

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Danksagung | ix |
| Kurzfassung | xiii |
| Abstract | xvii |
| Abkürzungsverzeichnis | xxi |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Stand der Technik | 7 |
| 2.1 Hartmetalle | 7 |
| 2.1.1 Hartmetalle auf WC-Co-Basis | 8 |
| Wolframkarbid | 9 |
| Kobalt als metallische Bindemittelphase | 12 |
| Mechanische Eigenschaften von WC-Co-Hartmetallen | 15 |
| Schneidstoffe auf WC-Co-Basis | 17 |
| 2.2 Stahlwerkstoffe | 21 |
| 2.2.1 Werkzeugstähle | 22 |
| Wärmebehandlung von Werkzeugstählen | 23 |
| 2.2.2 Martensitaushärtende Stähle | 28 |
| Metallurgischer Härtemechanismus von Maraging- | |
| Stählen | 28 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| | Austenitbildung in Maraging-Stählen | 34 |
| | Thermisches Fügen von Maraging-Stählen | 36 |
| 2.3 | Hartmetall-Stahl-Verbunde | 38 |
| 2.3.1 | Hartmetall-Stahl-Löten | 41 |
| | Eigenspannungsproblematik | 43 |
| | Lötverfahren | 51 |
| | Lotwerkstoffe zum Fügen von Hartmetall an Stahl . | 54 |
| 2.3.2 | Löten von Diamant | 63 |
| | Graphitisierung von PKD | 65 |
| 3 | Motivation und Zielstellung | 67 |
| 3.1 | Technischer Ansatz | 68 |
| 3.1.1 | Lötkonzepte | 69 |
| | Lötkonzept 1: Benetzbarkeit durch Metallisierung der Fügefläche | 70 |
| | Lötkonzept 2: Benetzbarkeit durch Verwendung eines Aktivlots | 71 |
| 3.2 | Forschungsfrage | 72 |
| 3.3 | Übertragung auf Werkzeuggeometrie | 74 |
| 4 | Werkstoffe | 77 |
| 4.1 | Verwendete Stahlwerkstoffe | 77 |
| 4.1.1 | Maraging-Stahl 1.2709 | 77 |
| 4.1.2 | Referenzstähle 1.1730, 1.2063 und 1.2344 | 79 |
| 4.2 | Hartmetall EMT 210 | 80 |
| 4.3 | Verwendete Lotwerkstoffe | 81 |
| 4.3.1 | Kupferlot Copper OFHC | 81 |
| 4.3.2 | Kupferbasislot Gemco | 83 |
| 4.3.3 | Silberbasislot TB-651 | 84 |
| 4.3.4 | Silberbasislot TB-629 | 84 |
| 5 | Experimentelles | 87 |
| 5.1 | Probengeometrie | 87 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 5.1.1 | Lötgeometrie | 87 |
| | Labormaßstab | 87 |
| | Werkzeuggeometrie Hartmetall-Schaft | 88 |
| | Werkzeuggeometrie Wendeschneidplatte | 89 |
| 5.1.2 | Geometrie Zugproben | 90 |
| 5.1.3 | Geometrie Kerbschlagbiegeproben | 91 |
| 5.2 | Ofenprozesse | 92 |
| 5.2.1 | Lötprozesse | 94 |
| | Lötprozesse für kupferbasierte Lote | 94 |
| | Lötprozesse für silberbasierte Lote | 97 |
| 5.2.2 | Thermisches Zyklieren | 99 |
| 5.3 | Beschichtungsverfahren zur Nickelapplikation | 101 |
| 5.3.1 | Ionenplattieren mittels Arc-PVD | 101 |
| 5.3.2 | Elektroplattieren | 103 |
| 5.3.3 | Chemisches Beschichten | 104 |
| 5.4 | Metallographische Untersuchung | 106 |
| 5.5 | Scherversuch | 107 |
| 5.6 | Härteprüfung | 109 |
| 5.6.1 | Härteprüfung nach Vickers | 109 |
| 5.6.2 | Nanoindentation | 110 |
| 5.7 | Rasterelektronenmikroskopie | 111 |
| 5.8 | Röntgendiffraktometrie | 112 |
| 5.8.1 | Phasenanalyse | 112 |
| 5.8.2 | Qualifizierung von Verbundeigenspannungen | 113 |
| 5.9 | Ultraschallprüfung | 116 |
| 5.10 | Lichtmikroskopische Aufnahmen | 117 |
| 5.10.1 | Gefügecharakterisierung | 117 |
| 5.10.2 | Korngrößenanalyse | 117 |
| 5.10.3 | Bestimmung des Ausbreitungsfaktors | 118 |

6 Ergebnisse und Diskussion 121

| | | |
|-----|--------------------------------|-----|
| 6.1 | Technische Grundlage | 121 |
|-----|--------------------------------|-----|

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.1.1 | Löten von gehärteten Kalt- und Warmarbeitsstählen | 122 |
| 6.1.2 | Integration der Wärmebehandlung von Werkzeugstählen in den Lötprozess | 126 |
| 6.1.3 | Lokale Wärmebehandlung einer gelöteten Kaltarbeitsstahlkomponente | 129 |
| 6.1.4 | Integration der Wärmebehandlung von Maraging-Stählen in den Lötprozess | 132 |
| 6.1.5 | Fazit und Schlussfolgerung | 133 |
| 6.2 | Hartmetall-Maraging-Stahl-Lötungen | 135 |
| 6.2.1 | Analyse der mit Copper OFHC gelöteten Verbunde . | 135 |
| | Benetzungsverhalten | 135 |
| | Lötung ohne Nickelapplikation der Maraging-Stahl-Fügefläche | 137 |
| | Einfluss der Nickelapplikation auf die Anbindung . . | 139 |
| | Einfluss der Nickelapplikation auf die Mikrostruktur | 147 |
| | Einfluss der Nickelapplikation auf die Scherfestigkeit | 157 |
| | Einfluss der Nickelapplikation auf den Bruchverlauf . | 159 |
| | Nachweis von η -Karbiden | 163 |
| | Fazit zum Kapitel Analyse der mit Copper OFHC gelöteten Hartmetall-Maraging-Stahl-Verbunde | 175 |
| 6.2.2 | Analyse der mit TB-651 gelöteten Verbunde | 178 |
| | Parametersatzbestimmung | 179 |
| | Parametervariation | 181 |
| | Mikrostrukturanalyse | 182 |
| | Bruchanalyse | 194 |
| | Verbundfestigkeitsanalyse | 196 |
| | Quantifizierung der Verbundeigenspannungen | 200 |
| | Fazit zum Kapitel Analyse der mit TB-651 gelöteten Verbunde | 208 |
| 6.3 | Übertragung auf den Anwendungsfall | 210 |
| 6.3.1 | Mechanische Analyse der mit TB-629 gelöteten Verbunde | 211 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.3.2 | Härteentwicklung der Stahlkomponente | 213 |
| 6.3.3 | Mikrostrukturanalyse der mit TB-629 gelöteten Ver- bunde | 215 |
| 6.3.4 | Einleitung Wendeschneidplatten | 216 |
| 6.3.5 | Belastungstest | 217 |
| | Probenherstellung und Belastungstest | 217 |
| | WSP aus 1.2709 mit H13A-Hartmetall-Schneide . . | 220 |
| | WSP aus 1.2709 mit CD10-PKD-Schneide | 222 |
| | WSP aus 1.2709 mit CB7025-kBN-Schneide | 223 |
| | WSP aus 1.2709 mit 6220-Keramik-Schneide | 228 |
| | Fazit zum Kapitel Belastungstest | 230 |
| 6.4 | Mechanische Eigenschaften der Stahlkomponenten | 231 |
| 6.4.1 | Zugfestigkeit und Härte | 233 |
| 6.4.2 | Kerbschlagarbeit | 235 |
| 6.4.3 | Entlöten und Wiederverwendung der Wendeschneid- plattenstahlträger | 240 |
| | Theoretische Grundlage für die Zyklrierexperimente . | 241 |
| | Phasenanalyse | 242 |
| 6.4.4 | Mechanische Eigenschaften des thermisch zyklierten 1.2709-Stahls | 246 |
| | Fazit zum Kapitel Mechanische Eigenschaften der Stahlkomponente | 248 |
| 6.5 | Beantwortung der Forschungsfrage | 251 |
| | H1: Hohe Lötnahtqualität | 251 |
| | H2: Einstellung der mechanischen Eigenschaften . . | 254 |
| | H3: Quantifizierung von Verbundeigenspannungen . | 255 |
| | F: Beantwortete Forschungsfrage | 256 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 257 |
| 7.1 | Lotsystem Kupfer | 258 |
| 7.2 | Lotsysteme Silber-Kupfer-(Indium)-Titan | 260 |
| 7.3 | Wärmebehandlung Maraging-Stahl | 263 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 7.4 | Verbesserung der Produktionstechnik | 267 |
| 8 | Nachsatz: Steigerung der Nachhaltigkeit | 269 |
| 8.1 | Kobalt | 269 |
| 8.2 | CO ₂ -Emissionen | 271 |
| 8.3 | Nachhaltige Ansätze | 271 |
| 8.3.1 | Nachhaltige Prozessführung | 272 |
| 8.3.2 | Substitution des Hartmetalls | 273 |
| 8.3.3 | Wiederverwendung des Trägermaterials | 274 |
| 8.4 | Nachhaltigkeitsbetrachtung | 275 |
| 9 | Normen | 317 |
| 10 | Publikationsliste | 319 |
| 10.1 | Patente | 319 |
| 10.2 | Wissenschaftliche Veröffentlichungen | 320 |