

## Inhaltsverzeichnis

|   |            |
|---|------------|
| <b>Abkürzungen .....</b>  | <b>iv</b>  |
| <b>Formelzeichen und Indizes .....</b>  | <b>vii</b> |
| <b>1 Einleitung .....</b>   | <b>1</b>   |
| <b>2 Grundlagen und Stand der Technik .....</b>                                 | <b>3</b>   |
| 2.1 Anforderungsprofil im Werkzeug- und Formenbau .....                         | 3          |
| 2.2 Oberflächen- und Randzonenkonditionierung.....                              | 5          |
| 2.2.1 Oberflächenkonditionierung und Tailored Surfaces.....                     | 5          |
| 2.2.2 Berechnung der theoretischen Rautiefe $Rth$ in spanenden Prozessen....    | 7          |
| 2.2.3 Randzone und Eigenspannungen .....  | 8          |
| 2.3 Mikrozerspanung.....  | 11         |
| 2.3.1 Grundlagen der Mikrofräsbearbeitung .....                                 | 11         |
| 2.3.2 Hartzerspanung .....  | 12         |
| 2.3.3 Hartmetallzerspanung .....  | 14         |
| 2.3.4 Oberflächen- und Randzonenkonditionierung .....                           | 15         |
| 2.3.5 Größeneffekte, Mindestspanungsdicke $h_{min}$ und Ploughing .....         | 16         |
| 2.3.6 Werkzeugverschleiß.....   | 19         |
| 2.4 Herstellung von Zerspanwerkzeugen und Schneidkantenpräparation .....        | 22         |
| 2.4.1 Schneidstoffe Hartmetall und Werkzeugherstellung .....                    | 22         |
| 2.4.2 Schneidkantengestalt und Charakterisierungsmodelle .....                  | 24         |
| 2.4.3 Schneidkantenpräparation.....   | 27         |
| 2.4.4 Verfahren zur Schneidkantenpräparation.....                               | 28         |
| 2.4.5 Potentiale konditionierter Schneidkantengestalt .....                     | 32         |
| 2.4.6 Schneidkantenpräparation in der Mikrozerspanung.....                      | 34         |
| 2.5 Werkzeugbeschichtungen, Verfahren und Entwicklungen .....                   | 34         |
| 2.5.1 Plasmaätzverfahren für die Werkzeugvorbehandlung.....                     | 35         |
| 2.5.2 Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) .....                            | 37         |
| 2.5.3 PVD-Werkzeugbeschichtungen: TiN - TiAlN - TiAlSiN - TiAlTa... <td>41</td> | 41         |
| <b>3 Motivation und Zielsetzung .....</b>                                       | <b>47</b>  |
| <b>4 Experimentelle Randbedingungen .....</b>                                   | <b>49</b>  |
| 4.1 Werkzeugmaschine: <i>Kern Microtechnik HSPC 2522</i> .....                  | 49         |
| 4.1.1 Peripheriegeräte .....  | 50         |
| 4.1.2 Verschleißversuch mit iterativer Bestimmung der Zerspankräfte .....       | 50         |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.2 Werkzeugkonditionierung mit geometrisch unbestimmter Schneide.....  | 51        |
| 4.2.1 Nassstrahlspananlage: <i>Restec GmbH Nicolis Technology WA 110-P</i> .....  | 51        |
| 4.2.2 Nassstrahlspananlage: <i>Graf Compact II Plus Automatik</i> .....   | 52        |
| 4.2.3 Abrasivmittel für Schneidkantenpräparation mittels NSS .....  | 53        |
| 4.3 PVD-Beschichtungsanlagen .....  | 53        |
| 4.4 Eingesetzte Fräswerkzeuge .....   | 56        |
| 4.5 Versuchswerkstoffe .....  | 58        |
| 4.5.1 Schnellarbeitsstahl 1.3395 ( <i>ASP®2023</i> ) .....  | 58        |
| 4.5.2 Warmarbeitsstahl 1.2343 .....   | 58        |
| 4.5.3 Hartmetalle .....   | 59        |
| 4.6 Statistische Versuchsplanung und ihre Auswertung .....  | 60        |
| 4.7 Messtechnik und Datenanalyse .....  | 61        |
| 4.7.1 Kraftmesstechnik und -auswertung .....  | 61        |
| 4.7.2 Nanoindentation: <i>Agilent Technologies G200</i> .....   | 63        |
| 4.7.3 Rauheitsanalyse: <i>Confovis Duo Vario &amp; Nanofocus µsurf C</i> .....  | 63        |
| 4.7.4 Rasterelektronenmikroskop (REM): <i>Tescan Mira3 XM</i> .....   | 63        |
| 4.7.5 Rasterkraftmikroskop (AFM): <i>Veeco Instruments Dimension Icon Scanning Probe Microscope</i> .....                                   | 64        |
| 4.7.6 Röntgendiffraktometrie (XRD): <i>Bruker AXS Advanced D8</i> .....   | 65        |
| 4.7.7 Schichthaftungsanalyse: <i>Wolpert-Werke Dia-Testor 2Rc &amp; CSM Instruments Revetester</i> .....                                    | 70        |
| 4.7.8 Schneidkantenvermessung: <i>Alicona EdgeMaster &amp; LMI MikroCAD plus</i> .....  | 70        |
| 4.7.9 Digitale Mikroskopie: <i>Keyence VHX-5000</i> .....   | 71        |
| 4.8 Software .....  | 72        |
| 4.8.1 CAD & CAM .....   | 72        |
| 4.8.2 Geometrische Prozesssimulation (GP) .....   | 72        |
| <b>5 Analyse des Mikrofräsprozesses von gehärtetem Schnellarbeitsstahl</b>  | <b>73</b> |
| 5.1 Analytische Betrachtung der Werkzeuggestalt im Mikrofräsprozess.....  | 73        |
| 5.1.1 Analytische Betrachtung der theoretischen Rautiefe $R_{th}$ für das Mikrofräsen .....   | 74        |
| 5.1.2 Simulative Prognose der Oberflächenrauheit im Mikrofräsprozess....  | 77        |
| 5.1.3 Analytische Betrachtung der maximalen effektiven Spanungsdicke $h_{eff}$ auf Basis der Zerspanungsgrößen und der Werkzeuggestalt..... | 80        |
| 5.1.4 Experimentelle Betrachtung des Eckenradius $r_e$ .....  | 85        |
| 5.2 Prozessanalyse unter Berücksichtigung der Eingriffssituation .....  | 88        |
| 5.2.1 Prozesskraftanalyse in Abhängigkeit von den Schnittparametern und der effektiven Spanungsdicke $h_{eff}$ .....                        | 89        |

|  |            |
|--|------------|
| 5.2.2 Einstellung der Oberflächenrauheit.....  | 92         |
| 5.2.3 Einbringung von Druckeigenspannungen durch Prozessauslegung .....  | 94         |
| <b>6 Modifikation von Mikrofräswerkzeugen für die Hartzerspanung....</b>   | <b>101</b> |
| 6.1 Werkzeugmodifikation mittels Nassstrahlspanen.....   | 101        |
| 6.1.1 Wechselwirkung mit dem PVD-Beschichtungsprozess .....  | 101        |
| 6.1.2 Einstellung der Schneidkantengestalt an Analogiewerkzeugen .....   | 108        |
| 6.1.3 Transfer der Präparationsparameter auf Mikrofräswerkzeuge .....  | 112        |
| 6.1.4 Prozess- und Verschleißverhalten modifizierter Mikrofräswerkzeuge mit<br>asymmetrischer Schneidkantengestalt.....                  | 116        |
| 6.1.5 Anwendungsorientierte Schneidkantenkonditionierung zur Steigerung<br>von Druckeigenspannungen in der Bauteilrandzone .....         | 121        |
| 6.1.6 Potentiale der Schneidkantenpräparation für die Hartmetallzerspanung<br>.....  | 127        |
| 6.2 Werkzeugmodifikation durch hochenergetische Ätzverfahren.....  | 132        |
| 6.2.1 Grundlagenuntersuchung zum Materialabtrag .....  | 133        |
| 6.2.2 Präparation der Schneidkantenmikrogestalt.....   | 148        |
| 6.2.3 Einsatzverhalten modifizierter Mikrofräswerkzeuge .....  | 151        |
| 6.2.4 Identifikation weiterer Forschungsfragen .....   | 155        |
| <b>7 Potentiale moderner PVD-Beschichtungstechnik zur Verbesserung der<br/>    Verschleißbeständigkeit bei Mikrofräswerkzeugen .....</b> | <b>157</b> |
| 7.1 Schichtsysteme und Beschichtungsergebnis.....  | 158        |
| 7.2 Leistungsbewertung im Standzeitversuch .....   | 162        |
| 7.2.1 Entwicklung der Zerspankraft $F_z$ über die Einsatzzeit .....  | 162        |
| 7.2.2 Verschleißbetrachtung eingesetzter Werkzeuge.....  | 165        |
| 7.2.3 Abschließende Bewertung .....  | 169        |
| <b>8 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>  | <b>173</b> |
| <b>9 Literaturverzeichnis .....</b>  | <b>179</b> |