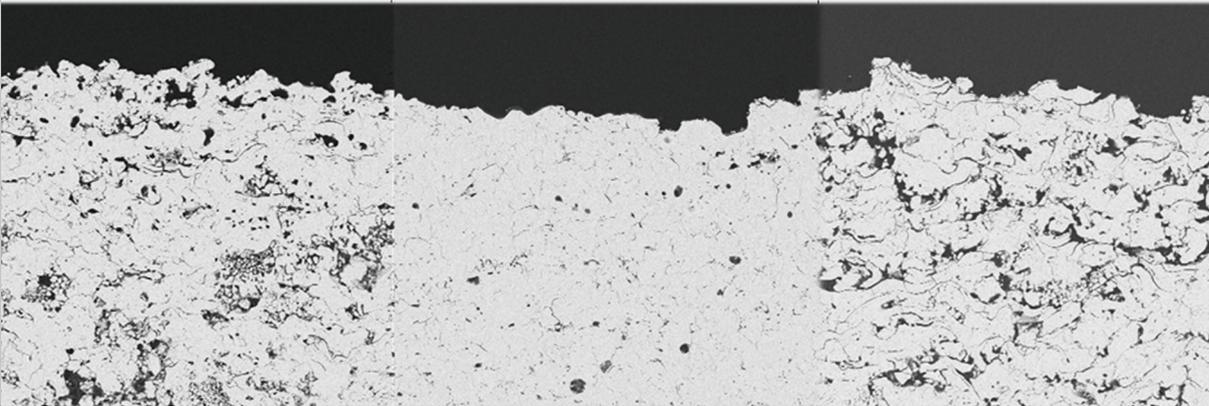
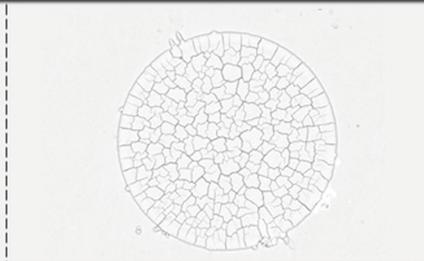
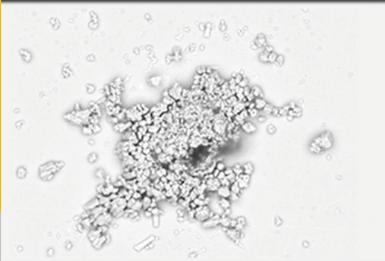


Herstellung thermisch gespritzter Schichten mit optimierten Spannungseigenschaften

Markus Gerhard Mutter



Energie & Umwelt /
Energy & Environment
Band / Volume 354
ISBN 978-3-95806-200-9

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

Herstellung thermisch gespritzter Schichten mit optimierten Spannungseigenschaften

Markus Gerhard Mutter

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 354

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-200-9

I. Inhaltsverzeichnis

I. INHALTSVERZEICHNIS	I
II. SYMBOL- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	IV
1. MOTIVATION UND ZIELSETZUNG DER ARBEIT	1
2. GRUNDLAGEN	3
2.1. Atmosphärisches Plasmaspritzen	3
2.1.1. Grundlegendes Konzept.....	3
2.1.2. Beschreibung der Partikel im Plasma	4
2.1.3. Schichtbildung beim Atmosphärischen Plasmaspritzen	8
2.2. Wärmedämmschichtsysteme.....	15
2.2.1. Aufbau eines Wärmedämmschichtsystems	15
2.2.2. Wirkprinzip der Wärmedämmschicht.....	16
2.2.3. Werkstoffe für Wärmedämmschichten	17
2.2.4. Schädigungsmechanismen an Wärmedämmschichtsystemen	18
2.3. Eigenspannungen in Atmosphärisch Plasmagespritzten Schichten	19
2.3.1. Allgemeines zu Eigenspannungen	19
2.3.2. Entstehung der Eigenspannungen in Atmosphärisch Plasmagespritzten Schicht	21
2.3.3. Messung von Eigenspannungen.....	26
3. EXPERIMENTELLE METHODEN.....	33
3.1. Atmosphärisches Plasmaspritzen	33
3.2. Mikroskopische Untersuchung der Proben	33
3.2.1. Rasterelektronenmikroskopie	33
3.2.2. Konfokale Laser-Raster-Mikroskopie	34
3.3. In situ Messung des Partikel-Status im Plasma	34
3.3.1. Bestimmung des Partikelaufschmelzgrades aus den Messdaten	35
3.4. Untersuchungen an einzelnen Splats.....	37
3.4.1. Herstellung der Proben	37
3.4.2. Auswertung der Proben	38
3.5. Untersuchungen an vollständigen Schichten	39
3.5.1. Herstellung der Proben	39
3.5.2. Systematische Variation der Spritzparameter.....	40
3.5.3. Materialographische Probenpräparation	42
3.5.4. Bestimmung der Porosität der Schicht.....	43
3.5.5. <i>In situ</i> -Krümmungsmessung	44
3.5.6. <i>Ex situ</i> -Krümmungsmessung	51
3.5.7. Inkrementelle Bohrlochmethode.....	53
3.5.8. Röntgenographische Spannungsanalyse	53
3.5.9. Bestimmung des E-Modul der Schicht	54

4. NUMERISCHE METHODEN	57
4.1. Simulation des Aufschmelzens der Partikel im Plasmastrahl	58
4.1.1. CFD Simulation des Plasmastrahls und der Partikeltrajektorien.....	58
4.1.2. Berechnung des Wärmeübergangs zwischen Plasma und Partikel.....	61
4.1.3. FE Simulation der lokalen Partikeltemperaturentwicklung.....	61
4.2. Simulation der Temperatur- und Spannungsentwicklung in idealen Splats	62
4.2.1. Thermische Berechnungen	63
4.2.2. Mechanische Berechnungen	64
4.2.3. Einfluss des Kriechens während der Abschreckung.....	64
4.3. Simulation der Eigenspannungsentwicklung während der Beschichtung	65
5. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE UND DISKUSSION	69
5.1. Messung des Partikelstatus im Plasma	69
5.1.1. Einfluss der Spritzparameter auf den Partikelzustand	69
5.1.2. Bestimmung des Partikelauftausaltemperaturgrades.....	72
5.1.3. Messungen entlang der Spritzachse für ausgewählte Parameter	73
5.1.4. Verteilung der Partikelkenngrößen senkrecht zur Spritzachse	76
5.2. Untersuchungen an einzelnen Splats	78
5.2.1. Definition der Splat-Klassen.....	78
5.2.2. Ausbreitungsverhalten der Splat-Klassen.....	80
5.2.3. Einfluss der Spritzparameter auf die relativen Häufigkeiten der Splat-Klassen ..	82
5.2.4. Bestimmung der Rissabstände an einzelnen Splats	84
5.3. Einfluss der Spritzparameter auf die Schichteigenschaften	85
5.3.1. Porosität der hergestellten Schichten	86
5.3.2. E-Moduln der hergestellten Schichten.....	87
5.3.3. Bestimmung der integralen Spannung über die ex situ-Krümmungsmessung	88
5.3.4. Bestimmung der integralen Spannung über die in situ-Krümmungsmessung.....	88
5.3.5. Quantifizierung der Einflüsse der Spritzparameter auf Schichteigenschaften	92
5.4. Plastische Prozesse im Substrat	93
5.5. Variation des Substrat-Materials für Referenzmessungen	94
5.6. Bestimmung des Eigenspannungstiefenverlaufs aus der Krümmungsmessung ...	96
6. MODELLIERUNGSERGEBNISSE UND DISKUSSION	99
6.1. Aufschmelzen der Partikel im Plasmastrahl	99
6.1.1. Berechnung der stationären Plasmafackel und der Partikel-Flugbahnen	99
6.1.2. Berechnung des Wärmeübergangs zwischen Plasma und Partikel.....	103
6.1.3. Berechnung der ortsabhängigen Temperaturentwicklung	104
6.2. Abkühlverhalten und Spannungsentwicklung in einem einzelnen Splat	110
6.2.1. Ergebnisse der FE Berechnungen	110
6.2.2. Einfluss der Mikrorissbildung	112
6.2.3. Einfluss des Kriechens.....	116
6.3. Berechnung des Eigenspannungstiefenverlaufs in der Schicht	117

7. ZUSAMMENFASSENDE DISKUSSION	121
7.1. Zusammenhang des Partikelstatus und der Splat-Klassen	121
7.1.1. Ideale und unregelmäßige Splats	121
7.1.2. Teilweise aufgeschmolzene Splats	121
7.1.3. Schwach angebundene Splats	122
7.2. Der Partikelaufschmelzgrad als Kenngröße für die Splat-Bildung	123
7.3. Korrelation von effektivem Partikelaufschmelzgrad und Mikrostruktur	126
7.4. Der E-Modul der Schicht	128
7.5. Entwicklung der Abschreckspannung	130
7.5.1. Spannungsentwicklung in einem einzelnen Splat.....	130
7.5.2. Überlagerung von Splats bzw. von Schichtlagen	131
7.5.3. Makroskopische Abschreckspannung in der Schicht	132
7.6. Einfluss der Spritzparameter auf die Schichteigenschaften	137
8. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	139
III. LITERATURVERZEICHNIS	VII
IV. ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XIX
V. TABELLENVERZEICHNIS	XXI
VI. ANHANG	I

**Energie & Umwelt /
Energy & Environment
Band / Volume 354
ISBN 978-3-95806-200-9**

