

**Ausfallursachen und Versagensmechanismen von  
Wärmedämmschichtsystemen:  
Einfluss chemischer, mikrostruktureller und  
mechanischer Faktoren**

von

Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens



Berichte aus dem Lehrstuhl Metallkunde und Werkstofftechnik

Band 1/2006

**Christoph Leyens**

**Ausfallursachen und Versagensmechanismen  
von Wärmedämmschichtsystemen:**

Einfluss chemischer, mikrostruktureller  
und mechanischer Faktoren

D 82 (Habil.-Schr. RWTH Aachen)

Shaker Verlag  
Aachen 2006

**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.: Aachen, Techn. Hochsch., Habil.-Schr., 2006

Copyright Shaker Verlag 2006

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

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5571-0

ISBN-13: 978-3-8322-5571-8

ISSN 1863-6373

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Widmung**

Für Juliane, Johanna, Katharina und Antonia

**Zum Autor**

Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens (Jahrgang 1967) ist Lehrstuhlinhaber Metallkunde und Werkstofftechnik an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus und Assoziierter Direktor des Instituts für Werkstoffforschung beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Köln. Nach seinem Studium der Metallurgie und Werkstofftechnik an der RWTH Aachen war er zunächst als Doktorand, später als wissenschaftlicher Mitarbeiter und zuletzt als kommissarischer Institutsleiter am Institut für Werkstoff-Forschung des DLR tätig. In dieser Zeit verfasste er weit über 100 Publikationen, sechs Bücher und Patente. Seine Arbeiten wurden durch mehrere Preise und Ehrungen ausgezeichnet.

Die vorliegende Arbeit wurde von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der RWTH Aachen als Habilitationsschrift für das Fachgebiet „Werkstoffe in der Luft- und Raumfahrt“ genehmigt.

## **Danksagung**

Danke sei allen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Werkstoff-Forschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V., Köln, gesagt, die mich bei der Anfertigung dieser Arbeit tatkräftig unterstützt haben. Namentlich danke ich besonders den Herren Dr. Manfred Peters, Dr. Uwe Schulz, Dr. Klaus Fritscher, Dr. Wolfgang Braue, Dr. Reinhold Braun, Dr. Hendrik Lau, Dr. Uwe Kaden und Dipl.-Ing. Marcus Menzebach, die wichtige fachliche Impulse geliefert haben.

Für die wohlwollende Unterstützung des Habilitationsverfahrens danke ich Herrn Professor Dr. Wolfgang A. Kaysser, GKSS Forschungszentrum Geesthacht, und Herrn Professor Dr. Günter Gottstein, Institut für Metallkunde und Metallphysik der RWTH Aachen.

Mein spezieller Dank gilt meiner Gattin und meinen drei Töchtern, die mit ihrem Verständnis und ihrer Geduld die Anfertigung dieser Arbeit ermöglicht haben.

Königswinter, im Juli 2006

Prof. Dr. Christoph Leyens



# Inhaltsverzeichnis

<b>KURZZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>11</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>13</b>
<b>2 AUFBAU VON WÄRMEDÄMMSCHICHTSYSTEMEN</b>	<b>19</b>
2.1 Nickelbasislegierungen als Strukturwerkstoffe	20
2.2 Haftvermittlerschichten	22
2.2.1 Schichten vom Typ M-Cr-Al-Y	22
2.2.2 Aluminidschichten	23
2.3 Keramische Wärmedämmschichten	24
<b>3 ENTWICKLUNGSTRENDS FÜR WÄRMEDÄMMSCHICHTSYSTEME MIT VERBESSERTEN EIGENSCHAFTEN</b>	<b>27</b>
3.1 Fortschrittliche Keramiksichten	28
3.1.1 Verringerte thermische Leitfähigkeit	28
3.1.2 Verbesserte Hochtemperaturbeständigkeit	31
3.1.3 Verringerte Spannungen in der Keramiksicht	32
3.2 Verbesserte Haftfestigkeit und Zuverlässigkeit	33
<b>4 THERMISCH GEWACHSENE OXIDSCHICHTEN - EIGENSCHAFTEN UND BEDEUTUNG IN BEZUG AUF DIE LEBENSDAUER VON WÄRMEDÄMMSCHICHTSYSTEMEN</b>	<b>35</b>
4.1 Ausfallursachen und Versagensmechanismen von Wärmedämmschichtsystemen	35
4.1.1 Bedeutung von Eigenspannungen und Grenzflächenfestigkeit	36
4.1.2 Phänomenologie des Versagens von Wärmedämmschichtsystemen	39
4.1.3 Einflussgrößen auf die Lebensdauer und das Versagen von Wärmedämmschichtsystemen	41
4.1.3.1 Schichtdicke der Wärmedämmschicht	41
4.1.3.2 Vorbehandlung der Bond Coats	42
4.1.3.3 Substratzusammensetzung	48
4.1.3.4 Umgebungsbedingungen	50
4.2 Mikrostrukturelle Entwicklung der thermisch gewachsenen Oxidschicht und der Grenzflächen	52
4.2.1 Phänomenologie und Kinetik	52
4.2.2 Entstehung der $Al_2O_3$ - $ZrO_2$ -Mischoxidzone	57
4.3 Verhalten von Wärmedämmschichtsystemen unter mechanischer Beanspruchung	62
4.3.1 Testverfahren zur Bestimmung der Energiefreisetzungsrates	62
4.3.2 Experimentelle Bestimmung der Energiefreisetzungsrates von dünnen Oxidschichten und Wärmedämmschichtsystemen	64
4.4 Heißgaskorrosionsbeanspruchung	67
4.4.1 Modifizierter Heißgaskorrosionstest	70
4.4.2 Verhalten von Wärmedämmschichten	70
4.4.2.1 Rolle des Bond Coats bei EB-PVD-Wärmedämmschichten	73
4.4.2.2 Rolle der Keramiksicht	78
4.4.2.3 Konsequenzen für den technischen Einsatz	79
4.4.3 Heißgaskorrosions- und Oxidationsverhalten von Nickelbasislegierungen und Nickelaluminiden	81
4.4.3.1 Einfluss von Legierungszusammensetzung und Korrosionsmedium	81
4.4.3.2 Einfluss der Versuchsführung	87

<b>4.5</b>	<b>Wärmedämmschichten auf <math>\gamma</math>-Titanaluminidlegierungen</b>	<b>95</b>
4.5.1	Titanaluminide als Hochtemperatur-Strukturwerkstoffe	95
4.5.2	Mikrostruktur und Lebensdauer von EB-PVD Wärmedämmschichten auf $\gamma$ -TiAl	96
4.5.2.1	Veränderungen der Keramiksicht auf $\gamma$ -TiAl durch thermische Beanspruchung	98
4.5.2.2	Veränderungen der Mikrostruktur nach thermischer Beanspruchung im Übergangsbereich zwischen Wärmedämmschicht und Substrat	100
4.5.3	Schlussfolgerungen zur Anwendbarkeit von Wärmedämmschichten auf $\gamma$ -Titanaluminiden	103
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>105</b>
<b>6</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>107</b>