

INHALTSVERZEICHNIS

I.	EINLEITUNG	1
II.	STAND DER TECHNIK	3
1	Gusseisenwerkstoffe	3
1.1	Allgemeiner Überblick	3
1.2	Gefügebildung von graphitischem grauen Gusseisen	5
1.3	Seigerungsverhalten	8
1.4	Physikalische und thermophysikalische Eigenschaften	11
1.5	Beanspruchungsverhalten	13
1.5.1	Reibungs- und Verschleißverhalten	14
1.5.1.1	Moderate Beanspruchungsbedingungen (leichter Verschleiß)	15
1.5.1.2	Hohe Beanspruchungsbedingungen (schwerer Verschleiß)	18
1.5.2	Korrosionsverhalten	19
1.6	Fazit und Schlussfolgerungen	21
2	Verfahrens- und werkstoffspezifische Aspekte der Einzelverfahren zur Randschichtbehandlung von Gusseisenwerkstoffen	22
2.1	Charakteristik und Einteilung von Randschichtbehandlungsverfahren	22
2.2	Thermische Fest- und Flüssigphasen-Randschichtbehandlung mittels Hochenergiestrahilverfahren (UG 6.2.2 und 6.2.x)	24
2.2.1	Energiequellen und Verfahrenseinteilung	24
2.2.2	Energieeintrag und -transport bei der EB-Randschichtbehandlung	25
2.3	Festphasen-Randschichtbehandlung: Härten (UG 6.2.2)	26
2.3.1	Definition und allgemeine Verfahrensmerkmale	26
2.3.2	Umwandlungsverhalten von Fe-C-Si-Legierungen unter Berücksichtigung der schnellen Erwärmung und Abkühlung	28
2.3.3	Gefüge-/Eigenschaftsrelationen nach dem Randschichthärten von Gusseisenwerkstoffen	29
2.4	Flüssigphasen-Randschichtbehandlung (UG 6.2.x)	32
2.4.1	Vorbetrachtungen zu Besonderheiten in der Flüssigphase	32
2.4.1.1	Ursachen und Auswirkungen der Schmelzbadbewegung	32
2.4.1.2	Ursachen der Rissbildung und Gegenmaßnahmen	33
2.4.1.3	Ursachen der Porenbildung und Gegenmaßnahmen	35
2.4.2	Flüssigphasenbehandlung ohne Zusatzstoff: Umschmelzen	36
2.4.2.1	Definition, Schichtaufbau und allgemeine Verfahrensmerkmale	36
2.4.2.2	Einfluss der Schnellerwärmung und -erstarrung auf die Mikrostruktur	36
2.4.2.3	Beeinflussung des Eigenspannungszustandes in Überlappungszonen	39
2.4.2.4	Härte und Verschleißverhalten	41
2.4.2.5	Korrosionsverhalten	42
2.4.3	Flüssigphasenbehandlung mit Zusatzstoff: Legieren, Auftragen	43
2.4.3.1	Definition, Schichtaufbau und allgemeine Verfahrensmerkmale	43
2.4.3.2	Legieren und Auftragen von Ni-Basis-Zusatzstoffen	45
2.4.4	Thermische Beständigkeit von mittels Fest-/Flüssigphasenprozessen modifizierten Randschichten	47
2.5	Thermochemische Randschichtbehandlung (UG 6.2.7)	50
2.5.1	Nitrieren	50
2.5.1.1	Definition, allgemeine Verfahrensmerkmale und Schichtaufbau	50
2.5.1.2	Besonderheiten der Nitrierschichtbildung bei Gusseisenwerkstoffen	53
2.5.1.3	Beanspruchungsverhalten	57
2.5.2	Borieren	58
2.5.2.1	Definition, allgemeine Verfahrensmerkmale und Schichtaufbau	58
2.5.2.2	Besonderheiten bei der Boridschichtbildung auf Gusseisenwerkstoffen	60
2.5.2.3	Borieren von Ni-Basis bzw. Ni-haltigen Legierungen	61
2.5.2.4	Beanspruchungsverhalten	62

2.6	Beschichten aus dem gas-/dampförmigen Zustand (UG 5.8)	63
2.6.1	Definition, Schichtaufbau und allgemeine Verfahrensmerkmale	63
2.6.2	Besonderheiten bei der Hartstoffbeschichtung auf Gusseisenwerkstoffen	64
2.6.3	Reibungs- und Verschleißverhalten	65
2.6.4	Korrosionsverhalten	66
2.7	Anforderungsspektrum und Herausforderungen bei der Randschichtbehandlung aufgrund der werkstoffspezifischen Merkmale von Gusseisen	69
3	Kombinationsverfahren zur Randschichtbehandlung	70
3.1	Definition, Systematik und Mechanismen der Kombinationsverfahren	70
3.2	Verfahrenseinteilung für Gusseisenwerkstoffe	72
3.3	Stand der Kombinationsverfahren zur Randschichtbehandlung von Gusseisenwerkstoffen	74
III.	UNTERSUCHUNGSMETHODEN	78
4	Methoden zur Oberflächen- und Schichtcharakterisierung	78
4.1	Oberflächencharakterisierung	78
4.2	Probenpräparation	78
4.3	Randschicht-/Schichtcharakterisierung	79
4.3.1	Gefügebautbau	79
4.3.2	Schichtdicke	80
4.3.3	Elementkonzentrations-Tiefen-Verläufe (GDOES)	81
4.4	Röntgenographische Phasenanalyse (XRD)	81
5	Schichteigenschaften und Beanspruchungsverhalten	82
5.1	Härtemessung	82
5.2	Scratch-Test	82
5.3	Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten	84
5.3.1	Voruntersuchungen	84
5.3.2	Prüfparameter und Auswertung	85
5.4	Untersuchungen zum Korrosionsverhalten	87
5.4.1	Voruntersuchungen	87
5.4.2	Prüfparameter und Auswertung	88
IV.	UNTERSUCHUNGEN ZU EINZEL- UND KOMBINATIONSVRFahren ZUR Randschichtbehandlung von Gusseisenwerkstoffen	90
6	Charakterisierung der Gusseisenwerkstoffe	90
7	Einzelverfahren zur Erzeugung von dicken Stützsichten mittels thermischer EB-Randschichtbehandlung	92
7.1	EB-Festphasen-Randschichtbehandlung	92
7.1.1	Strahlführungstechniken und technologiespezifische Parameter	92
7.1.2	Vorbetrachtungen zum EB-Härten (EBH) der Gusseisenwerkstoffe	93
7.1.3	Technologische Einflussgrößen	94
7.1.4	Werkstoffspezifische Einflussgrößen	97
7.2	EB-Flüssigphasen-Randschichtbehandlung	98
7.2.1	Strahlführungstechniken und technologiespezifische Parameter	98
7.2.2	EB-Umschmelzen (EBU)	100
7.2.2.1	Technologische Einflussgrößen	100
7.2.2.2	Werkstoffspezifische Einflussgrößen	103
7.2.3	EB-Auftragen (EBA)	105
7.3	Vergleichende Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten	107
7.3.1	Gusseisenwerkstoffe	107
7.3.1.1	Charakterisierung des Ausgangszustandes	107
7.3.1.2	Einfluss der Matrixhärte und der Graphitmorphologie (Werkstoffvergleich)	107
7.3.1.3	Vergleich Gusseisen und Stahl	109
7.3.1.4	Einfluss des Oberflächenbearbeitungszustandes am Bsp. S600	110

7.3.1.5	Zusammenfassung und Fazit für weitere Untersuchungen	112
7.3.2	EB-Randschichtbehandlungen (EBH; EBU; EBA)	112
7.3.2.1	Charakterisierung der Ausgangszustände	112
7.3.2.2	Verschleiß- und Reibungskoeffizienten	112
7.3.2.3	Untersuchungen zum Verschleißmechanismus der EBH-Schichten	114
7.3.2.4	Untersuchungen zum Verschleißmechanismus der EBU-/EBA-Schichten	116
7.4	Vergleichende Untersuchungen zum Korrosionsverhalten	118
7.4.1	Gusseisenwerkstoffe	118
7.4.2	Einzelbehandlungen: EB-Randschichtbehandlungen	119
7.5	Thermische Stabilität von EB-behandelten Gusseisenrandschichten	120
7.5.1	EB-Härteschichten (EBH)	120
7.5.2	EB-Umschmelzschichten (EBU)	121
7.5.3	EB-Auftragschichten (EBA)	123
7.6	Vergleichende Bewertung der EB-Randschichtbehandlungsverfahren	124
8	Kombinationsverfahren auf der Basis einer thermischen Randschichtbehandlung und einer nachfolgenden thermochemischen Behandlung oder Hartstoffbeschichtung als Toplayer	126
8.1	Kombinationsverfahren in Verbindung mit einer HARTSTOFFBESCHICHTUNG	126
8.1.1	Verfahren und Parameter zur Hartstoffbeschichtung	126
8.1.2	Einzelbehandlung: Hartstoffbeschichtung (HSB)	126
8.1.2.1	PVD-Beschichtung: TiN	126
8.1.2.2	PA-CVD-Beschichtung: TiN, Ti(CN); Ti(BN)	127
8.1.3	Kombinationsbehandlung: EBH+HSB (PVD; PA-CVD)	129
8.1.3.1	Energieabsorption	129
8.1.3.2	Kombinationsbehandlungen: PVD+EBH; EBH+PVD	129
8.1.3.3	Kombinationsbehandlungen: EBU+PA-CVD; EBU+[N+PA-CVD]	132
8.2	Vergleichende Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten	134
8.2.1	Charakterisierung der Ausgangszustände	134
8.2.2	Untersuchungen zur Schichthaftung im Ritztest mit steigender Last	134
8.2.2.1	Einzel- und Kombinationsbehandlungen mit PVD-Beschichtung	134
8.2.2.2	Einzel- und Kombinationsbehandlungen mit PA-CVD-Beschichtungen	136
8.2.3	Untersuchungen zum Verschleißverhalten unter gleitender Beanspruchung	138
8.2.3.1	Einzelbehandlung: PVD – Einfluss der Graphitmorphologie	138
8.2.3.2	Einzelbehandlung: PA-CVD – Einfluss der Hartstoffbeschichtung	139
8.2.3.3	Kombinationsbehandlungen mit PVD-Beschichtung	141
8.2.3.4	Kombinationsbehandlungen mit PA-CVD-Beschichtungen	142
8.2.3.5	Kombinationsbehandlungen mit EBU und/oder Nitrieren am Bsp. der Ti(C, N)-Schicht	144
8.3	Vergleichende Untersuchungen zum Korrosionsverhalten	145
8.3.1	Einfluss des Substrates auf das Korrosionsverhalten einer PVD-Schicht (TiN)	145
8.3.2	Einfluss der Schichtzusammensetzung und des Substrates auf das Korrosionsverhalten von PA-CVD-Schichten	147
8.4	Kombinationsverfahren in Verbindung mit dem NITRIEREN	150
8.4.1	Verfahren und Parameter zum Nitrieren	150
8.4.2	Einzelbehandlung: Nitrieren	150
8.4.2.1	Ausgangssituation	150
8.4.2.2	Theoretische Überlegungen zum Nitriermechanismus von Gusseisen	151
8.4.2.3	Einfluss des ferritischen bzw. perlitischen Matrixgefüges auf den Aufbau und die Eigenschaften der Verbindungsschicht	152
8.4.2.4	Einfluss des Matrixgefüges auf den Aufbau und die Eigenschaften der Diffusionsschicht	155
8.4.3	Kombination: EB-Umschmelzen+Nitrieren	157
8.4.3.1	Ausgangssituation	157

8.4.3.2	Einfluss des ledeburitischen Matrixgefüges auf den Aufbau und die Eigenschaften der Verbindungsschicht	157
8.4.3.3	Einfluss des ledeburitischen Matrixgefüges auf den Aufbau und die Eigenschaften der Diffusionsschicht	159
8.5	Vergleichende Untersuchungen zum tiefenabhängigen Nitrier- und Beanspruchungsverhaltens verschiedener Gusseisenwerkstoffe.....	162
8.5.1.1	Charakterisierung des ferritischen Gusseisens S400 nach der Einzel- und Kombinationsbehandlung (GN1: 540 °C/16 h/ $K_N = 4,5$)	162
8.5.1.2	Charakterisierung perlitischer Gusseisen L250, S600 nach der Einzel- und Kombinationsbehandlung (GN1: 540 °C/16 h/ $K_N = 4,5$)	166
8.5.1.3	Charakterisierung des ferritischen Gusseisens S400 nach der Einzel- und Kombinationsbehandlung (GN2: 540 °C/16 h/ $K_N = 0,4$)	169
8.6	Vergleichende Untersuchungen zum Korrosionsverhalten	171
8.6.1	Einzelbehandlung: Nitrieren – Vergleich Gusseisen und Stahl	171
8.6.2	Kombinationsbehandlungen mit Nitrieren	173
8.7	Kombinationsverfahren in Verbindung mit dem BORIEREN	176
8.7.1	Verfahren und Parameter zum Borieren	176
8.7.2	Einzelbehandlung: Borieren	176
8.7.3	Kombinationsbehandlung: EBU bzw. EBA+B	178
8.7.3.1	Einfluss der chemischen Zusammensetzung der Randschicht	178
8.7.3.2	Untersuchungen zum Tieftemperaturborieren ($T_B \leq 700$ °C).....	181
8.8	Vergleichende Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten	182
8.8.1	Einzelbehandlung: Borieren – Vergleich Gusseisen und Stahl	182
8.8.2	Kombinationsbehandlungen mit Borieren	183
8.9	Vergleichende Untersuchungen zum Korrosionsverhalten	187
8.9.1	Einzelbehandlung (Vergleich boriertes Gusseisen und borierter Stahl)	187
8.9.2	Kombinationsbehandlungen mit Borieren	188
V.	POTENZIALE UND GRENZEN DER EINZEL- UND KOMBINATIONSBEHANDLUNGEN.....	190
9	Prozessablauf und Mechanismen der Kombinationsbehandlungen	190
10	Gefüge- und Eigenschaften nach der Einzel- und Kombinationsbehandlung.....	191
10.1	Besonderheiten bei der Schichtbildung	191
10.2	Eigenschaftsprofile nach den Einzelbehandlungen.....	192
10.3	Eigenschaftsprofile nach den Kombinationsbehandlungen	193
11	Weitere Kombinationsverfahren	195
VI.	ZUSAMMENFASSUNG.....	196
VII.	QUELLENVERZEICHNIS	199
VIII.	ANLAGEN	224