Diplom-Physiker, Jahrgang 1952, seit 1992 Mitarbeiter des Fraunhofer-IST, Leiter der Gruppe Hohlkatoden-Verfahren.

¹⁾ Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST, Bienroder Weg 54 E, 38108 Braunschweig, Germany

²⁾ Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG, Hohemarkstraße 60-70, 61440 Oberursel, Germany.

³⁾ Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG, Eschenweg 11, 15827 Blankenfelde-Mahlow, Germany

Kontakt:

Dr. Kai Ortner

Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST

Bienroder Weg 54 E

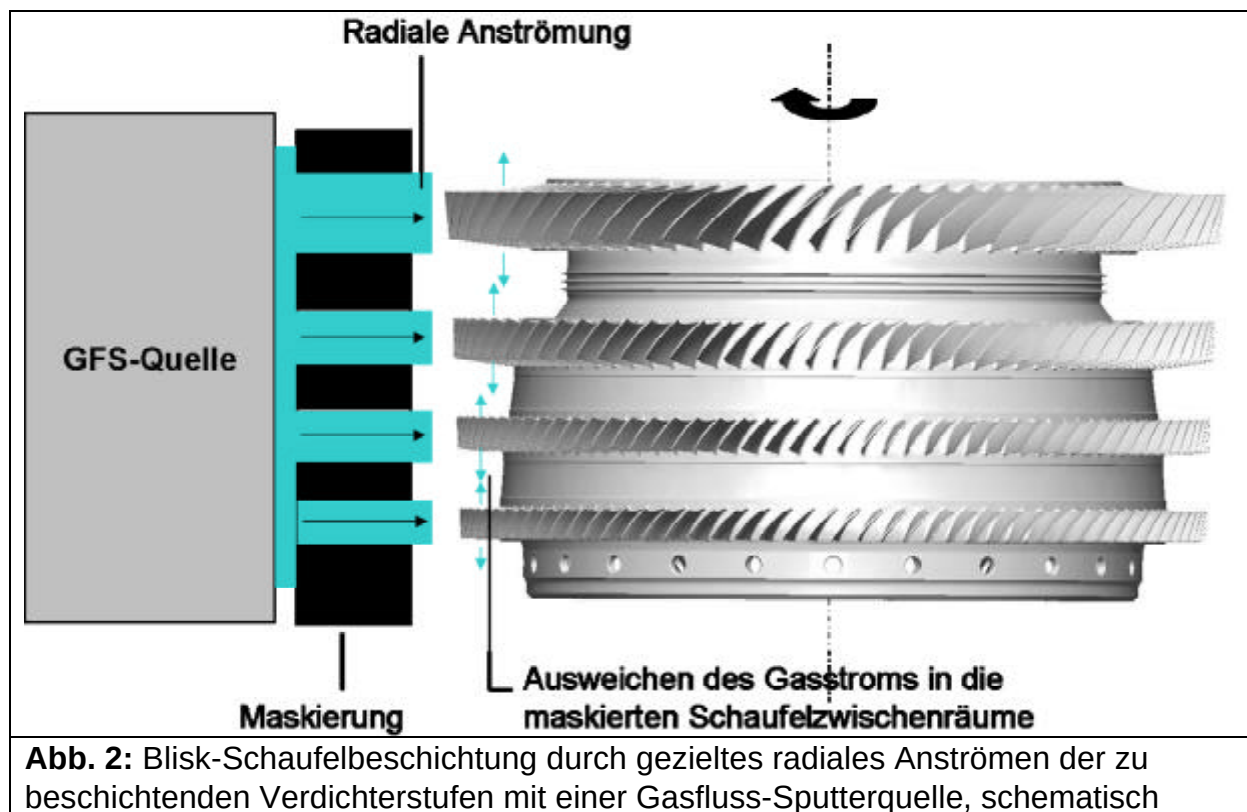
38108 Braunschweig, Germany

E-Mail: kai.ortner@ist.fraunhofer.de

Abbildungen:



Abb. 1: Extreme Erosionsbelastung von Flugtriebwerken auf Start- und Landebahnen in Wüstengebieten [13]



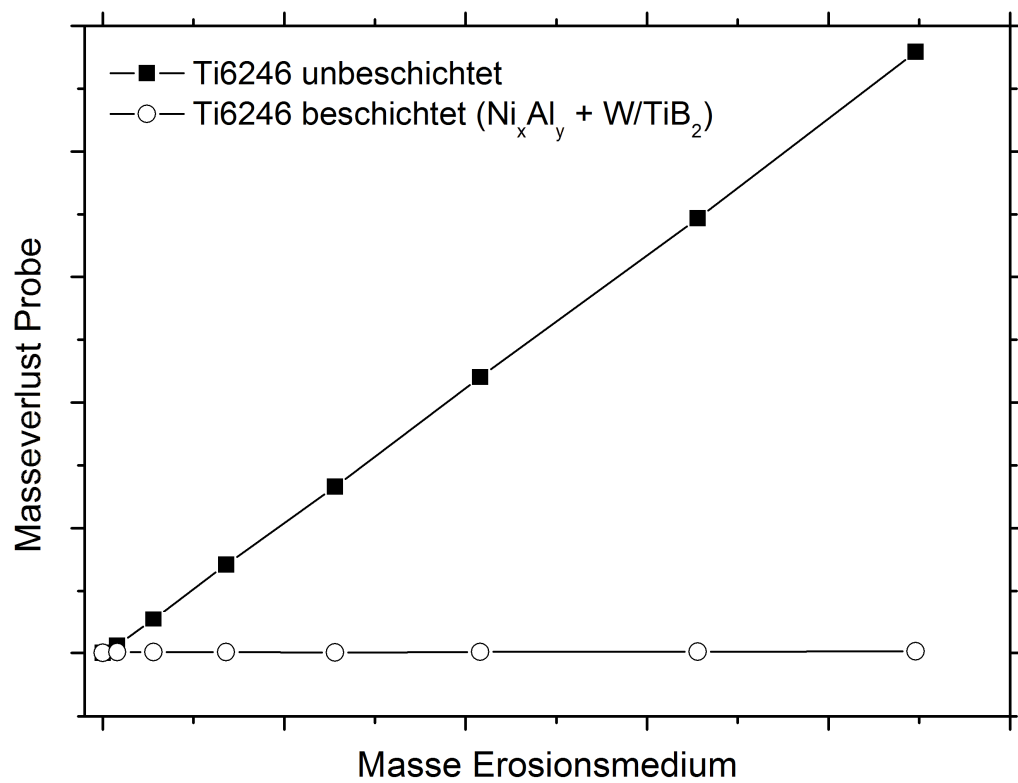


Abb. 3: Erosionsverhalten des W-TiB₂-Schichtsystems auf Ti6246-Flachproben bei flachem Auftreffwinkel (30°) und 450°C Gastemperatur

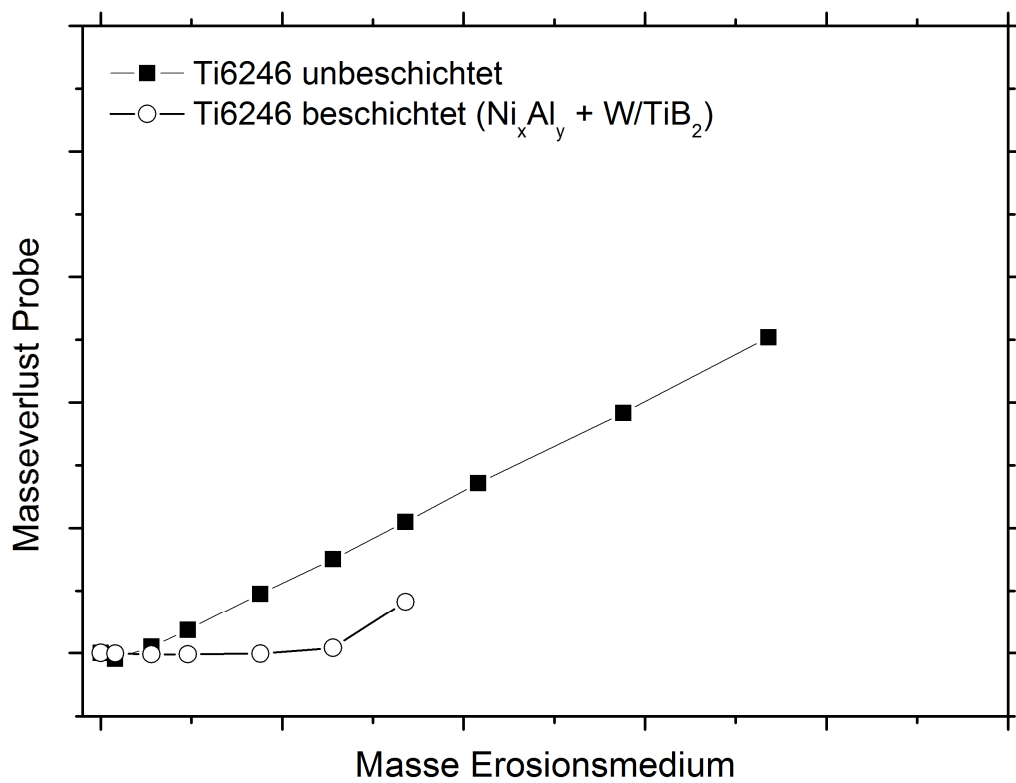


Abb. 4: Erosionsverhalten des W-TiB₂-Schichtsystems auf Ti6246-Flachproben bei senkrechtem Auftreffwinkel (90°) und 450°C Gastemperatur. Das Abknicken der unteren Kurve markiert das Ende der Inkubationszeit.

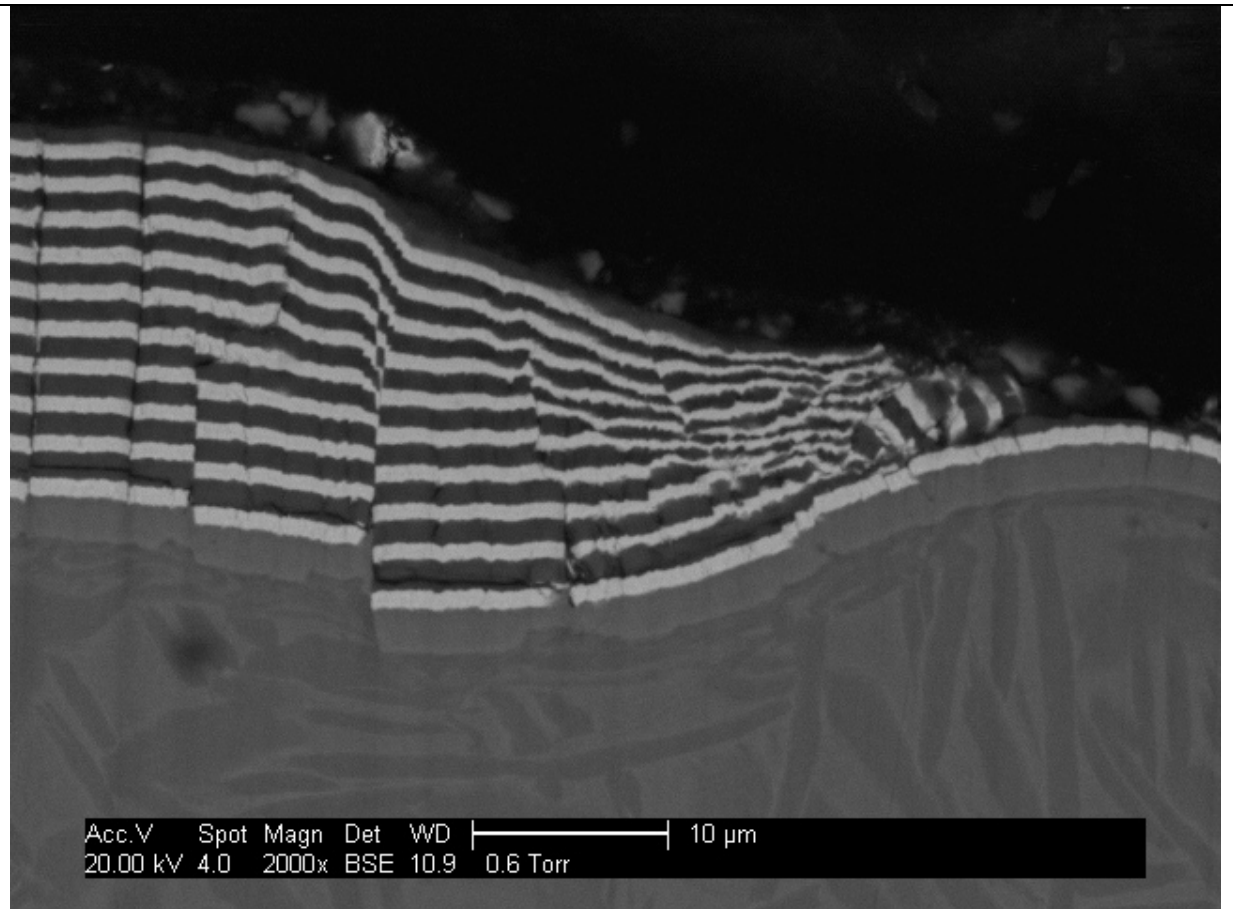


Abb. 5: Plastische Verformung einer W-TiB₂-Multilagenschicht durch Partikeleinschlag

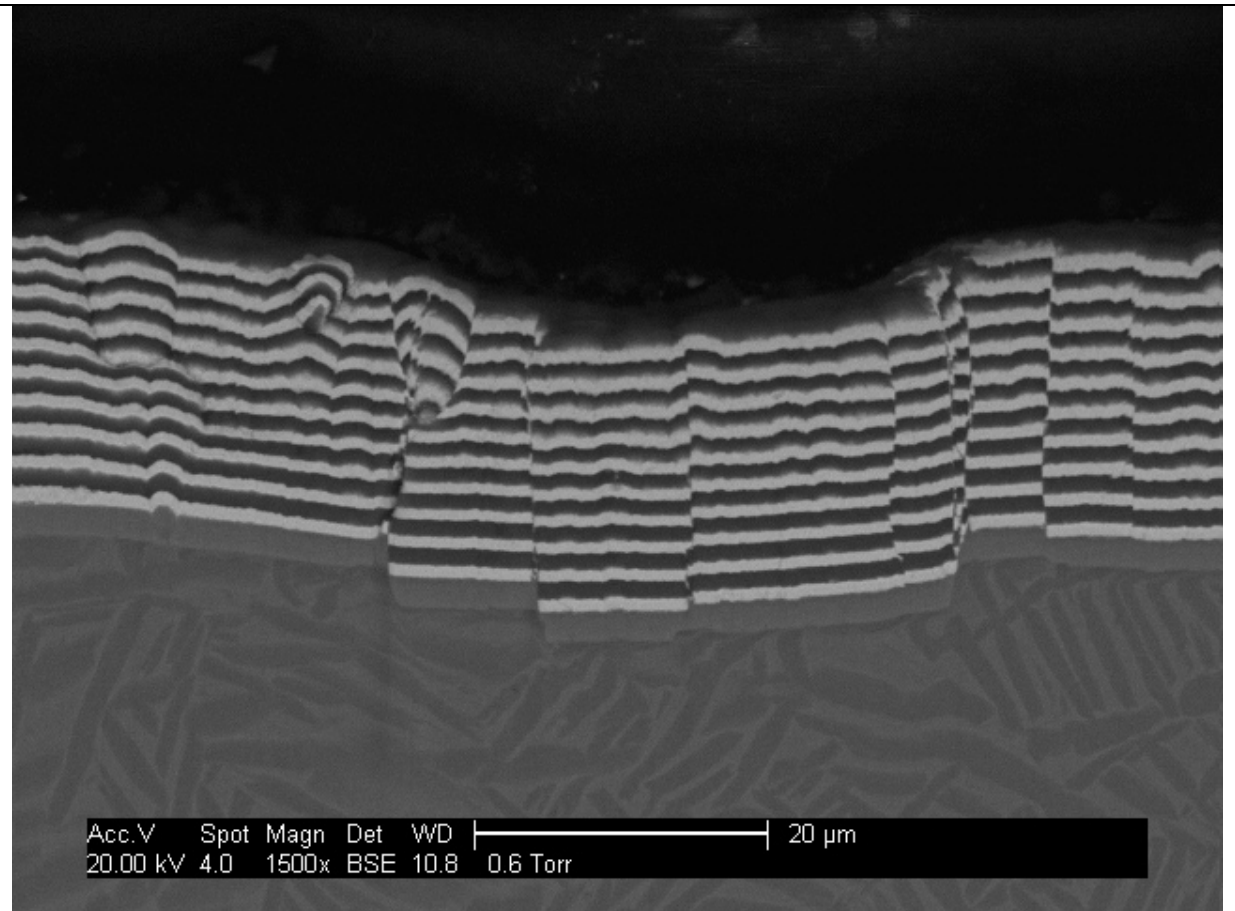


Abb. 6: Vertikale Scherbewegung von Segmenten des W-TiB₂-Schichtsystems in den Grundwerkstoff durch Partikeleinschlag