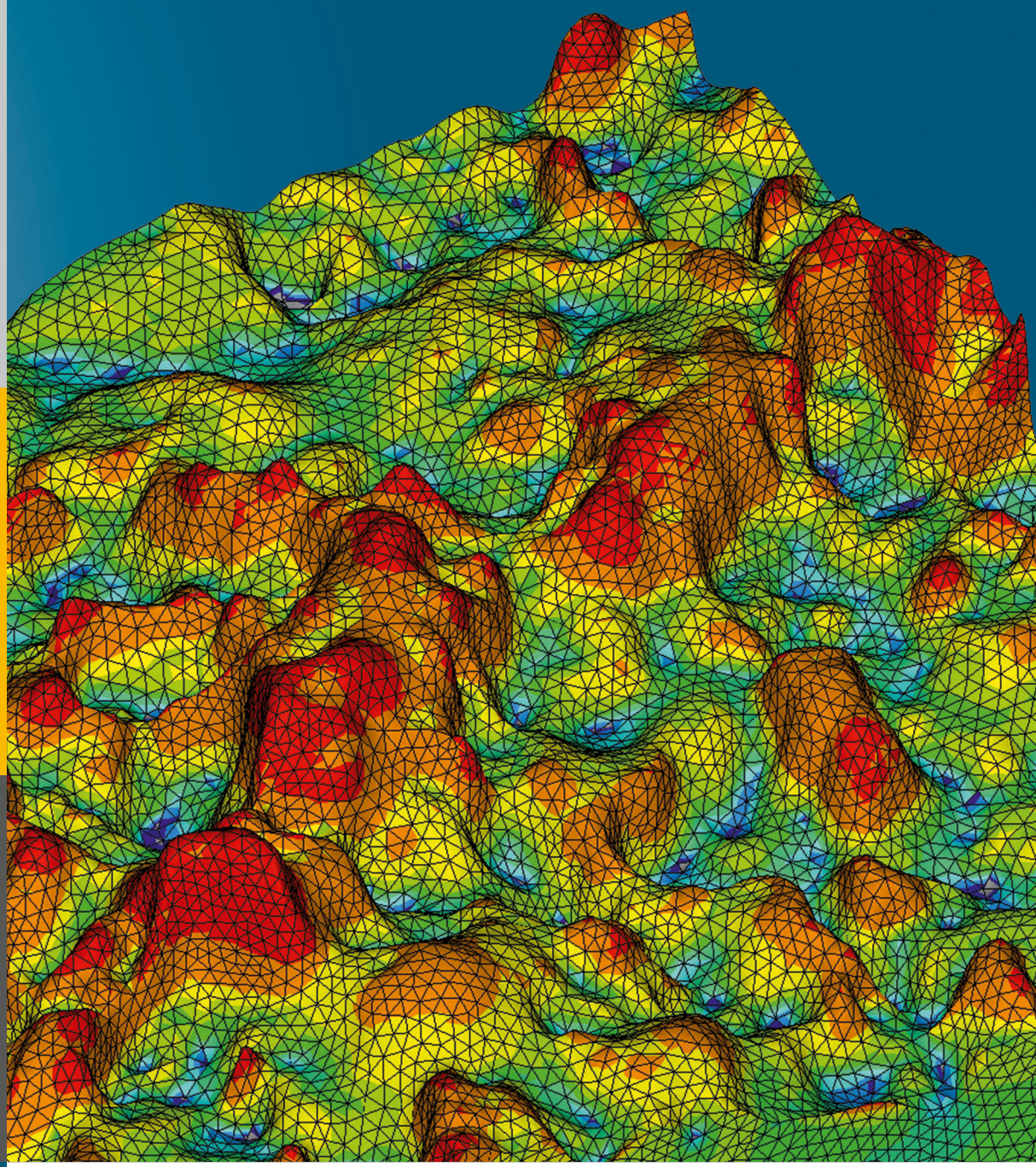


Spannungsinduziertes Versagen in Hochtemperaturschichtsystemen

Christian Nordhorn

JÜLICH
FORSCHUNGSZENTRUM

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Energie- und Klimaforschung
Werkstoffsynthese und Herstellungsverfahren (IEK-1)

Spannungsinduziertes Versagen in Hochtemperaturschichtsystemen

Christian Nordhorn

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment Band / Volume 241

ISSN 1866-1793 ISBN 978-3-95806-016-6

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Zielsetzung **1**

2 Grundlagen und theoretische Methoden **3**

2.1 Funktionen und Verlässlichkeit von Schichtsystemen 3

2.1.1 Hochtemperaturschichtsysteme 4

2.1.2 Bewertung der Systemverlässlichkeit 6

2.2 Lebensdauermodellierung 8

2.2.1 Das Lebensdauermodell in der Ausgangsversion 9

2.2.1.1 Bruchmechanischer Ansatz 10

2.2.1.2 Empirische Beschreibung thermisch induzierter Prozesse 15

2.2.2 Erweiterung des Lebensdauermodells 18

2.2.2.1 Probabilistisches Konzept 21

2.2.2.2 Statistische Auswertung 22

2.3 Finite-Elemente-Analyse thermisch induzierter Spannungsfelder 24

2.3.1 Finite-Elemente-Methode 25

2.3.1.1 Thermische Analyse 26

2.3.1.2 Strukturmechanische Analyse 27

2.3.2 Modellerstellung 28

2.3.2.1 Erstellung zweidimensionaler Netze 29

2.3.2.2 Erstellung dreidimensionaler Netze 32

2.3.3 Umsetzung der Randbedingungen in den strukturmechanischen Analysen 36

2.3.3.1 Umsetzung periodischer Randbedingungen 36

2.3.3.2 Umsetzung konsistenter Randbedingungen 38

2.4 Materialparameter 38

2.4.1 Thermische Materialeigenschaften 38

2.4.2 Mechanische Materialeigenschaften 39

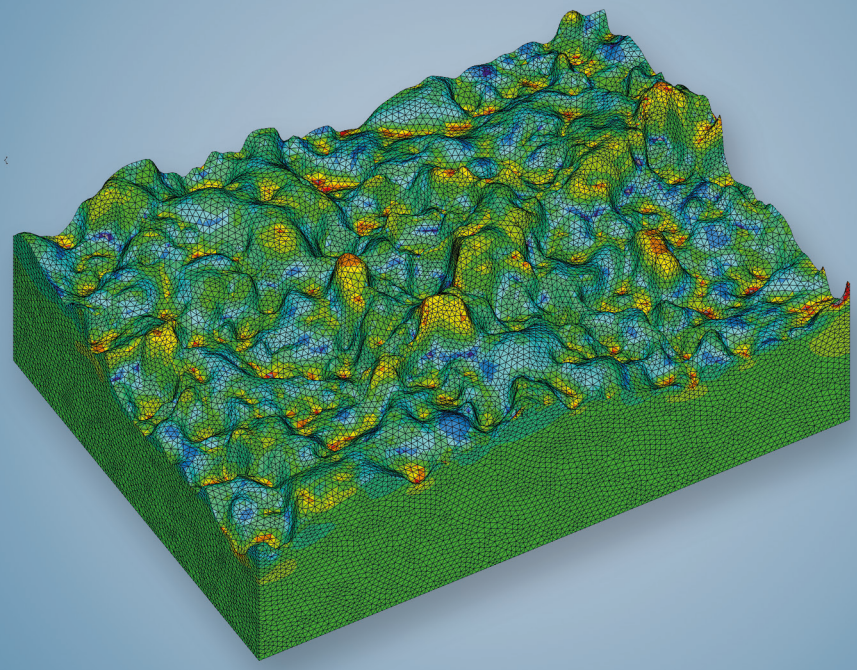
3 Experimentelle Methoden **41**
3.1 Herstellung der Proben . . . 41
3.1.1 Thermisches Spritzen . . . 41
3.1.2 Herstellung freistehender Schichten . . . 43
3.1.2.1 Herstellung freistehender BC-Schichten . . . 43
3.1.2.2 Herstellung freistehender Topcoat-Schichten . . . 44
3.1.3 Herstellung kompletter Wärmedämmschichtsysteme . . . 44
3.2 Thermozyklierung . . . 45
3.2.1 Zyklierung freistehender BC-Proben unter isothermen Bedingungen . . . 45
3.2.2 Zyklierung kompletter WDS-Systeme unter Temperaturgradienten . . . 46
3.3 Weitergehende Charakterisierung der Proben . . . 47
3.3.1 Messung des Topcoat-Elastizitätsmoduls . . . 47
3.3.2 Bestimmung der BC-Topographie . . . 49
3.3.3 TGO-Schichtdickenmessung . . . 49
3.3.4 TGO-Spannungsmessung . . . 50

4 Experimentelle Ergebnisse **55**
4.1 Effekt der thermischen Behandlung auf den Elastizitätsmodul des Topcoats . . . 55
4.2 Charakterisierung der BC-Probenoberflächen . . . 56
4.3 Thermische Zyklierung freistehender BC-Proben . . . 57
4.3.1 Oxidschichtwachstum . . . 58
4.3.2 Oxidschicht-Eigenspannungen . . . 61
4.4 Lebensdauern kompletter WDS-Systeme unter thermischer Zyklierung . . . 65

5 Ergebnisse der Modellierung **67**
5.1 Überprüfung zentraler Modellierungsannahmen . . . 67
5.1.1 Umsetzung der strukturmechanischen Randbedingungen . . . 67
5.1.2 Spannungsfreiheit des Systems am Ende der Hochtemperaturphase . . . 71
5.2 Simulation realitätsnaher Spannungsfelder . . . 71
5.2.1 Topcoat-Spannungsverteilung in dreidimensionalen Modellen . . . 73
5.2.2 Näherung der Spannungsfelder durch zweidimensionale Modelle . . . 74
5.3 Lebensdauermodellierung . . . 82
5.3.1 Interpretation des Kalibrierungsparameters . . . 84
5.3.2 Temperatureffekte . . . 86
5.3.3 Zyklendauereffekt . . . 94
5.3.4 Rauheitseffekt . . . 95
5.3.5 Effekte der transienten Prozesse . . . 96
5.3.5.1 Effekt des Oxidschichtwachstums . . . 96
5.3.5.2 Effekt der Zunahme des Elastizitätsmoduls . . . 97

6 Konzeptioneller Entwurf eines MCF-Lebensdauermodells **99**
6.1 Problemstellung und Einordnung 99
6.2 Berechnung der Energiefreisetzungsrate 101
6.3 Anwendung des Lebensdauermodell-Konzeptes 102

7 Zusammenfassung und Ausblick **105**



Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 241
ISBN 978-3-95806-016-6

JÜLICH
FORSCHUNGSZENTRUM