

Prof. Dr. techn. E. Lugscheider (Hrsg.)

Handbuch der thermischen Spritztechnik

Technologien – Werkstoffe – Fertigung

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

1	Einleitung	1
2	Grundlagen des thermischen Spritzens	6
2.1	Der Spritzvorgang	6
2.2	Der Schichtaufbau	7
2.3	Haftmechanismen thermisch gespritzter Schichten	7
2.4	Das Plasmaspritzen	9
2.4.1	Vakuumplasmaspritzen	14
2.4.2	Shrouded-Plasmaspritzen	15
2.4.3	Reaktives Plasmaspritzen	15
2.4.4	Unterwasser-Plasmaspritzen	16
2.4.5	Hochleistungs-Plasmaspritzen	17
2.4.6	Flüssigkeitsstabilisiertes Plasmaspritzen	17
2.4.7	Induktions-Plasmaspritzen	18
2.5	Das Lichtbogenspritzen	19
2.6	Das Flamm-spritzen	21
2.7	Das Hochgeschwindigkeits-Flamm-spritzen	23
2.8	Gasdetonationsspritzen (Flamm-schockspritzen)	27
2.9	Das kaltkinetische Kompaktieren	28
	Schrifttum	29
3	Schichttypische Beanspruchungsarten	31
3.1	Reibung und Verschleiß	31
3.2	Korrosion	33
3.3	Thermische Belastungsarten	35
3.3.1	Heißgaskorrosion und Oxidation	35
3.3.2	Wärmedämmung	39
3.3.2.1	Dieselmotoren	39
3.3.2.2	Flugtriebwerke	40
3.3.2.3	Stationäre Gasturbinen	41
3.4	Sonstige Belastungsarten	42
3.4.1	Medizinische Anwendungen	42
3.4.2	Elektrische Isolation	44
	Schrifttum	44
4	Werkstoffe zum thermischen Spritzen	46
4.1	Form der Ausgangswerkstoffe	46
4.2	Grundsätzliches zur Werkstoffauswahl	47
4.3	Werkstoffe für den Verschleißschutz	48

4.4	Werkstoffe zum Korrosionsschutz	51
4.5	Werkstoffe für Hochtemperaturanwendungen	53
4.5.1	Metallische Legierungen für Hochtemperaturanwendungen	54
4.5.2	Keramische Hochtemperaturschichten	55
4.6	Werkstoffe für die Biotechnologie	57
4.7	Werkstoffe für Sonderanwendungen	58
4.7.1	Werkstoffe für Einlaufschichten	59
4.7.2	Werkstoffe für dielektrische Schichten	59
4.7.3	Werkstoffe für die Hochtemperatur-Supraleitfähigkeit	59
4.7.4	Werkstoffe für die Brennstoffzellentechnik	60
4.7.5	Werkstoffe für Hochtemperatur-Vakuumentchnik	60
4.7.6	Amorphe FeCr-Legierungen als HT-Erosionsschutzschichten	60
4.7.7	Mullit als Hochtemperaturschutz für die Glasindustrie	61
4.7.8	Werkstoffe für Dekorschichten	61
	Schrifttum	62
5	Gase zum thermischen Spritzen	64
5.1	Allgemeines	64
5.2	Was heißt „technische Gase“?	64
5.3	Arten der technischen Gase zum thermischen Spritzen	65
5.3.1	Brenngase	65
5.3.2	Plasmagase	66
5.3.3	Kühlgase	68
5.3.4	Trägergas	68
5.3.5	Shroud (Hüllmantel)	68
5.4	Die Herstellung technischer Gase	68
5.4.1	Luftverflüssigung und Auftrennung der Bestandteile	69
5.4.2	Herstellung und Eigenschaften technischer Gase	69
5.4.2.1	Acetylen	69
5.4.2.2	Ethen	70
5.4.2.3	Propan	70
5.4.2.4	Wasserstoff	70
5.4.2.5	Kohlendioxid	71
5.5	Gasversorgung	71
5.5.1	Lagerung in Flaschen	71
5.5.1.1	Einzelflasche	72
5.5.1.2	Flaschenbündel	73
5.5.1.3	Flaschenbündeltrailer	73
5.5.2	Lagerung in Tanks	74
5.5.3	Rohrleitungssysteme und notwendige Einrichtungen	74
5.6	Sicherheitsmaßnahmen	74
5.6.1	Vorschriften und technische Regeln	75
5.6.2	Brand- und Explosionsgefahr	75
	Schrifttum	76
6	Herstellung gespritzter Schichten	77
6.1	Spritzgerechtes Gestalten	77
6.2	Verfahrensauswahl	78
6.3	Prozeß- und Anlagentechnik für die Fertigung	82

6.3.1	Prozeßtechnik	82
6.3.1.1	Kernsysteme	82
6.3.1.2	Bewegungssystem	85
6.3.2	Anlagentechnik	85
6.4	Oberflächenvorbehandlung in der Produktion	90
6.4.1	Vorgehensweise	90
6.4.1.1	Entfetten	91
6.4.1.2	Maskieren	92
6.4.1.3	Strahlen und Nachreinigung	92
6.4.1.4	Nachreinigung	95
6.4.2	Parameterwahl für das Strahlen	95
6.4.2.1	Maschinenprinzip	95
6.4.2.2	Abstand zwischen Strahldüse und Werkstück	95
6.4.2.3	Düsenwinkel beim Strahlen	96
6.4.3	Qualitätskontrolle gestrahlter Oberflächen	97
6.4.4	Weitere Möglichkeiten der Bauteilvorbereitung	97
6.5	Parameterauswahl beim thermischen Spritzen	98
	Schrifttum	103
7	Nachbehandlung thermisch gespritzter Schichten	104
7.1	Spanende Verfahren	105
7.1.1	Drehen	106
7.1.2	Fräsen	107
7.1.3	Schleifen	107
7.1.4	Trennschleifen und Honen	110
7.1.5	Polieren und Läppen	110
7.1.6	Hobeln, Sägen, Reiben und Räumen	110
7.2	Mechanische Verfahren	110
7.2.1	Kugelstrahlen und Korundstrahlen	110
7.2.2	Gravieren	111
7.3	Thermische und chemische Verfahren	111
7.3.1	Einschmelzen	111
7.3.2	Wärmebehandlung	114
7.3.3	Versiegeln	114
7.3.4	Ätzen und Beizen	115
8	Abtragen und Entschichten an thermisch gespritzten Schichten	116
8.1	Entschichtungsmechanismen	116
8.2	Verfahren	118
8.2.1	Chemische und elektrochemische Verfahren	118
8.2.1.1	Chemisches Prinzip	118
8.2.1.2	Elektrochemisches Prinzip	119
8.2.1.3	Salzschmelzen	119
8.2.1.4	Einsatz in der Praxis	120
8.2.2	Mechanische Verfahren	120
8.2.2.1	Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide	120
8.2.2.2	Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide	121
8.2.2.2.1	Schleifen	121
8.2.2.2.2	Abrasivestrahlen	121

8.2.2.3	Hydromechanische Verfahren	122
8.2.2.3.1	Wasserabrasivstrahlen	122
8.2.2.3.2	Hochdruckwasserstrahl	123
8.2.2.3.3	Einsatz hydromechanischer Verfahren in der Praxis	123
8.2.3	Thermische Verfahren	124
8.2.3.1	Sonderverfahren	124
8.2.3.1.1	Laserablation	124
8.2.3.1.2	Kryogene Verfahren	124
8.3	Auswahl eines Verfahrens	126
	Schrifttum	126

9

Qualitätssicherung beim thermischen Spritzen

Neue QM-Normen und Richtlinien für die Personalqualifikation

Prüfung von thermisch gespritzten Schichten

128

9.1	Qualitätsanforderungen an den Betrieb und Qualifizierung des spritztechnischen Personals	128
9.1.1	Einleitung	128
9.1.2	Qualitätsanforderungen an den Betrieb	129
9.1.2.1	Umfassende Qualitätsanforderungen	132
9.1.2.2	Standard- und Elementar-Qualitätsanforderungen	132
9.1.3	Qualifizierung des spritztechnischen Personals	132
9.1.3.1	Aufsicht zum thermischen Spritzen	133
9.1.3.2	Prüfung von thermischen Spritzern	133
9.1.4	Ausbildung und Prüfung von spritztechnischem Personal	135
9.1.4.1	Ausbildung des ETSS	136
9.1.4.2	Ausbildung des ETSP	137
9.1.4.3	Ausbildung des ETS	138
9.1.5	Das richtige Qualitätsverständnis	140
9.1.6	Schlußbetrachtung	141
9.2	Prüfung von thermisch gespritzten Schichten	142
9.2.1	Schichtdickenbestimmung	142
9.2.2	Härteprüfung	144
9.2.3	Prüfung der Haftfestigkeit	146
9.2.4	Verschleißprüfung	148
9.2.5	Korrosionsprüfung	150
9.2.6	Thermische Tests	153
9.2.7	Prüfung von Eigenspannungen	154
9.2.8	Prüfung der Duktilität	156
9.2.9	Gefügeausbildung/Schichtmerkmale	157
9.2.10	Übersicht über Prüfmethoden	158

10

Arbeits- und Umweltschutz

160

10.1	Vorbehandlung von Oberflächen	160
10.1.1	Entfetten	160
10.1.2	Strahlen	161
10.2	Gaseversorgung	161
10.2.1	Gase zum Flammstritzen	161
10.2.2	Gase zum Plasmaspritzen	162
10.2.3	Druckluft	162
10.2.4	Druckgasflaschen	162

10.2.5	Druckbehälter (Ortsfeste Druckgasbehälter)	162
10.2.6	Rohrleitungen	163
10.2.7	Armaturen	163
10.2.8	Schlauchleitungen	163
10.2.9	Sicherheitseinrichtungen gegen Gasrücktritt und gegen Flammendurchschlag	163
10.3	Elektrischer Strom	164
10.3.1	Gefährdung durch elektrischen Strom	164
10.3.2	Anschluß an das elektrische Netz	164
10.3.3	Stromquellen zum Lichtbogenspritzen	164
10.3.4	Stromquellen zum Plasmaspritzen	164
10.4	Geräte und Anlagen	165
10.4.1	Allgemeines	165
10.4.2	Flammspritzgeräte und -anlagen	165
10.4.3	Lichtbogenspritzgeräte und -anlagen	165
10.4.4	Plasmaspritzgeräte und -anlagen	165
10.5	Stäube aus Spritzzusätzen	166
10.5.1	Spritzzusätze	166
10.5.2	Brand- und Explosionsgefahren durch Spritzstäube	166
10.5.3	Gesundheitsgefahren durch Spritzstäube	166
10.6	Arbeitsplätze	168
10.6.1	Spritzkabinen ohne Bedienungspersonal	168
10.6.2	Spritzräume mit Bedienungspersonal	169
10.6.3	Spritzen in allgemeinen Werkstatträumen	169
10.6.4	Arbeitsplätze beim Spritzen im Freien	169
10.7	Lüftung und Absaugung	170
10.7.1	Allgemeines	170
10.7.2	Raumlüftung in Spritzräumen	170
10.7.3	Lüftung beim Spritzen in allgemeinen Werkstatträumen	170
10.7.4	Absaugung	171
10.7.5	Staubabscheidung	171
10.8	Persönliche Schutzausrüstung	172
10.8.1	Allgemeines	172
10.8.2	Atemschutz	172
10.8.3	Augen- und Gesichtsschutz	172
10.8.4	Gehörschutz	172
10.8.5	Rumpfschutz	173
10.8.6	Handschutz	173
10.8.7	Fußschutz	173
10.9	Sicherheitsgerechtes Verhalten	173
10.9.1	Allgemeines	173
10.9.2	Benutzung der persönlichen Schutzausrüstung	174
10.9.3	Hautschutz und Körperpflege	174
10.9.4	Betrieb	174
10.9.5	Arbeitsplatzreinigung	174
10.9.6	Störungen	174
10.9.7	Arbeitspausen	175
10.10	Arbeitsmedizinische Vorsorge	175
10.11	Entsorgung von Spritzstäuben	175
10.12	Gesetze, Verordnungen, Vorschriften, technische Regeln	176

11	Anwendungsbeispiele	179
11.1	Allgemeiner Maschinenbau	179
11.1.1	Verschleißschutzschichten aus Molybdän	179
11.1.2	Verschleißschutz für Rasterwalzen der Drucktechnik	180
11.1.3	Verschleißschutz für Film- und Bahnlaufwalzen	182
11.1.4	Thermisch gespritzte Verschleißschutzschichten als Hartchromersatz	182
11.1.5	Verschleißschutz für Kalandervalzen in Papiermaschinen	184
11.2	Chemie- und Apparatebau	185
11.2.1	Korrosionstechnische Aspekte bei thermisch gespritzten Schichten	185
11.2.1.1	Passive Korrosion	186
11.2.1.2	Kathodische Korrosion	186
11.2.2	Anwendungsbeispiele	187
11.2.2.1	Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlkonstruktionen	187
11.2.2.2	Verbesserung der mechanischen Oberflächeneigenschaften im chemischen Umfeld	187
11.2.2.3	Reaktions- und Aufschlußbehälter	189
11.2.2.4	Verbrennungsanlagen mit Hochtemperaturkorrosion	190
11.2.2.5	Polymerbeschichtungen	191
11.3	Elektrotechnik und Energieanlagenbau	192
11.3.1	Spritzschichten mit definierten thermischen und/oder elektrischen Eigenschaften	192
11.3.1.1	Spritzschichten mit elektrisch isolierenden und thermisch leitenden Eigenschaften	192
11.3.1.2	Spritzschichten zur elektrischen und thermischen Isolation	194
11.3.1.3	Spritzschichten als elektrischer Berührungs- und Kontaktsschutz oder als Benetzungsschutz	195
11.3.1.4	Spritzschichten zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit	196
11.3.2	Spritzschichten mit vorwiegend verschleißfesten Eigenschaften	196
11.3.3	Spritzschichtsysteme bei stationären Gasturbinen	198
11.3.3.1	Hochtemperatur-Korrosionsschutz	199
11.3.3.2	Regenerieren (Refurbishing) und Rekonturieren	202
11.3.3.3	Wärmedämmschicht (WDS)	203
11.3.4	Experimentelle Spritzschichtsysteme	204
11.4	Luft- und Raumfahrtantriebe	205
11.4.1	Komponenten für Luftfahrtantriebe	205
11.4.1.1	Korrosions- und Oxidationsschichten	206
11.4.1.2	Erosionsschutzschichten	207
11.4.1.3	Verschleißschutzschichten	207
11.4.1.4	Titanfeuerschutzschichten	208
11.4.1.5	Anstreif- und Dichtungsbeläge	209
11.4.1.6	Wärmedämmschichten	210
11.4.2	Verbundbrennkammerstrukturen für Raumfahrtantriebe	211
11.5	Anwendungen in der Medizintechnik	214
11.5.1	Einleitung	214
11.5.2	Spritztechnische Lösungen für medizinische Implantate	215
11.5.2.1	Bio-aktive Beschichtung	215
11.5.2.2	Bio-inerte Beschichtung	217
	Schrifttum	218