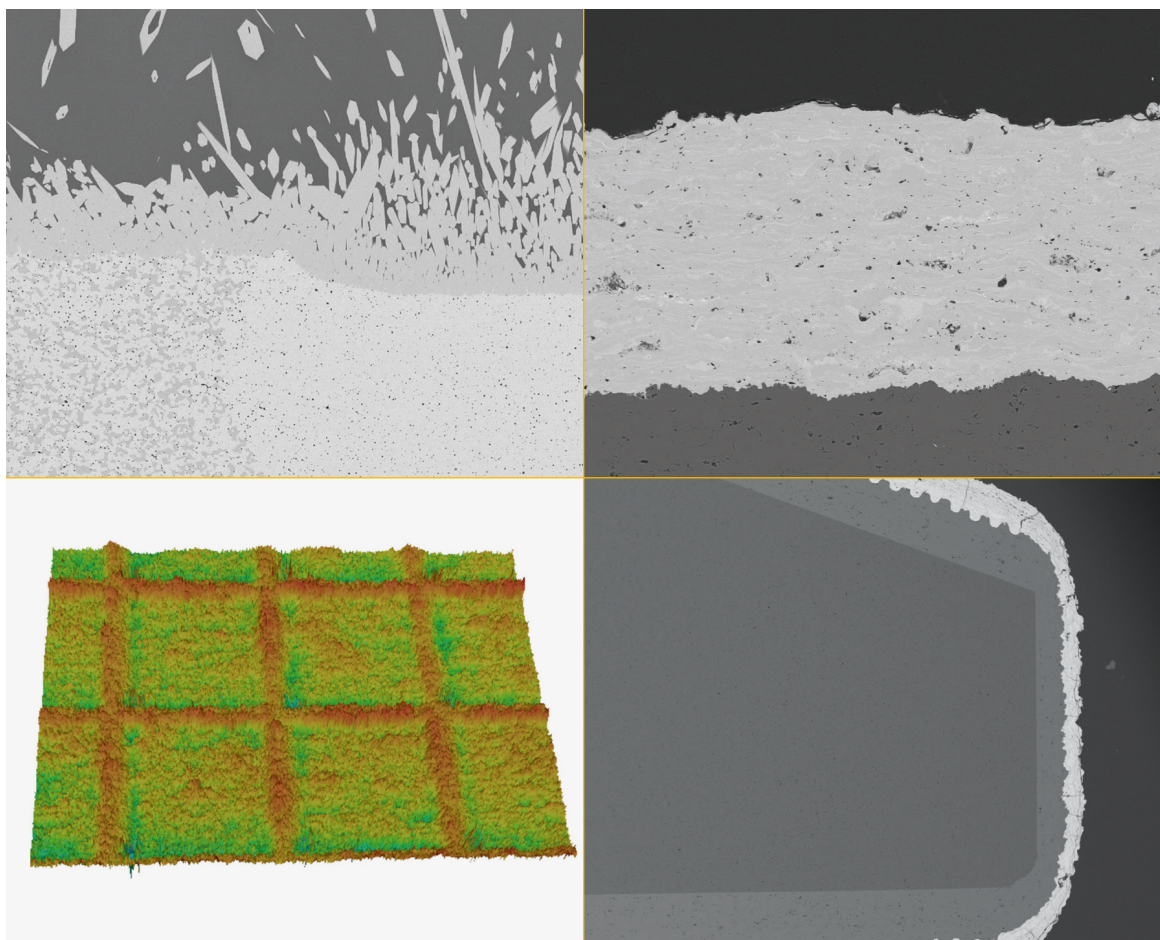




# Entwicklung von Schutzschichten für nicht-oxidische Faserverbundwerkstoffe

Markus Dietmar Wolf

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 528

ISBN 978-3-95806-524-6

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

# **Entwicklung von Schutzschichten für nicht-oxidische Faserverbundwerkstoffe**

Markus Dietmar Wolf

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

Band / Volume 528

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-524-6

## Inhaltsverzeichnis

|         |                                                                   |    |
|---------|-------------------------------------------------------------------|----|
| 1       | Einleitung .....                                                  | 1  |
| 2       | Zielsetzung .....                                                 | 2  |
| 3       | Grundlagen .....                                                  | 3  |
| 3.1     | Flugzeugtriebwerk .....                                           | 3  |
| 3.2     | Keramische Faserverbundwerkstoffe .....                           | 5  |
| 3.3     | Korrosion .....                                                   | 9  |
| 3.3.1   | Heißgaskorrosion .....                                            | 9  |
| 3.3.2   | Heißkorrosion .....                                               | 11 |
| 3.4     | Environmental Barrier Coatings .....                              | 12 |
| 3.5     | Thermisches Spritzen .....                                        | 17 |
| 3.5.1   | Theorie des thermischen Spritzens und des Schichtaufbaus .....    | 17 |
| 3.5.2   | Atmosphärisches Plasmaspritzen (APS) .....                        | 22 |
| 3.5.3   | Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF) .....                    | 22 |
| 3.5.4   | Niederdruckplasmaspritzen (VLPPS) .....                           | 23 |
| 3.6     | Haftung und Schichtversagen .....                                 | 23 |
| 3.6.1   | Risszähigkeit .....                                               | 23 |
| 3.6.2   | Haftmechanismen .....                                             | 27 |
| 3.6.3   | Rauigkeit .....                                                   | 28 |
| 3.6.4   | Prüfung der Haftfestigkeit .....                                  | 29 |
| 3.6.5   | Prüfung der Anhaftung unter thermischer Belastung .....           | 30 |
| 3.6.6   | Verfahren zur Verbesserung der Haftung .....                      | 30 |
| 3.7     | Laserablation .....                                               | 30 |
| 4       | Experimentelle Verfahren und Methoden .....                       | 33 |
| 4.1     | Verwendete Substratmaterialien .....                              | 33 |
| 4.2     | Thermisches Spritzen .....                                        | 34 |
| 4.2.1   | Atmosphärisches Plasmaspritzen (APS) .....                        | 34 |
| 4.2.1.1 | Atmosphärisches Hochgeschwindigkeits-Plasmaspritzen (HVAPS) ..... | 35 |
| 4.2.2   | Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF) .....                    | 35 |
| 4.2.3   | Niederdruckplasmaspritzen (VLPPS) .....                           | 35 |
| 4.3     | Materialcharakterisierung .....                                   | 35 |
| 4.3.1   | Verwendete Pulver .....                                           | 35 |
| 4.3.1.1 | Partikelgrößenanalyse durch Laserdiffraktometrie .....            | 36 |
| 4.3.1.2 | Phasenanalyse mittels Röntgendiffraktometrie .....                | 36 |
| 4.3.1.3 | Chemische Analyse der Pulver .....                                | 36 |
| 4.3.2   | Charakterisierung der Bulkmaterialien .....                       | 37 |
| 4.3.2.1 | Feldunterstütztes Sintern .....                                   | 37 |
| 4.3.2.2 | Hochtemperaturstabilitäts- und Interdiffusionsversuche .....      | 38 |
| 4.3.2.3 | Ermittlung der thermischen Ausdehnung mittels Dilatometrie .....  | 38 |

|         |                                                                                        |     |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.2.4 | Härteprüfung nach Vickers und Bestimmung der Risszähigkeit .....                       | 39  |
| 4.3.2.5 | CMAS-Reaktionstest .....                                                               | 39  |
| 4.3.3   | Charakterisierung von gespritzten Schichten .....                                      | 40  |
| 4.3.3.1 | Ermittlung der Haftzugsfestigkeit mittels Haftabzugs- und Pull-Off-Test .....          | 40  |
| 4.3.3.2 | Grenzflächenzähigkeitstest nach Kakisawa .....                                         | 41  |
| 4.3.3.3 | Porositätsmessung .....                                                                | 43  |
| 4.3.3.4 | Thermozyklierverfahren .....                                                           | 44  |
| 4.3.3.5 | Rasterelektronenmikroskopie .....                                                      | 44  |
| 4.3.4   | Laserstrukturierung .....                                                              | 45  |
| 4.3.4.1 | Oberflächenstrukturierung .....                                                        | 45  |
| 4.3.4.2 | Rauigkeitsmessung durch konfokalem Lasermikroskops .....                               | 46  |
| 5       | EBC-Materialstudie .....                                                               | 47  |
| 5.1     | Ergebnisse der Materialstudie .....                                                    | 47  |
| 5.2     | CMAS-Beständigkeitsstudie .....                                                        | 54  |
| 5.2.1   | CMAS-Reaktionen mit reinen seltenen Erdsilikaten .....                                 | 55  |
| 5.2.2   | CMAS-Reaktion mit gemischten Ytterbiumsilikaten .....                                  | 64  |
| 6       | Entwicklung und Optimierung von HVOF gespritzten Deckschichten .....                   | 72  |
| 6.1     | Ziel der Entwicklung von HVOF-Schichten .....                                          | 72  |
| 6.2     | Schichtentwicklung mit dem H <sub>2</sub> -betriebenen HVOF-Verfahren .....            | 72  |
| 6.3     | Schichtentwicklung mit dem CH <sub>4</sub> -betriebe HVOF-Verfahren .....              | 76  |
| 6.3.1   | Statistische Versuchsplanung HVOF .....                                                | 76  |
| 6.3.2   | Optimierung der Schichtqualität durch Verringerung der Pulverpartikelgröße .....       | 83  |
| 7       | Entwicklung und Optimierung von HVAPS gespritzten Deckschichten .....                  | 85  |
| 7.1     | Ziel der Entwicklung von HVAPS-Schichten .....                                         | 85  |
| 7.2     | Statistische Versuchsplanung HVAPS .....                                               | 85  |
| 7.3     | Optimierung der Schichtqualität durch Erhöhung der Nettoleistung .....                 | 93  |
| 7.4     | Optimierung der Schichtqualität durch Verringerung der Partikelgröße .....             | 95  |
| 8       | Entwicklung und Optimierung von VLPPS gespritzten Deckschichten .....                  | 96  |
| 8.1     | Ziel der Entwicklung von VLPPS-Schichten .....                                         | 96  |
| 8.2     | Statistische Versuchsplanung VLPPS .....                                               | 96  |
| 9       | Isotherme Zyklisierung der entwickelten Schutzschichten .....                          | 100 |
| 10      | Verstärkung des Haftvermittler-Deckschicht-Grenzfläche durch Laserstrukturierung ..... | 105 |
| 10.1    | Verwendete Laserstrukturen .....                                                       | 105 |
| 10.2    | Prozessparameterbestimmung .....                                                       | 106 |
| 10.2.1  | Punktstrukturen .....                                                                  | 106 |
| 10.2.2  | Gitterstrukturen .....                                                                 | 114 |
| 10.3    | Pull-off Adhäsionstest .....                                                           | 115 |
| 10.4    | Grenzflächenzähigkeitstest nach Kakisawa .....                                         | 116 |
| 11      | Beschichtung von Kanten geometrien .....                                               | 122 |
| 12      | Zusammenfassung und Ausblick .....                                                     | 127 |

|    |                             |     |
|----|-----------------------------|-----|
| 13 | Literatur .....             | 132 |
| 14 | Abbildungsverzeichnis ..... | 146 |
| 15 | Tabellenverzeichnis .....   | 149 |

Energie & Umwelt / Energy & Environment  
Band / Volume 528  
ISBN 978-3-95806-524-6