

Vorwort		
1	Grundlagen der Verfahrenstechnik	1
1.1	Einsatzhärten	1
1.1.1	Aufkohlen	1
1.1.1.1	Verfahren	1
1.1.1.1.1	Die Aufkohlungsreaktionen, ihre Gleichgewichtsbeziehungen und die für das Prozessregeln spezifischen Indikatoren	2
1.1.1.1.2	Die Kohlenstoffaktivität / C-Aktivität a_C	5
1.1.1.1.3	Der Kohlenstoffpegel / C-Pegel C_p	6
1.1.1.1.4	Der Legierungsfaktor k_L	6
1.1.1.1.5	Der Kohlenstoff-Übergangskoeffizient – die Kohlenstoff-Übergangszahl β	8
1.1.1.6	Die Kohlenstoffverfügbarkeit	9
1.1.1.7	Die Kohlenstoffdiffusion	12
1.1.1.8	Randoxidation	15
1.1.1.9	Niederdruckaufkohlen	19
1.1.1.2.1	Die Reaktionen beim Niederdruckaufkohlen	20
1.1.1.2.2	Prozesskontrolle	26
1.1.1.2.3	Prozesstypische Erscheinungen	27
1.1.1.3	Das Reaktionsmedium Plasma für Diffusionsbehandlungen	29
1.1.1.4	Plasmaaufkohlen	32
1.1.1.4.1	Verfahrenstechnik	32
1.1.1.4.2	Einfluss von Plasmastrom- bzw. Plasmaleistungsdichte auf die Aufkühlungsergebnisse	37
1.1.1.5	Gegenüberstellung der unterschiedlichen Aufkohlungsverfahren	40
1.1.2	Carbonitrieren	40
1.1.2.1	Carbonitrieren bei Normaldruck	41
1.1.2.1.1	Die Wechselwirkung zwischen Kohlenstoff- und Stickstoffaktivität	44
1.1.2.1.2	Anwendung des Carbonitrierens	46
1.1.2.1.3	Anlagen- und Chargeneinfluss beim Carbonitrieren	47
1.1.2.2	Niederdruckcarbonitrieren	49
1.1.3	Sonderverfahren	50
1.1.3.1	Aufkohlen austenitischer Stähle bei Niedrigtemperatur	50
1.1.3.2	Aufkohlen bei hoher Temperatur – Hochtemperaturaufkohlen	54
1.1.3.3	Aufkohlen in sauerstofffreien Atmosphären	55
1.1.3.4	Aufkohlen mit hohen Randkohlenstoffgehalten – Excess Carburizing	55
1.1.4	Härt(en), Anlassen, Tiefkühlen	55
1.1.4.1	Verfahren zum Härt(en)	57
1.1.4.1.1	Direkthärten (Typ A)	58
1.1.4.1.2	Einfachhärten (Typ B)	59
1.1.4.1.3	Härt(en) nach isothermischem Umwandeln (Typ C)	59
1.1.4.1.4	Doppelhärten (Typ D)	60
1.1.4.2	Warmbadhärten	60

	Seite
1.1.4.3 Tiefkühlen	61
1.1.4.4 Der einsatzgehärtete Zustand	62
1.1.4.5 Anlassen	63
1.2 Nitrieren und Nitrocarburieren	64
1.2.1 Begriffsbestimmung	64
1.2.2 Nitrieren	65
1.2.3 Nitrocarburieren	67
1.2.3.1 Die Reaktionen	67
1.2.3.2 Kenngrößen	69
1.2.3.3 Einfluss der Kenngrößen auf das Ergebnis des Nitrierens und Nitrocarburierens	72
1.2.3.4 Wechselwirkung von Stickstoff und Kohlenstoff in der Nitrierschicht	77
1.2.4 Plasmanitrieren	78
1.2.4.1 Das Reaktionsmedium Plasma	78
1.2.4.2 Prozessablauf	78
1.2.5 Sonderverfahren/Kombinationsverfahren	83
1.2.5.1 Nitrieren/Nitrocarburieren bei niedriger Temperatur	83
1.2.5.2 Nitrieren/Nitrocarburieren oberhalb 590 °C bzw. oberhalb $Ac_{1(Fe-N-C)}$	84
1.2.5.3 Hochtemperaturnitrieren	87
1.2.5.4 Niederdrucknitrieren	89
1.2.5.5 Drucknitrieren	90
1.2.5.6 Nitrieren/Nitrocarburieren und Beschichten	90
1.2.5.7 Nitrocarburieren und anschließendes Härteln im Vakuumofen	90
1.2.5.8 Nitrocarburieren und anschließendes Randschichthärteln	91
1.2.6 Vor- und Nachbehandlung	91
1.2.6.1 Reinigen	94
1.2.6.1.1 Waschen	94
1.2.6.1.2 Strahlen	95
1.2.6.1.3 Beizen	95
1.2.6.2 Vorbehandlung	96
1.2.6.2.1 Entgraten	96
1.2.6.2.2 Voroxidieren	96
1.2.6.2.3 Spannungsarmglühen	97
1.2.6.2.4 Normalglühen	98
1.2.6.2.5 Vergüten	98
1.2.6.2.6 Vorbereiten für eine örtlich begrenzte Diffusionsbehandlung	99
1.2.6.3 Nachbehandlung	99
1.2.6.3.1 Reinigen	99
1.2.6.3.2 Auslagern	100
1.2.6.3.3 Nachoxidieren	101
1.2.6.3.4 Diffusionsbehandeln	102
1.2.6.3.5 Spanendes Bearbeiten	102
1.2.6.3.6 Richten oder Kalibrieren	103
1.2.6.4.7 Korrosionsschützen	104

2	Verfahrensdurchführung	Seite
2.1	Herstellung der Behandlungsatmosphären	105
2.1.1	Gase, allgemeine Bemerkungen	105
2.1.2	Propan	107
2.1.3	Methan/Erdgas	108
2.1.4	Ammoniak	109
2.1.5	Ammoniak-Spaltgas	110
2.1.6	Kohlenstoffdioxid	111
2.1.7	Kohlenstoffmonoxid	112
2.1.8	Stickstoff	113
2.1.9	Acetylen	115
2.1.10	Wasserstoff	120
2.1.11	Argon	121
2.1.12	Helium	122
2.1.13	Endogas	122
2.1.14	Exogas	123
2.1.15	Methanol	124
2.2	Atmosphären zum Wärmebehandeln	126
2.2.1	Atmosphären zum Aufkohlen und Carbonitrieren	126
2.2.2	Atmosphären zum Nitrieren und Nitrocarburieren	128
2.2.3	Atmosphärenwechsel	130
2.3	Messen, Steuern und Regeln	131
2.3.1	Prozess-Zielgrößen	133
2.3.1.1	Aufkohlen, Carbonitrieren, Einsatzhärten	134
2.3.1.2	Nitrieren und Nitrocarburieren	135
2.3.2	Prozessparameter	135
2.3.2.1	Temperatur	135
2.3.2.1.1	Temperaturmessung	135
2.3.2.1.2	Temperaturregelung	141
2.3.2.2	Atmosphärenkenngrößen	142
2.3.2.2.1	Messen und Bestimmen der Kenngrößen	142
2.3.2.2.1.1	C-Pegel	142
2.3.2.2.1.2	Carbonitrierpegel $C_{p,Carb}$ und $N_{p,Carb}$	148
2.3.2.2.1.3	Kohlenstoffübergangszahl β	149
2.3.2.2.1.4	Dissoziationsgrad beim Nitrieren/Nitrocarburieren	150
2.3.2.2.1.5	Nitrierkennzahl	150
2.3.2.2.1.6	Oxidationskennzahl	152
2.3.2.2.1.7	Kohlungskennzahl	152
2.3.2.2.2	Regelung der Kenngrößen	153
2.3.2.2.2.1	C-Pegel	153
2.3.2.2.2.2	C-Pegel in Ungleichgewichtsatmosphären	155
2.3.2.2.2.3	Der Kohlenstoffübergangskoeffizient β in Gleichgewichtsatmosphären	156
2.3.2.2.2.4	Nitrierwirkung beim Carbonitrieren	158
2.3.2.2.2.5	Dissoziationsgrad und Nitrierkennzahl	158
2.3.2.2.2.6	Oxidationskennzahl	161
2.3.2.2.2.7	Kohlungskennzahl	161

		Seite
2.3.2.3	Atmosphärenzusammensetzung	162
2.3.2.3.1	Messen der Atmosphärenzusammensetzung	162
2.3.2.3.1.1	Infrarot-Analysatoren	162
2.3.2.3.1.2	Sauerstoffsonden	165
2.3.2.3.1.3	Schüttelflasche	167
2.3.2.3.1.4	Wärmeleitfähigkeits-Messgeräte	169
2.3.2.3.1.5	Taupunktmessgeräte	170
2.3.2.3.1.6	Wasserstoff-Partialdruck-Messgerät	172
2.3.2.3.2	Regelung der Atmosphärenzusammensetzung	173
2.3.2.4	Gasmengen	173
2.3.2.4.1	Messen der Gasdurchflussmengen	174
2.3.2.4.2	Regelung der Gasdurchflussmengen	177
2.3.2.5	Druck	178
2.3.2.5.1	Druckmessung	178
2.3.2.5.2	Druckregelung	181
2.4	Prozessführung	182
2.4.1	Beschicken und Erwärmen	182
2.4.1.1	Einbringen in den kalten Ofen	183
2.4.1.2	Einbringen in den warmen Ofen	183
2.4.1.3	Voroxidieren vor dem Nitrieren und Nitrocarburieren	184
2.4.2	Halten	184
2.4.2.1	Nitrieren und Nitrocarburieren	184
2.4.2.2	Aufkohlen und Carbonitrieren	185
2.4.3	Abkühlen	186
2.4.3.1	Nitrieren und Nitrocarburieren	186
2.4.3.2	Aufkohlen und Carbonitrieren	186
3	Anlagentechnik	188
3.1	Einrichtungen zur Gasversorgung	188
3.1.1	Endogaserzeuger	188
3.1.2	Direktbegasungsverfahren	193
3.1.2.1	Direktbegasung mit Kohlenwasserstoff-Luft-Gemischen	193
3.1.2.2	Trägergas aus Methanol und Stickstoff	193
3.1.3	Ammoniak-Spaltgas-Erzeuger	194
3.2	Begasung der Öfen	196
3.2.1	Anlagen bei Normaldruck	196
3.2.2	Anlagen bei Niederdruck	198
3.3	Prozessablauf und Prozessüberwachung	198
3.3.1	Anlagen bei Normaldruck	199
3.3.2	Anlagen bei Niederdruck	199
3.3.3	Sicherheitseinrichtungen	199
3.4	Schacht- und Haubenöfen	200
3.4.1	Beschreibung der Anlagen	200
3.5	Mehrzweck-Kammeröfen	208
3.6	Durchstoß-Öfen/Ringherdöfen	215
3.7	Drehherdöfen	219
3.8	Banddurchlauföfen	222
3.9	Rollenherdöfen	225
3.10	Anlagen zum Niederdruckaufkohlen	228

	Seite	
3.11.1	Anlagen zum Plasmanitrieren/-nitrocarburieren	234
3.11.1.1	Beschreibung der Anlagen	234
3.11.1.2	Aufbau der Anlagen	237
3.11.1.3	Anlagenbetrieb	238
3.12	Allgemeine Hinweise zur Ofenauswahl	241
3.13	Abschreckanlagen	242
3.14	Hinweise zum Chargenpacken	245
3.15	Chargentransport	248
4	Energiebilanz	249
4.1	Der Energiebedarf für thermochemische Prozesse	249
4.2	Beispiele aus der Praxis	254
4.2.1	Beispiel 1: Doppelkammerofen	254
4.2.2	Beispiel 2: Durchstoßofen	257
4.2.3	Beispiel 3: Vakuum-Mehrzweck-Kammerofen zum Niederdruckaufkohlen	258
5	Umweltschutz und Entsorgung	261
5.1	Umweltschutz und Genehmigungsrecht	261
5.2	Gefahrstoffe	262
5.2.1	Lagern von Gefahrstoffen	262
5.2.2	Einsatz von Gefahrstoffen	263
5.3	Anlagen und Ausrüstungen	263
5.4	Abfallentsorgung	263
5.5	Nutzen aus Umweltschutz und Entsorgung	266
6	Hinweise zum sicheren Betrieb der Anlagen	267
6.1	Beispiele für die Notwendigkeit von Sicherheitsmaßnahmen	267
6.2	Allgemeines	268
6.3	Sicherheit für Leib und Leben	268
6.4	Sicherheit für die Anlage	273
6.5	Sicherung des Behandlungsgutes	274
6.6	Prüfung und Instandhaltung	275
	Literatur	276
	Stichwortverzeichnis	293
	Zum Buch	301