

1. EINLEITUNG	1
2. THEORIE UND KENNTNISSTAND	5
2.1. Wärmedämmschichtsysteme	5
2.1.1 Substratwerkstoffe	6
2.1.2 Bondcoat und TGO	6
2.1.3 Wärmedämmschicht	7
2.2. Versagen der Wärmedämmschichten	11
2.2.1 Versagen durch Oxidation	12
2.2.2 Sintern der keramischen Wärmedämmschicht	14
2.2.3 Schädigung durch Erosion	14
2.2.4 Schädigung durch Interdiffusion	15
2.3. Oxidationstheorie nach Wagner	15
2.4. Oxidwachstum auf MCrAlY-Schichten	18
2.5. Einfluss der reaktiven Elemente	21
2.5.1 Schwefel-Effekt	21
2.5.2 Änderung des Oxidwachstumsmechanismus	22
2.5.3 Änderung der Grenzflächenenergie	23
2.5.4 Mechanical keying/pegging	23
2.5.5 Porenbildung an den Grenzflächen	23
2.5.6 Verformbarkeit des Oxids	24
2.5.7 Dotierung des Oxids	24
2.6. Spannungsaufbau in den Oxidschichten	25
2.6.1 Thermisch induzierte Spannungen	25
2.6.2 Wachstumsspannungen	25
3. ZIELSETZUNG DER ARBEIT	29
4. EXPERIMENTELLES	33
4.1. Untersuchte Werkstoffe	33
4.2. Oxidationsversuche	34
4.3. Nachuntersuchungsverfahren	35
4.3.1 Sekundärneutralteilchen-Massenspektrometrie (SNMS)	35
4.3.2 Piezospektroskopie	35
5. EINFLUSS DER BONDCOATZUSAMMENSETZUNG AUF DIE LEBENSDAUER VON EB-PVD- WÄRMEDÄMMSCHICHTSYSTEMEN	39
5.1. Allgemeine Bemerkungen	39
5.2. Charakterisierung der EB-PVD-Wärmedämmschichtproben im Ausgangszustand	40
5.3. Einfluss des Yttriumgehalts	41
5.4. Einfluss des Aluminiumgehalts	44
5.5. Einfluss von „Co-doping“	47
5.5.1 Vergleich mit Wärmedämmschichten mit Hf-mod. Bondcoat	50
5.6. Herstellungsprozessabhängige Schwankungen der Lebensdauer von Wärmedämmschichten	52
5.7. Diskussion der Lebensdauerergebnisse und weitere Vorgehensweise	55
6. EINFLUSS EINZELNER SCHRITTE DER HERSTELLUNGSKETTE AUF DAS OXIDATIONSVERHALTEN VON MCrAlY-BONDCOATS	57
6.1. Einführung	57
6.2. Einfluss des Sauerstoffgehaltes in der Vakuumkammer während des Vakuumplasmaspritzens auf die Oxidation von MCrAlY+Hf Bondcoats	59
6.3. Einfluss der Oberflächenvorbehandlung auf das Oxidationsverhalten der NiCoCrAlY-Bondcoats	64
6.4. Einfluss der Vakuumwärmebehandlung auf Y-Verarmung im Bondcoat	71

6.5.	Einfluss des Aluminiumgehalts in der MCrAlY-Schicht auf RE-Verteilung während der Vakuumwärmebehandlung.....	74
6.6.	Einfluss der Abfolge der Herstellungsschritte auf die Oxidschichtmorphologie.....	76
6.6.1	Mechanische Instabilität der MCrAlY-Oberfläche	81
6.7.	Einfluss der Vakuumqualität während der Vakuumwärmebehandlung.....	84
6.8.	Einfluss der Vakuumwärmebehandlungstemperatur auf das Oxidationsverhalten von freistehenden MCrAlY-Schichten.....	86
6.9.	Einfluss der Wärmebehandlungstemperatur auf die TGO-Wachstumsrate und –morphologie von co-dotierten MCrAl-Schichten.....	91
6.9.1	Einfluss der Wärmebehandlungsparameter auf das Oxidationsverhalten der freistehenden co-dotierten MCrAl-Schichten	100
6.10.	Diskussion	102
7.	EINFLUSS DER PROBENGOMETRIE AUF DAS OXIDATIONSVERHALTEN VON MCrAlY BONDCOATS	104
8.	EINFLUSS DER BONDCOATZUSAMMENSETZUNG AUF DIE ENTWICKLUNG THERMISCH INDUZIERTER SPANNUNGEN IM TGO.....	106
8.1.	Einführung.....	106
8.2.	Modellierung der Gleichgewichtsphasenzusammensetzung der untersuchten MCrAlY-Schichten	106
8.3.	Korrelation der Phasengleichgewichts mit dem Wärmeausdehnungskoeffizienten als Funktion der Temperatur.....	108
8.4.	Korrelation der gemessenen Spannungen mit dem Wärmeausdehnungskoeffizienten und dem Versagen der Oxidschicht	110
9.	EFFEKT DER BONDCOATZUSAMMENSETZUNG AUF DIE LEBENSDAUER VON APS-WÄRMEDÄMMSCHICHTSYSTEMEN.....	115
9.1.	Einführung.....	115
9.2.	Einfluss der Rauigkeit auf das Oxidationsverhalten von MCrAlY-Schichten.....	116
9.3.	Co-Doping-Effekte während der Vakuumwärmebehandlung und anschließender Oxidation.....	119
9.4.	Charakterisierung der APS-Wärmedämmschichtproben im Ausgangszustand.....	123
9.5.	Einfluss des Yttriumgehalts	127
9.6.	Einfluss des Aluminiumgehaltes	130
9.7.	Einfluss von „Co-doping“	133
9.8.	Quasiisotherme Oxidationsversuche bei 1000°C an Luft	135
10.	DISKUSSION DER VERSAGENSMECHANISMEN DER UNTERSCHIEDLICHEN WÄRMEDÄMMSCHICHTSYSTEME.....	137
11.	EINFLUSS UNTERSCHIEDLICHER ATMOSPHÄREN AUF WACHSTUM UND MORPHOLOGIE VON TGO AUF MCrAlY-BONDCOATS	146
11.1.	Einführung.....	146
11.2.	Oxidation der High-Y-Schicht in Ar-7% H_2O , Ar-0.1% H_2 -7% H_2O und Ar-20% O_2	148
11.3.	Oxidation in Ar-4% H_2 -2% H_2O	153
11.3.1	Beta-Schicht	156
11.3.2	Gamma-Schicht.....	157
11.3.3	High Y-Schicht.....	159
11.3.4	Blasenbildung in wasserstoffhaltigen Atmosphären	162
11.3.5	Druckaufbau im Material aufgrund der Wasserstoffrekombination	165
11.3.6	Diskussion	170
12.	ZUSAMMENFASSUNG.....	173
13.	LITERATURVERZEICHNIS	178
14.	ANHANG.....	I