

Inhaltsangabe

1	Einleitung	1
2	Kenntnisstand	8
2.1	Die Ni-Super-Legierung	8
2.2	Die MCrAlY-Oxidationsschutz- bzw. –Haftvermittlerschicht	10
2.3	Kriechen metallischer Werkstoffe	13
2.4	Die Al ₂ O ₃ -Schicht	16
2.5	Die ZrO ₂ -Wärmedämmschicht	24
2.6	Spannungs- und Verformungs-Simulationen	28
2.7	Experimentell gemessene Spannungen in WDS-Systemen	43
2.8	Einfluß der HVS-Grenzflächenrauigkeit auf die thermozyklische Lebensdauer und das TGO-Wachstum im Experiment	45
3	Zieldefinition und Versuchsplan	46
4	Versuchseinrichtung und -durchführung	50
4.1	Thermozykliertests	50
4.1.1	Herstellung der Grundwerkstoffproben für die Thermozykliertests	50
4.1.2	Erzeugung unterschiedlicher Oberflächenrauigkeiten auf den Grundwerkstoffproben	50
4.1.3	Aufbringen von Al ₂ O ₃ -Schichten mit unterschiedlichen Korngrößen	53
4.1.4	Aufbringen der plasmagespritzten Wärmedämmschicht	56
4.1.5	Einrichtung und Durchführung der Thermozykliertests zur Lebensdauerbestimmung	56
4.1.6	Untersuchung der Schädigungsevolution mittels Thermografie	57
4.2	Versuche zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der Schichtkomponenten	58
4.2.1	Zugversuche am Substratmodellwerkstoff Fecralloy	58
4.2.2	Kriechversuche an den Substratmodellwerkstoffen Fecralloy und MA956	58
4.2.3	Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Substratmodellwerkstoffs Fecralloy	59
4.2.4	Kriech- und Druckversuche an freistehenden ZrO ₂ -WDS-Röhrchen	59
4.2.5	Indenterversuche an den Substratmodellwerkstoffen Fecralloy und MA956 und der ZrO ₂ -WDS	59
5	Ergebnisse und Diskussion	61
5.1	Ermittlung der Eigenschaften der Substrate, der Al ₂ O ₃ -Schicht und der WDS	61
5.1.1	Elastisch-plastische Eigenschaften der Substratwerkstoffe	61
5.1.2	Kriecheigenschaften der Substratwerkstoffe	62
5.1.3	Ermittlung der elastisch-plastischen Eigenschaften durch inverse Analyse von Hoch-Temperatur-Indenterversuchen an den Substratwerkstoffen	64
5.1.4	Oxidationskinetik der Al ₂ O ₃ -Schicht	67
5.1.5	Elastizitätsmodul und Kriechverformung der YSZ-WDS	68
5.2	Ergebnisse der Thermozykliertests	71

Inhaltsangabe

5.2.1	Makroskopische Versagensweise der WDS am Lebensdauerende	71
5.2.2	Thermozyklische Lebensdauerern	75
5.2.3	Risspfade	80
5.2.4	Details und Besonderheiten der Schädigung	83
5.2.5	Al ₂ O ₃ -Schichtdicken am Lebensdauerende bei stochastischem 3-D-(Sandstrahl-) Rauigkeitsprofil	90
5.2.6	Steifigkeit der WDS nach dem Lebensdauerende beim Sandstrahlrauigkeitsprofil	94
5.2.7	Rissevolution: Beschreibung der gelben und roten Thermografie-zonen bei stochastischem 3-D(Sandstrahl-)Rauigkeitsprofil	95
5.2.8	Rissevolution: Teilweise Delamination direkt nach dem Plasma-spritzen der WDS	110
5.2.9	Rissevolution: Entstehung und Wachstum von delaminierten Bereichen während der Thermozyklisierung	112
5.2.10	Rissevolution: Form der Delaminationsflächen am Lebensdauer-ende	116
5.2.11	Rissevolution: Zykluszahl bis zur ersten gelben und roten Thermo-grafiezone bei stochastischem 3-D(Sandstrahl-) Rauigkeitsprofil	119
5.2.12	Rissevolution: Wachstum der Gruppengröße der Thermografie-zonen beim Sandstrahlrauigkeitsprofil	120
5.2.13	Rissevolution: Rate, mit der sich beim Sandstrahlrauigkeitsprofil neue gelbe Thermografie-zonen bilden	121
5.2.14	Rissevolution: Wachstumsgeschwindigkeit einzelner gelber Thermografie-zonen beim Sandstrahlrauigkeitsprofil	125
5.2.15	Rissevolution: Verlangsamung der Durchmesserzunahme isolierter gelber Thermografie-zonen beim Sandstrahlrauigkeitsprofil	127
5.2.16	Rissevolution: Kritischer Durchmesser ungeschädigter Zonen, die von delaminierten Bereichen umschlossen sind, bei dem beim Fecralloy-Substrat mit Sandstrahlrauigkeitsprofil abrupte Delamination eintritt	128
5.2.17	Rissevolution: Entwicklung der Gesamt-Delaminationsfläche	130
5.2.18	Rissevolution: Untersuchung der Schädigung in den frühen Stadien der Thermozyklisierung im Querschliff	137
5.2.19	Rissevolution: Simulation des Rissflächenwachstums auf der gesamten Probe bei stochastischem 3-D (Sandstrahl-)Rauigkeitsprofil, Fecralloy-Substrat mit grobkörniger Al ₂ O ₃ -Schicht oder ohne Voroxidation	149
6	Zusammenfassung und Diskussion	153
6.1	Stochastisches 3-D-(Sandstrahl-)Rauigkeitsprofil	153
6.1.1	Schädigungsentwicklung	153
6.1.2	Einfluß der Kriechfestigkeit des Substrats bei grobkörnigem Al ₂ O ₃	155
6.1.3	Einfluß der Rauigkeitstiefe bei grobkörnigem Al ₂ O ₃	156
6.1.4	Vergleich von nicht voroxidierten Proben und Proben mit vor dem Plasmaspritzen aufgebrachttem grobkörnigem Al ₂ O ₃ bei Fecralloy und Rauigkeitsklasse 2	157
6.1.5	Einfluß der Kriechfestigkeit des Substrats bei feinkörnigem Al ₂ O ₃	157
6.1.6	Einfluß der Rauigkeitsklasse bei feinkörnigem Al ₂ O ₃	158
6.2	Periodisches 2-D-(Rillen-)Rauigkeitsprofil	158
6.2.1	Einfluß der Kriechfestigkeit des Substrats	159
6.2.2	Einfluß der Al ₂ O ₃ -Kriechfestigkeit	159

Inhaltsangabe

6.2.3	Einfluß der Rauigkeitsklasse	159
6.3	Zusammenfassung der prinzipiellen Einflüsse auf die einzelnen Aspekte der Schädigungsentwicklung und die Lebensdauer	160
6.4	Schlußfolgerungen	163
6.5	Vergleich der experimentellen Ergebnisse dieser Arbeit (FZ-Jülich, IEF-2) mit den Ergebnissen der FEM-Spannungs-Simulation des vorliegenden Modellsystems durch den Projektpartner (Universität Braunschweig, IfW)	163
7	Anhang	
8	Quellenverzeichnis	