



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.



Fakultät für Werkstoffwissenschaften und Werkstofftechnik  
Institut für Metallformung

# Mehrskalige Modellierung des Walzplattierens und Walzens von Werkstoffverbunden

Von der Fakultät für Werkstoffwissenschaften und Werkstofftechnologie  
der TU Bergakademie Freiberg

angenommene

Habilitationsschrift

zur Erlangung des Akademischen Grades

eines habilitierten Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing. habil.

vorgelegt

von Dr. -Ing. Matthias Schmidtchen

geboren am 18. Januar 1967

in Karl-Marx-Stadt jetzt Chemnitz

eingereicht am 17. 11. 2016

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. mult. Rudolf Kawalla, TU Bergakademie Freiberg  
Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. Birgit Awiszus, TU Chemnitz  
Prof. Dr.-Ing. Heinz Paikowski, TU Clausthal

Tag der Verleihung: 21. 06. 2017

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	7
1 Walzplattieren – Technologie und Plattiergeometrien .....	11
2 Ziel und Gliederung der Arbeit .....	15
3 Haftfestigkeit .....	17
3.1 Definition der Haftfestigkeit .....	17
3.2 Bruchmechanische Betrachtung von Grenzflächen und kontaktmechanische Grundlagen .....	18
3.2.1 Bruchmechanische Grundlagen .....	19
3.2.2 Kombinierte Rissbeanspruchung und Grenzflächenrisse .....	22
3.2.2.1 Verbunde aus gleichen Werkstoffen .....	22
Modell nach Seah-Hondros-Rice (SHR) .....	23
Modell der Adhäsion an einem flachen, kreisförmigen Stempel nach Kendall .....	24
Modell eines Grenzflächenrisses mit Berücksichtigung des Einflusses der Adsorption von Fremdatomen nach Kameda .....	26
3.2.2.2 Verbunde aus unterschiedlichen Werkstoffen .....	32
3.3 Technologische Aspekte der Haftfestigkeit .....	39
3.3.1 Experimentelle Beobachtungen zur Abhängigkeit der Haftfestigkeit von den Herstellungsbedingungen .....	39
3.3.2 Adhäsion / Kohäsion von Metallen .....	52
3.3.3 Adhäsionsarbeit zwischen Metallen bei idealer, flächiger Kontaktzone nach der Adsorptionstheorie .....	54
3.4 Die Grenzflächenenergie und deren Beeinflussung durch die chemische Zusammensetzung .....	61
3.4.1 Die Diffusionstheorie für den Bindungsaufbau zwischen Metallen bei idealer, flächiger Kontaktzone .....	64
3.4.2 Allgemeine Zusammenhänge zum Einfluss von Grenzflächenseigerungen auf die Adhäsionsarbeit .....	65
3.5 Modellierungsansätze für die Kopplung Haftfestigkeit – Herstellungsprozess .....	67
3.5.1 Modell der maximalen Haftfestigkeit nach Vaidyanath und Wright .....	68
3.5.2 Haftfestigkeitsmodell nach Bay .....	70
3.5.3 Erweiterung des Haftfestigkeitsmodells nach Bay auf die Haftung unterschiedlicher Werkstoffe nach Zhang [Zha94] .....	80
3.5.3.1 Modelle zur Berechnung des Extrusionsdrucks $p_e$ .....	80
3.5.3.2 Das Haftfestigkeitsmodell nach Zhang .....	85
3.5.3.3 Kritik am Haftmodell von Bay-Zhang .....	90
3.5.4 Modifizierung des Modells nach Bay-Zhang als mehrskaliges Freiburger Haftmodell .....	91
3.5.4.1 Struktur des Freiburger Haftfestigkeitsmodells .....	91
3.5.4.2 Berechnungsalgorithmus für den elastisch/plastischen Kontakt zwischen rauen Oberflächen unterschiedlicher Festigkeit .....	95
Berechnung der realen Kontaktfläche zwischen rauen Oberflächen .....	97
3.5.4.3 Modell für die Bindungsfestigkeit .....	102
3.5.4.4 Zusammenfassung Haftmodell .....	107
4 Simulation von Plattiervorgängen .....	109
4.1 Berechnungsmethoden für die Umformung von Werkstoffverbunden .....	109
4.1.1 Empirische Modelle .....	109
4.1.2 Schrankenverfahren .....	110

4.1.3	Elementaren Platizitätstheorie und deren Anwendung für die Berechnung des Walzens sowie des Walzplattierens von Bimetallen .....	114
4.1.4	Berechnung des Kraftbedarfs und der Haftfestigkeit für das Walzplattieren.....	115
4.2	Walzplattieren .....	118
4.2.1	Verallgemeinertes Walzplattiermodell .....	118
4.2.1.1	Mechanisches Teilmodell für Werkstofffluss und Spannungszustand auf Basis der Elementaren Platizitätstheorie.....	120
4.2.1.2	Werkstoffmodell:.....	134
4.2.1.3	Kinematik.....	142
4.2.1.4	Tribologische Modelle:.....	146
4.2.1.5	Spannungszustand, Kräfte und Momente .....	151
4.2.1.6	Thermisches Teilmodell.....	161
	Wärmeinhalt .....	163
	Wärmequellen .....	163
	Umformwärme .....	163
	Reibungswärme .....	163
	Erwärmung durch Induktion .....	164
	Wärmeleitung .....	164
	Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung.....	164
	Vereinfachte numerische Lösung .....	165
	Temperaturmodell der Schichten .....	166
4.2.1.7	Vorgehensweise zur vereinfachten, entkoppelten Berechnung:....	169
4.3	Zusammenhang der Prozessmodelle für das Walzplattieren .....	172
4.4	Walzen von Werkstoffverbunden und inhomogenen Werkstoffen .....	173
4.4.1	Einleitung .....	173
4.4.2	Ableitung des Schichtenmodells .....	176
4.4.2.1	Annahmen und Bezugsgrößen .....	176
4.4.2.2	Mechanisches Teilmodell .....	177
	Beschreibung der Geometrie .....	177
	Schichtdickenmodell.....	178
	Werkstoffmodell.....	178
	Reibungsgesetz:.....	179
	Lokaler Vergleichsumformgrad: .....	179
	Vergleichsumformgeschwindigkeit: .....	180
	Spannungszustand.....	181
	Spannungsrandbedingungen .....	181
	Berücksichtigung des elastischen Verhaltens der Walzen .....	182
	Walzkraft je Einheitsbreite .....	182
	Walzmoment je Einheitsbreite .....	183
4.4.2.3	Herleitung der Eigenspannungen in den Schichten.....	183
4.4.2.4	Grenzwertbetrachtungen für das Schichtenmodell .....	188
4.4.2.5	Thermisches Teilmodell.....	189
4.4.2.6	Lösungsstrategie für das Bandwalzen von Schichtenverbunden und inhomogenen Werkstoffen .....	189
4.4.2.7	Verifizierung des Schichtenmodells.....	192
	Verifizierung des Temperaturmodells.....	192
	Verifizierung des Spannungszustandes .....	202
	Verifizierung des Formänderungszustandes .....	202
4.4.2.8	Berechnung des vollständigen Formänderungstensors und der Schubspannungen.....	206

	Berechnung des Verschiebungsfeldes eines virtuellen Punktegitters .....	206
	Visioplastische Auswertung des Verschiebungszustandes mittels FE Netz .....	207
5	Parameterstudien und experimentelle Evaluierung .....	213
5.1	Vorversuche .....	213
5.1.1	Kaltwalzen – Breitungverhalten, Gerüstauflagerung, Tribologie und Werkstoffmodelle .....	213
5.1.2	Voruntersuchungen zur Beeinflussung von Oberflächenzuständen durch mechanischen Vorbehandlung .....	224
5.1.2.1	Rauheit infolge mechanischer Oberflächenvorbehandlungen .....	225
5.1.2.2	Oberflächenverfestigung durch Bürsten .....	229
5.1.2.3	Kontaktflächentemperatur beim Bürsten: .....	237
5.1.2.4	Bestimmung der zeitlichen Veränderung der Oberflächenenergie von Metallen zur Charakterisierung der Aktivierung durch Vorbehandlungsverfahren .....	238
5.1.3	Bestimmung von Parametern des Haftmodells .....	240
5.2	Walzplattieren .....	250
5.2.1	Vergleichsrechnung anhand der Plattierung Al / Cu .....	250
5.2.2	Parameterstudien Walzplattieren von Bimetallen .....	258
5.2.2.1	Theoretische Parameterstudie .....	258
5.2.2.2	Experimentelle Untersuchungen zum Walzplattieren .....	273
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	285
7	Anhang .....	289
7.1	Symbolverzeichnis .....	289
7.2	Literaturverzeichnis .....	297
7.3	Bilderverzeichnis: .....	309
7.4	Tabellenverzeichnis: .....	321
7.5	Versuchsprogramm und Eigenschaften der verwendeten Metalle und Legierungen .....	323
7.6	Druckverteilungen der Parameterstudie .....	337
7.7	FEM-Berechnungen zur Plattierung Al/Cu nach Tabelle 5-14 .....	343
7.8	Veränderung des Schichtdickenverhältnisses bei unterschiedlichen Walzspaltgeometrien .....	345
7.9	Prüfverfahren für die Haftfestigkeit .....	347
7.9.1	Verdrehversuche .....	348
7.9.2	Schertest .....	348
7.9.3	Stirnzugversuch/ Calmers Test .....	351
7.9.4	Schältest .....	352
7.10	Teilmodelle zum Kontakt rauer Oberflächen und deren Einfluss auf die Haftfestigkeit .....	357
7.10.1.1	Aufreißen spröder Deckschichten und Verhaken von Oberflächen .....	381
7.11	Pressschweißen .....	384
7.11.1	Schichtdickenverhältnis für das Kaltpressschweißen im einseitig offenen Gesenk – Lösung mittels Extremwertsätze für flache Stempel reibungsfreies Abgleiten der Schichten .....	384
7.11.2	Bestimmung der kritischen Schichtdicken $H_2$ , ab der beide Materialien fließen .....	388
7.12	Grundmodell für den Stofffluss und den Haftungsaufbau mit konstanter mittlerer Umformfestigkeit nach [Tzo00] und Dimensionsanalyse nach [SCH04] .....	391
	Prozessparameter .....	397

4.1.3	Elementaren Platizitätstheorie und deren Anwendung für die Berechnung des Walzens sowie des Walzplattierens von Bimetallen .....	114
4.1.4	Berechnung des Kraftbedarfs und der Haffestigkeit für das Walzplattieren .....	115
4.2	Walzplattieren .....	118
4.2.1	Verallgemeinertes Walzplattiermodell .....	118
4.2.1.1	Mechanisches Teilmodell für Werkstofffluss und Spannungszustand auf Basis der Elementaren Plastizitätstheorie .....	120
4.2.1.2	Werkstoffmodell: .....	134
4.2.1.3	Kinematik .....	142
4.2.1.4	Tribologische Modelle: .....	146
4.2.1.5	Spannungszustand, Kräfte und Momente .....	151
4.2.1.6	Thermisches Teilmodell .....	161
	Wärmeinhalt .....	163
	Wärmequellen .....	163
	Umformwärme .....	163
	Reibungswärme .....	163
	Erwärmung durch Induktion .....	164
	Wärmeleitung .....	164
	Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung .....	164
	Vereinfachte numerische Lösung .....	165
	Temperaturmodell der Schichten .....	166
4.2.1.7	Vorgehensweise zur vereinfachten, entkoppelten Berechnung: ....	169
4.3	Zusammenhang der Prozessmodelle für das Walzplattieren .....	172
4.4	Walzen von Werkstoffverbunden und inhomogenen Werkstoffen .....	173
4.4.1	Einleitung .....	173
4.4.2	Ableitung des Schichtenmodells .....	176
4.4.2.1	Annahmen und Bezugsgrößen .....	176
4.4.2.2	Mechanisches Teilmodell .....	177
	Beschreibung der Geometrie .....	177
	Schichtdickenmodell .....	178
	Werkstoffmodell .....	178
	Reibungsgesetz: .....	179
	Lokaler Vergleichsumformgrad: .....	179
	Vergleichsumformgeschwindigkeit: .....	180
	Spannungszustand .....	181
	Spannungsrandbedingungen .....	181
	Berücksichtigung des elastischen Verhaltens der Walzen .....	182
	Walzkraft je Einheitsbreite .....	182
	Walzmoment je Einheitsbreite .....	183
4.4.2.3	Herleitung der Eigenspannungen in den Schichten .....	183
4.4.2.4	Grenzwertbetrachtungen für das Schichtenmodell .....	188
4.4.2.5	Thermisches Teilmodell .....	189
4.4.2.6	Lösungsstrategie für das Bandwalzen von Schichtenverbunden und inhomogenen Werkstoffen .....	189
4.4.2.7	Verifizierung des Schichtenmodells .....	192
	Verifizierung des Temperaturmodells .....	192
	Verifizierung des Spannungszustandes .....	202
	Verifizierung des Formänderungszustandes .....	202
4.4.2.8	Berechnung des vollständigen Formänderungstensors und der Schubspannungen .....	206

	Berechnung des Verschiebungsfeldes eines virtuellen Punktegitters .....	206
	Visioplastische Auswertung des Verschiebungszustandes mittels FE Netz .....	207
5	Parameterstudien und experimentelle Evaluierung .....	213
5.1	Vorversuche .....	213
5.1.1	Kaltwalzen – Breitungverhalten, Gerüstauffederung, Tribologie und Werkstoffmodelle .....	213
5.1.2	Voruntersuchungen zur Beeinflussung von Oberflächenzuständen durch mechanischen Vorbehandlung .....	224
5.1.2.1	Rauheit infolge mechanischer Oberflächenvorbehandlungen .....	225
5.1.2.2	Oberflächenverfestigung durch Bürsten .....	229
5.1.2.3	Kontaktflächentemperatur beim Bürsten: .....	237
5.1.2.4	Bestimmung der zeitlichen Veränderung der Oberflächenenergie von Metallen zur Charakterisierung der Aktivierung durch Vorbehandlungsverfahren .....	238
5.1.3	Bestimmung von Parametern des Haftmodells .....	240
5.2	Walzplattieren .....	250
5.2.1	Vergleichsrechnung anhand der Plattierung Al / Cu .....	250
5.2.2	Parameterstudien Walzplattieren von Bimetallen .....	258
5.2.2.1	Theoretische Parameterstudie .....	258
5.2.2.2	Experimentelle Untersuchungen zum Walzplattieren .....	273
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	285
7	Anhang .....	289
7.1	Symbolverzeichnis .....	289
7.2	Literaturverzeichnis .....	297
7.3	Bilderverzeichnis: .....	309
7.4	Tabellenverzeichnis: .....	321
7.5	Versuchsprogramm und Eigenschaften der verwendeten Metalle und Legierungen .....	323
7.6	Druckverteilungen der Parameterstudie .....	337
7.7	FEM-Berechnungen zur Plattierung Al/Cu nach Tabelle 5-14 .....	343
7.8	Veränderung des Schichtdickenverhältnisses bei unterschiedlichen Walzspaltgeometrien .....	345
7.9	Prüfverfahren für die Haftfestigkeit .....	347
7.9.1	Verdrehversuche .....	348
7.9.2	Schertest .....	348
7.9.3	Stirnzugversuch/ Calmers Test .....	351
7.9.4	Schältest .....	352
7.10	Teilmodelle zum Kontakt rauer Oberflächen und deren Einfluss auf die Haftfestigkeit .....	357
7.10.1.1	Aufreißen spröder Deckschichten und Verhaken von Oberflächen .....	381
7.11	Pressschweißen .....	384
7.11.1	Schichtdickenverhältnis für das Kaltpressschweißen im einseitig offenen Gesenk – Lösung mittels Extremwertsätze für flache Stempel reibungsfreies Abgleiten der Schichten .....	384
7.11.2	Bestimmung der kritischen Schichtdicken $H_2$ , ab der beide Materialien fließen .....	388
7.12	Grundmodell für den Stofffluss und den Haftungsaufbau mit konstanter mittlerer Umformfestigkeit nach [Tzo00] und Dimensionsanalyse nach [SCH04] .....	391
	Prozessparameter .....	397