

---

**Formelzeichen, Abkürzungen und Indices**

<b>1. Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2. Erkenntnisstand</b> . . . . .	<b>2</b>
2.1. Kaltpreßschweißen . . . . .	2
2.1.1. Verbindungstheorie - Bindemechanismus . . . . .	6
2.1.2. Metallphysikalische Modelle zum Bindemechanismus . . . . .	10
2.1.2.1. Die allgemeinen Gesetze der Diffusion . . . . .	10
2.1.2.2. Adhäsion zwischen zwei Metallen . . . . .	12
2.1.2.2.1. Abhängigkeit der Adhäsion vom Abstand der Oberflächen . . . . .	12
2.1.2.2.2. Abhängigkeit der Adhäsion von der Kontaktspannung . . . . .	12
2.1.2.2.3. Effekte der Diffusion bei Metall-Metall-Adhäsion . . . . .	13
2.1.3. Grenzflächenenergien . . . . .	13
2.1.4. Einflußgrößen auf die Kaltpreßschweißung . . . . .	15
2.1.4.1. Oberflächenvorbereitung . . . . .	16
2.1.4.2. Oberflächenvergrößerung und Relativbewegung . . . . .	17
2.1.4.3. Zusammenhang zwischen Gitteraufbau und Kaltpreßschweißbarkeit . . . . .	20
2.1.4.4. Einfluß des Elektronenschalenaufbaus . . . . .	20
2.1.4.5. Umformgeschwindigkeit . . . . .	21
2.2. Fließpressen . . . . .	21
2.3. PVD-Abscheidverfahren . . . . .	23
2.3.1. Grundlagen der Kathodenzerstäubung . . . . .	24
2.3.2. Kathodenzerstäubungsanlagen . . . . .	27
2.4. Spannungsverteilung in der Umformzone beim HVFI . . . . .	29
2.5. Härtemessungen nach dem UCI-Verfahren . . . . .	30
2.6. Schichtdickenmessung . . . . .	31
2.6.1. Laseroptisches Fokusedetektorverfahren (Rodenstock) . . . . .	31
2.6.2. Interferenzmikroskopie . . . . .	32
<b>3. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung</b> . . . . .	<b>33</b>
3.1. Versuchsaufbau für die PVD-Beschichtung . . . . .	33
3.2. Versuchsaufbau für die Kaltmassivumformung . . . . .	33
3.3. Versuchsplanung . . . . .	34
3.3.1. Oberflächenpräparationsverfahren . . . . .	35
3.3.2. Wahl der Versuchswerkstoffe . . . . .	37
3.3.3. Trennschicht-Schmiermittel-System . . . . .	38

3.4. Versuchsprogramm	40
3.5. Versuchsauswertung	41
<b>4. Versuchswerkstoffe im Anlieferungszustand</b>	<b>43</b>
4.1. Metallographische Untersuchung	43
4.1.1. Aluminiumlegierung AlMgSi1	43
4.1.2. Titan und Titanlegierungen	44
4.1.3. Korrosionsbeständiger Stahl	46
4.2. Härteverteilung über den Probenquerschnitt	47
<b>5. Ergebnisse und Diskussion der Experimente</b>	<b>50</b>
5.1. Kaltpreßschweißen durch HVFI in serieller Rohteilanordnung	50
5.1.1. Werkstoffkombination Ti 99,9 und AlMgSi1	50
5.1.1.1. Vorversuche zur Ermittlung des Mindestumformgrades	50
5.1.1.1.1. Vorbereitung der Rohteile	51
5.1.1.1.2. Rohteile nach spanender Oberflächenpräparation	51
5.1.1.1.3. Versuchsergebnisse	53
5.1.1.1.4. Bindemechanismus bei der Kombination AlMgSi1 / Ti 99,9	62
5.1.1.2. Gegendruckversuche	63
5.1.1.2.1. Bestimmung des Spannungszustandes beim Kaltpreßschweißen	63
5.1.1.2.2. Vorbereitung der Rohteile für die Gegendruckversuche	69
5.1.1.2.3. Versuchsergebnisse beim HVFI mit Gegendruck	69
5.1.2. Werkstoffkombination TiAl3V8Cr6Mo4Zr4 / X2CrNiMo1812	72
5.1.2.1. Vorbereitung der Rohteile	72
5.1.2.2. Umformkraft-Umformweg-Diagramme	73
5.1.2.3. Metallographische Untersuchung der Bimetalle	74
5.1.2.4. Festigkeitsuntersuchungen an den Bimetallen	78
5.1.2.5. Härtemessungen nach dem UCI-Verfahren	79
5.2. Kaltpreßschweißen durch HVFI in paralleler Rohteilanordnung	83
5.2.1. Vorbereitung der Rohteile	84
5.2.2. Umformkraft-Umformweg-Diagramme	84
5.2.3. Metallographische Untersuchung der Verbindungszone	87
5.2.4. Festigkeitsuntersuchungen durch Scherversuch	90
5.2.5. Bruchflächenuntersuchung mittels REM	92
5.3. Kaltpreßschweißen durch Napf-Rückwärts-Fließpressen	95
5.3.1. Napf-Rückwärts-Fließpressen in serieller Rohteilanordnung	95
5.3.1.1. NRFI mit dem Umformgrad $\varphi_A = 0,9$	95
5.3.1.2. NRFI mit dem Umformgrad $\varphi_A = 1,2$	103
5.3.2. Napf-Rückwärts-Fließpressen mit kegeligem Einsatz	107

<b>5.4. Optimierung der Verfahrensparameter</b> . . . . .	<b>110</b>
5.4.1. Spanende Reinigung der zu verschweißenden Oberflächen . . . . .	110
5.4.2. PVD-Zwischenschichten aus den Grundwerkstoffen . . . . .	112
5.4.2.1. Metallographie und Härtemessungen nach der Beschichtung . . . . .	112
5.4.2.2. Versuchsergebnisse . . . . .	116
5.4.3. PVD-Zwischenschichten aus Cu und CuNi10Fe . . . . .	118
5.4.3.1. Kaltpreßschweißen durch HVFI in serieller Rohteilanordnung . . . . .	118
5.4.3.1.1. Metallographie und Härtemessung nach der Beschichtung . . . . .	118
5.4.3.1.2. Umformkraft-Umformweg-Diagramme . . . . .	121
5.4.3.1.3. Metallographische Untersuchung nach dem KPS . . . . .	123
5.4.3.1.4. Festigkeitsuntersuchung der Kaltpreßschweißverbindungen . . . . .	126
5.4.3.1.5. Verhalten der Zwischenschicht in Abhängigkeit vom Umformgrad . . . . .	128
5.4.3.2. Kaltpreßschweißen durch HVFI in paralleler Rohteilanordnung . . . . .	130
5.4.3.3. Kaltpreßschweißen durch NRFI in serieller Rohteilanordnung . . . . .	133
5.4.4. PVD-Zwischenschichten aus Molybdän . . . . .	135
5.4.5. Chemische Reinigung durch Beizen . . . . .	137
5.4.6. Kombinierte Präparation der zu verschweißenden Rohteilflächen . . . . .	138
<b>5.5. Fertigungstechnische Betrachtung der Oberflächenpräparationsverfahren</b> . . . . .	<b>141</b>
5.5.1. Bewertung des Aufwandes für verschiedene Rohteilpräparationen . . . . .	141
5.5.1.1. Spanende Präparation der zu verschweißenden Rohteilflächen . . . . .	141
5.5.1.2. Einsatz von PVD-Zwischenschichten aus Cu und CuNi10Fe . . . . .	142
5.5.1.3. Oberflächenätzung durch 0,01 %-ige NaOH . . . . .	143
5.5.1.4. Kombinierte Präparation der zu verschweißenden Rohteilflächen . . . . .	143
5.5.2. Vergleich von fertigungstechnischem Aufwand und Werkstückqualität beim KPS . . . . .	144
<b>6. Zusammenfassung</b> . . . . .	<b>149</b>
6.1. Zielsetzung . . . . .	149
6.2. Forschungsergebnisse . . . . .	149
<b>7. Schrifttum</b> . . . . .	<b>153</b>