

Erosionsschutzschichten für Blisk-Verdichtertrommeln: Prozessentwicklung und Eigenschaften

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

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur Andreas Kohns
geboren am 13.03.1979 in Koblenz

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Vesselin Michailov

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Viehweger

Gutachter: Dr.-Ing. Thomas Haubold

Tag der mündlichen Prüfung: 15.07.2009

Berichte aus dem Lehrstuhl Metallkunde und Werkstofftechnik

Band 1/2009

Andreas Kohns

**Erosionsschutzschichten
für Blisk-Verdichtertrommeln:
Prozessentwicklung und Eigenschaften**

Shaker Verlag
Aachen 2009

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.

Zugl.: Cottbus, BTU, Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2009

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8428-2

ISSN 1863-6373

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Zudem wurde die Arbeit nicht in der gegenwärtigen oder einer ähnlichen Form an einer anderen Fakultät eingereicht. Auch habe ich weder in der Vergangenheit Promotionsanträge gestellt, noch ist dies aktuell an einer anderen Fakultät der Fall.

Die derzeit geltende Promotionsordnung der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus ist mir bekannt.

Frankfurt a. M., den 09.02.2009

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand als Dissertation während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG in Oberursel. Das Vorwort möchte ich dazu nutzen, um all denen zu danken, die mich unterstützt und dazu beigetragen haben, dass die vorliegende Arbeit in dieser Form realisiert werden konnte.

An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Christoph Leyens, für die organisatorische und wissenschaftliche Unterstützung während der Promotionszeit. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle, dass ich mich – trotz seines oft sehr vollen Terminkalenders – zu jeder Zeit sehr gut von ihm betreut gefühlt habe.

Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr. Bernd Viehweger für die Erstellung des Zweitgutachtens und dem damit verbundenen Interesse an meiner Arbeit danken.

Ein ganz besonderer Dank geht an Herrn Dr. Thomas Haubold für die Schaffung meiner Doktorandenstelle, die Vielzahl fachlicher Impulse in den vergangenen Jahren sowie die stets offene Bürotür. Des Weiteren möchte ich mich für die wertvollen Anregungen und Ratschläge bei der Anfertigung der Dissertation bedanken.

Seitens Rolls-Royce Deutschland gilt mein Dank zudem den Kollegen meiner Abteilung und den Mitgliedern des Projektteams für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung.

Den Mitarbeitern des Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik in Braunschweig möchte ich für die freundliche Aufnahme als Dauergast und die angenehme Arbeitsatmosphäre danken. Dies gilt vor allem für die Hohlkathodengruppe. Hier haben es Herr Dr. Thomas Jung und Herr Dr. Kai Ortner verstanden, mir die Welt des Hohlkathoden-Gasfluss-Sputterns näher zu bringen und haben mich dabei stets als einen gleichgestellten Gesprächspartner behandelt. Bei Herrn Dr. Ortner möchte ich mich zudem für seine unermüdliche Unterstützung bei den Arbeiten an der Pilotanlage und die vielen Ratschläge bei der Erstellung dieser Arbeit bedanken.

Durch die sorgfältige Lektüre haben ebenfalls Frau Kristina Schüller sowie die Herren Thomas Gilles, Dr. Stephan Kohns, Dr. Oleksandr Kyrylov und Dr. Carsten Loof noch wesentlich zur inhaltlichen und orthographischen Verbesserung der Endfassung beigetragen. Hierfür möchte ich ebenfalls meinen Dank ausdrücken.

Schließlich möchte ich meiner Familie für Ihre vielfältige Unterstützung während meines Studiums und der Promotion herzlichst danken. Ihr Rückhalt war stets eine verlässliche Stütze für mich.

Am allermeisten danke ich meiner Freundin Kristina Schüller. Sie hat mich in den vergangenen Jahren bedingungslos und mit schier unerschöpflicher Geduld unterstützt, während ich allzu oft in Braunschweig war, um mich meinen Schichten zu widmen. Vielen, vielen Dank!

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	v
1 Einleitung	1
1.1 Einführung und Hintergrund	1
1.2 Zielsetzung und Gliederung	3
2 Grundlagen Flugzeugtriebwerke	7
2.1 Kernkomponenten von Turbinentriebwerken	7
2.2 Verdichterbauweisen	10
2.3 Der Blisk-Hochdruckverdichter	13
3 Erosion	15
3.1 Erosionsmechanismen	15
3.1.1 Definition	15
3.1.2 Strahlwinkel	17
3.1.3 Partikelgeschwindigkeit und -rotation	22
3.1.4 Partikeleigenschaften	24
3.2 Erosion in Flugzeugtriebwerken	26
3.2.1 Erosionsschutz - wozu?	26
3.2.2 Erosionsschäden an Verdichterroten	28

3.3	Erosionsschutz für Verdichterschaufeln	32
3.3.1	Erosionsschutz durch Partikelabscheider	33
3.3.2	Das Multilagenkonzept	34
3.3.3	Erosionsschutzschichten	37
3.3.4	Multilagenschichtsystem $Ni_xAl_y/W/TiB_2$	45
4	Beschichtungsverfahren	51
4.1	Grundlagen	51
4.1.1	Physikalische Dampfphasenabscheidung	51
4.1.2	Der Sputter-Effekt	52
4.2	Hohlkathoden-Gasfluss-Sputtern	55
4.2.1	Hohlkathoden-Glimmentladung	55
4.2.2	Der Gasfluss-Sputterprozess	56
4.3	Prozessparameter und Schichteigenschaften	58
4.3.1	Beeinflussung der Schichtmorphologie	58
4.3.2	Betrachtete GFS-Prozessparameter	61
5	Prozessentwicklung für die Blisk-Geometrie	65
5.1	Randbedingungen und Zielsetzung	65
5.2	Beschichtungsanlage	69
5.3	Gasströmung und Schichtabscheidung	72
5.3.1	Schichtabscheidung an repräsentativen Geometrien	72
5.3.2	Vereinfachtes Strömungsmodell für Blisk-Geometrie	80
5.4	Schichtdickenverteilungen	83
5.4.1	Prozessablauf und Versuchsaufbau	83
5.4.2	Schichtabscheidung an Blisk-Modellgeometrie	85
5.4.3	Variation von Gasfluss und Saugvolumen	92

5.4.4	Anpassung der Argondüsen	94
5.4.5	Anpassung der Quellenöffnung	96
5.4.6	Schichtstruktur beschichteter Schaufeln	102
5.5	Bewertung der Versuchsergebnisse	104
5.6	Beschichtung der Verdichtertrommel	106
6	Dauerschwingfestigkeit von beschichtetem Ti6246	113
6.1	Schadensmechanismus	113
6.2	Optimierungspotenziale	117
6.3	Eigenschaften der Nickel-Aluminid-Schicht	119
6.3.1	Experimentelle Vorgehensweise	119
6.3.2	Schichtzusammensetzung	120
6.3.3	Schichtmorphologie	122
6.3.4	Mechanische Eigenschaften und Eigenspannungen	122
6.3.5	Diskussion der Versuchsergebnisse	129
6.3.6	Auswahl von Prozessparametern für HCF-Tests mit axialer Belastung . .	132
6.3.7	Bewertung der Dauerschwingfestigkeitsversuche	133
6.4	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse	136
7	Zusammenfassung und Ausblick	139
	Anhang	143
	Abbildungsverzeichnis	152
	Tabellenverzeichnis	152
	Lebenslauf	165