b-tu

Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg

Muhammad Naveed

Study of crystallography and erosion behavior of single and multilayer coatings used for applications in aero engines







Study of crystallography and erosion behavior of single and multilayer coatings used for applications in aero engines

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Study of crystallography and erosion behavior of single and multilayer coatings used for applications in aero engines

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

vorgelegt von

M. Sc. Muhammad Naveed Karachi, Pakistan

Prüfungsauschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Arnold Kühhorn Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Sabine Weiß Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Alfons Fischer

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar. 1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2015 Zugl.: (TU) Cottbus-Senftenberg, Univ., Diss., 2015

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2015 Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen Telefon: 0551-54724-0 Telefax: 0551-54724-21 www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2015

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9054-8 eISBN 978-3-7369-8054-9

$\langle \! / \! \rangle$

Acknowledgement

The present research was performed during my scientific activities at the Chair of Materials and Physical Metallurgy at the Brandenburg Technical University Cottbus-Senftenberg.

I would like to express my deep gratitude to Prof. Dr.-Ing. habil. Sabine Weiss and Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens for giving me the opportunity to perform this scientific work and assisting me in the scientific supervision in the later or initial stages of my work respectively.

I am very thankful to Prof. Dr.-Ing. Alfons Fischer for his interest and the evaluation of my work as second supervisor.

I am grateful to Dr.-rer.nat. Kai Ortner (IST Fraunhofer) and Dr. Ing. Arturo Flores Renteria (Siemens AG) for the scientific and technical discussions and without his help this work has not been possible.

I am especially thankful to my colleagues at the Chair of Materials and Physical Metallurgy for their patience and help for conducting this research work.

I would like to emphasize my gratitude for Dr.-Ing. Stefan Bolz and the entire service team from CemeConAG for helping me out in troubleshooting the problems related to coating machine and their useful advices.

My very special thanks to Dr.-Ing. Stefan Haaga, Dr.-Ing. Jens Brechbuehl for their scientific assistance in my work. I am also thankful to. Dr.-Ing. Wolfram Pitschke and the entire service team of Bruker AG for their technical assistance in conducting the experiments.

At the same time I would like to thank M. Sc. Chittaranjan Das (Chair of Practical Physics) for his help for his technical help.

Last but not the least I would like to thank my parents and my family for their moral support during my work and stay in Cottbus.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Abstract

Erosion of aero-engine components has been identified as a serious problem since the World War II. During this time various attempts have been made to study this phenomenon in order to improve the life and performance of the used components. Flights in particulate environments led to the drastic degradation of the performance due to blunting of blade edges, reduction of chord and increase of tip clearance. Measures like coating of blades and high efficiency filters have been introduced in order to protect the aero-engine components from wear in dusty environments.

In the present work an effort has been made in order to deposit various single and multilayer coatings for the erosion protection of Inconel718 alloy used as the substrate material. Inconel718 finds its applications in high pressure compressors within gas turbines. To deposit the various coatings onto the substrate material the Direct Current (DC) Method has been used as a Physical Vaporization Deposition technique. The architecture of the investigated coatings is on one side a single layer TiN coating and on the other side multilayer Cr/CrN, Ti/CrN and TiN/CrN coatings as well.

The experimental results show that bilayer Cr/CrN multilayer coatings possess a variation in mechanical properties with the change in bilayer period. Additional adhesion tests show various spallation mechanisms which are related to the coating architecture. Process parameters used during the coating process had an influence on the coating growth. The growth of coatings as in form of a V-structure results in low adhesion between the coating and the substrate or the previous coating layer. Another change in the coating structure is obtained by changing metallic or ceramic layer between CrN layers. The presence of coating defects, like droplets, on the coating surface acts as voids within the coating structure decreasing the structural integrity of the coatings.

The conduction of a phase analysis of Cr/CrN multilayer developed the presence of a mixture of fcc-CrN, hcp-Cr₂N and bcc-Cr phases. A variation in the phase formation is found to be dependent on the bilayer period of the coatings. A complex XPS analysis and a related thermodynamic study indicate that the variation in the binding energies and thermodynamic stability of the CrN and Cr₂N phases are responsible for their stable formation during the coating deposition. TiN single layer coatings showed the formation of a single phase fcc-TiN. The presence of Cr₂N, Cr₂Ti, Ti_xN_y phases is found during the deposition of Ti/CrN and TiN/CrN coatings. An additional Scherrer analysis to evaluate the determination of crystal size pointed out the presence of nano-crystals of various

phases within the coatings. Stress analysis of the tested Cr/CrN coatings showed compressive stresses within the coatings, respectively. In this case only slight differences in stress values are observed for Cr1/CrN3 and Cr0.25/CrN3.75 coatings.

Erosion tests of Cr/CrN coatings showed erosion protection at shallow incidence angles (30°) as compared to uncoated Inconel718 alloy. In contrast, no erosion protection is obtained during the erosion at oblique angles. Crack deflection at the metal-ceramic interface, shearing of columns, internal distortion of CrN layer, radial and cone cracking, step shear, inter- and intra-columnar crack propagation are reported as some of the processes occurring during the erosion process. The presence of micro droplets is reported to be one of the major causes of low adhesion between the coating and substrate or structural weakness of coating, which provokes a rapid removal of the coating.

Within the last section of the present thesis the correlation between various models (proposed through contact mechanics) and erosion rate is studied. It is found that for the single layer and multilayer coatings a low correlation between H^3/E^2 and erosion rate exists. A study of the ratio between elastic modulus of coating to elastic modulus of substrate (E_f/E_s) in order to describe the erosion mechanism in a coating show non-conformance of the results as proposed by contact mechanic theories. A difference in the elastic modulus of coating layers (E1-E2) showed that no correlation can be found for the coatings during erosion at 30° and 90°.

Abstrakt

Die Erosion an Komponenten von Triebwerken ist seit dem 2. Weltkrieg als ernsthaftes Problem bekannt. Seitdem ist man bemüht dieses Phänomen intensiv zu untersuchen, um die Lebensdauer und Funktionalität der Komponenten zu verbessern. Abrundungen an den Kanten der Turbinenschaufeln, eine Verschlechterung in der Abstimmung und die Vergrößerung der Abstände der Schaufel-Spitzen zueinander führen bei Flügen unter sandigen Umgebungen zu einer deutlichen Abnahme der Leistungsfähigkeit. Um die Turbinenbauteile vor Verschleiß bei Flügen in staubbelasteten Umgebungen zu schützen, wurden Untersuchungen mit unterschiedlichen Beschichtungen der Turbinenschaufeln durchgeführt sowie hocheffiziente Filtersysteme eingeführt, installiert und eingebaut. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der ein- und mehrlagigen Beschichtung einer Inconel718-Legierungen zum Schutz vor Korrosion. Inconel718-Legierungen finden vor allem ihr Anwendungsgebiet im Hochdruckverdichter. Zur physischen Aufbringung der Beschichtung aus der Dampfphase wurde als Methode die Gleichstrom-Technik angewandt. Einzelschichten mit TiN und mehrlagige Cr/CrN-, Ti/CrN- und TiN/CrN-Beschichtungen wurden so auf das Substrat aufgebracht.

Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass Cr/CrN-Mehrfach-Beschichtungen, bestehend aus 2 Lagen, Unterschiede in ihren mechanischen Eigenschaften aufweisen, je nachdem welche Schicht zuerst aufgebracht wurde. Untersuchungen zur Adhäsion zeigten verschiedene Ablösungsmechanismen, die mit dem strukturellen Aufbau der Beschichtung zusammenhängen. Die während des Beschichtungsvorgangs gewählten Prozessparameter haben einen direkten Einfluss auf die Geschwindigkeit, mit der die Beschichtung aufgebracht wird. Veränderte man den Schichtaufbau, indem metallische oder keramische Schichten zwischen den CrN-Schichten aufgebracht wurden, veränderte dies die Eigenschaften der gesamten Beschichtungsstruktur. Die Anwesenheit von Schichtdefekten auf der Oberfläche einer Schicht fungierte als Störstelle, die die strukturelle Integrität der Beschichtung reduzierte.

Die Phasenanalyse der Cr/CrN Mehrfachschichten zeigte eine bereits bekannte Mischung von fcc-CrN-, hcp-Cr₂N- und bcc-Cr-Phasen. XPS-Analyse und thermodynamische Untersuchungen ergaben, dass Veränderungen der Bindungsenergien und der thermischen Stabilität von CrN und Cr₂N verantwortlich sind für einen stabilen Aufbau während des Beschichtungsprozesses. Bei der TiN-Schicht befindet sich im Aufbau nur eine fcc-TiN-Phase. Das Vorhandensein von Cr₂N-, Cr₂Ti-, Ti_xN_y-Phasen konnte bei der Aufbringung der Ti/CrN- und TiN/CrN-Beschichtungen nachgewiesen werden. Eine Analyse nach

IX

Scherrer zur Bestimmung der Kristallgröße wies die Existenz von Nano-Kristallen unterschiedlicher Phasen in den Beschichtungen nach. Belastungsuntersuchungen an den getesteten Cr/CrN-Beschichtungen zeigten Druckspannungen innerhalb der Beschichtung. Zwischen den Cr1/CrN3- und Cr0.25/CrN3.75-Beschichtungen konnten keine großen Unterschiede im Stressverhalten festgestellt werden.

Im Vergleich zu unbeschichteten Inconel718-Legierungen zeigten die Cr/CrNbeschichteten Proben beim Erosionsverhalten eine Verbesserung des Erosionsschutzes nur unter flachen Auftreffwinkeln (30°). Ablenkung durch Sprünge an der metallkeramischen Trennschicht, Störung/Deformation in der internen CrN-Schichtstruktur, sind einige der Verschleißprozesse, die während des Erosionsprozesses beobachtet wurden. Das Vorhandensein von Schichtdefekten (Mikrotröpfchen) verursacht eine strukturelle Schwächung der Beschichtung und führt dazu, dass die aufgebrachte Beschichtung schneller abgetragen wird.

Im letzten Abschnitt der Arbeit werden die Ergebnisse zum Erosionsverhalten unter Verwendung verschiedener Modelle, die im Bereich der Kontaktmechanik propagiert werden, diskutiert. Für die Ein-, und Mehrschicht-Beschichtungen konnte eine schwache Korrelation zwischen H^3/E^2 und der Erosionsrate festgestellt werden. Wie zu erwarten war, zeigte die Untersuchung des Verhältnisses des Elastizitäts-Moduls der Beschichtung zu dem des Substrats (E_{f}/E_{s}) keine Übereinstimmung mit den Modellen aus der Kontaktmechanik. Die Untersuchung der Differenz der Elastizitäts-Module der aufeinander folgenden Schichten in der Beschichtung (E1-E2) zeigte keine Korrelation zu dem bei den Beschichtungen gefundenen Erosionsverhalten bei 30° und 90°.

Table of Contents

List of Figures	XIV
List of Tables	XVIII
Abbreviation	XIX
1. Introduction	1
2. Literature Survey	4
2.1. Deterioration of turbomachinery performance due to erosion of gas to	urbine
components	5
2.2. Solid Particle Erosion	6
2.3. Physical Vapor Deposition	
2.3.1. Magnetron Sputtering	9
2.3.2. Reactive Magnetron Sputtering	11
2.4. Coating Deposition and Structure Zone Models	
2.4.1. Coating Deposition Mechanisms	
2.4.2. Structural Models	
2.5. Erosion resistant coatings	
2.5.1. Single layer Coatings	
2.5.2. Multilayer Coatings	
2.5.3. Design of an erosion resistant coating system	
3. Experimental Setup	
3.1. PVD- Coating Machine and coating process description	
3.2. Coating Characterization	
3.2.1. Coating Thickness Measurements	
3.2.2. Adhesion Testing	
3.2.3. Nanoindentation	
3.2.4. X-ray Diffraction	
3.2.5. Scanning Electron Microscopy	

3.2.6 X-Ray Photon Spectrometry	27
3.3 Erosion Testing	27
3 3 1 Erosion Test Rig	2.7
3.3.2 Properties of Erodent and Laser Doppler Anemometer Measuremen	nts 28
4 Materials	30
4.1 Inconel 718	30
4.1. Inconci / 18	
4.2. Titonium	
4.5. Intanium	
4.4. Chromium Nitride	
4.5. Titanium Nitride	
5. Deposition Parameters and properties of multilayer coatings	
5.1. Deposition parameters and coating structures	
5.1.1. Cr/CrN Multilayer	
5.1.2. CrN/X (X=Ti, TiN) Multilayer, TiN Single layer	
5.2. Mechanical Properties	41
5.2.1. Cr/CrN Multilayer	41
5.2.2. CrN/X (X=Ti, TiN) Multilayer, TiN Single layer	
5.3. Adhesion behavior of coatings	
5.3.1. Cr/CrN Multilayer	
5.3.2. CrN/X (X=Ti, TiN), TiN Single layer	45
6. Crystallography and XPS Analysis	
6.1. Phase Analysis	
6.1.1. Cr/CrN Multilayer Coatings	
6.1.2. CrN/X (X=Ti,TiN) Multilaver Coatings. TiN single laver	
6.2. Crystal Size Determination	54
6.2.1 Instrumental Broadening Analysis	
(22) Schemen Method	