



Entwicklung von Reparaturmethoden für Nickel-Superlegierungen mittels thermischer Spritzverfahren

Tobias Kalfhaus

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 470

ISBN 978-3-95806-418-8

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

Entwicklung von Reparaturmethoden für Nickel-Superlegierungen mittels thermischer Spritzverfahren

Tobias Kalfhaus

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

Band / Volume 470

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-418-8

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Symbolverzeichnis	V
1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	1
2 Grundlage und Stand der Technik	5
2.1 Gasturbinen	5
2.2 Superlegierungen	6
2.3 Hochtemperaturverformung (Kriechen)	10
2.4 Etablierte Reparaturverfahren für Ni-Superlegierungen	12
2.5 Vakuum-Plasma-Spritzen	14
2.5.1 Aufbau der Spritzanlage	14
2.5.2 Schichtentstehung	15
2.6 Kaltgasspritzen	17
2.6.1 Aufbau der Spritzanlage	17
2.6.2 Bindemechanismen und Schichtenentstehung	18
2.7 Rekristallisation und Korngrenzenbewegung	22
3 Experimente und Methoden	25
3.1 Ausgangsmaterial	25
3.1.1 Substrate	25
3.1.2 Pulver	26
3.2 Methoden zur Probencharakterisierung	27
3.2.1 Metallographische Präparation	27
3.2.2 Konfokales Laser-Mikroskop	28
3.2.3 Rasterelektronenmikroskopie	29
3.3 Oberflächenbehandlung der Substrate	32
3.4 Temperaturregelung des Substrates	35
3.5 Vakuum-Plasma-Spritzen: Probenherstellung	36
3.6 Kalt-Gas-Spritzen: Probenherstellung	38
3.6.1 Spritzparameter: CMSX-4 Reparatur	38
3.6.2 Spritzparameter: IN-738 Reparatur	38
3.7 Wärmebehandlungen	42
3.7.1 Lösungsglühen	42
3.7.2 Ausscheidungshärtung	43
3.7.3 Heiß-Isostatisches-Pressen	45
3.7.4 Carburierung	46
3.7.5 Durchgeführte Wärmebehandlungen	46
3.8 Charakterisierung der Schichteigenschaften	51
3.8.1 Eigenspannungsmessungen	51

Inhaltsverzeichnis

3.8.2	Mikrozugkriechproben	53
3.8.3	Haftabzugsversuche	54
3.8.4	Indentation zur Simulation von Spannungs-Dehnungs-Kurven	55
4	Ergebnisse und Diskussion Teil 1: Vakuum-Plasma-Spritzen von CMSX-4	59
4.1	Mikrostruktur im Bereich der Grenzfläche	59
4.2	Fremdphasen in der Reparaturschicht	61
4.3	Einfluss der Spritzparameter auf die Reparaturschicht	63
4.3.1	Porosität in Abhängigkeit der Spritzparameter	65
4.3.2	Einfluss der Spritzparameter auf die Korngröße und den Sauerstoffgehalt	66
4.4	Mikrokriechproben	69
4.4.1	Charakterisierung des Probenmaterials	69
4.4.2	Ergebnisse der Mikrokriechversuche	72
4.4.3	Mikrostrukturelle Diskussion der Mikrokriechergebnisse	74
4.5	Ergebnisse der simulierten Spannungs-Dehnungs-Kurven	77
4.6	Unstetiges Kornwachstum	80
4.7	Gerichtetes Kornwachstum	84
4.8	Zusammenfassende Diskussion und Ausblick: Teil I	89
5	Ergebnisse und Diskussion Teil 2: Kaltgasspritzen	95
5.1	Aufprallbedingung der Pulver (Spritzfenster)	95
5.2	Reparatur von einkristallinem CMSX-4	98
5.2.1	Einfluss der Oberflächenvorbehandlung	98
5.2.2	Kaltverfestigung durch Strahlen im oberflächennahen Randbereich	101
5.3	Polykristalline Reparatur von IN-738	103
5.3.1	Einfluss der Substrattemperatur	104
5.3.2	Depositionseffizienzen unterschiedlicher Ni-Superlegierungen	108
5.3.3	Ergebnisse der Eigenspannungsuntersuchungen	110
5.3.4	Einfluss der Wärmebehandlung auf die Mikrostruktur	118
5.3.5	Einfluss der Oberflächenvorbehandlung auf die Adhäsion	120
5.3.6	Ergebnisse der simulierten Spannungs-Dehnungs-Kurven	123
5.4	Zusammenfassende Diskussion und Ausblick: Teil II	125
	Abbildungsverzeichnis	VI
	Tabellenverzeichnis	XIV
	Literaturverzeichnis	XXVII
	Danksagung	XXIX

Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 470
ISBN 978-3-95806-418-8