

Kontaktwärmübergang unter hohen Druck- und Temperaturrandbedingungen

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur
Christian Fieberg
aus Düsseldorf

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Kneer
Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zeller

Tag der mündlichen Prüfung: 30. April 2008

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	xi
1 Einleitung und Ziel der Arbeit	1
2 Stand der Forschung	5
2.1 Der Kontakt-Wärmeübergangskoeffizient und seine technische Bedeutung	6
2.2 Theoretische Untersuchungen	8
2.3 Experimentelle Untersuchungen	9
2.3.1 Stationäre Messverfahren	9
2.3.2 Instationäre Messverfahren	11
2.4 Experimentelle Ergebnisse aus der Literatur	12
3 Theoretische Beschreibung des Kontaktwärmeübergangs	15
3.1 Allgemeine Annahmen zum Kontaktwärmeübergang	15
3.1.1 Strukturmechanische Modellierung der Kontaktfläche	16
3.1.2 Thermodynamische Modellierung der Kontaktfläche	26
3.2 Das Modell nach Mikić (1974)	31
3.3 Das Modell nach Bahrami et al. (2004)	34
3.4 Das Oberflächenmodell nach Pullen und Williamson (1972)	38
3.5 Zusammenfassung der Modelle	40
3.6 Beschichtete Proben	41
4 Werkstoffkundliche Untersuchungen	45
5 Experimentelle Bestimmung des Kontaktwiderstands aus transienten Temperaturmessungen	51
5.1 Infrarot-Thermografie	51
5.2 Versuchsaufbau und -ablauf	55

5.3	Probengeometrie	57
5.4	Beschichtete Proben	59
5.5	Durchführung der Experimente	60
5.6	Korrektur der Temperaturdaten	61
6	Das Inverse Problem	69
6.1	Parameter-Schätzung	71
6.2	Funktionen-Schätzung	72
6.2.1	Formulierung des Wärmeübertragungsproblems	73
6.3	Methodischer Lösungsansatz für inverse Wärmeleitungsprobleme	75
6.3.1	Die Sequential Estimation-Methode	77
6.3.2	Die Methode der konjugierten Gradienten	82
6.4	Anwendung des IHCP zur Bestimmung des Kontakt-Wärmeübergangs- koeffizienten	90
6.4.1	Test der Sequential Estimation-Methode	91
6.4.2	Test der Methode der konjugierten Gradienten	93
6.4.3	Fehlerabschätzung	94
7	Ergebnisse zum Kontaktwärmeübergang	99
7.1	Experimentelle Ergebnisse	100
7.1.1	Bestimmung der Kontakt-Wärmeübergangskoeffizienten aus tran- sienten Temperaturdaten	100
7.1.2	Einfluss des Kontaktdrucks auf den Kontakt-Wärmeübergangs- koeffizienten	103
7.1.3	Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf den Kontakt-Wärmeüber- gangskoeffizienten	107
7.1.4	Temperatureinfluss	110
7.1.5	Vergleich der einzelnen Effekte	114
7.2	Kontaktwärmeübergang mit Zwischenmedien ^a	116
7.2.1	Kontaktwärmeübergang zwischen beschichteten Proben aus Stahl und Sintermetallen	117
7.2.2	Kontaktwärmeübergang zwischen beschichteten Proben aus ei- ner Nickelbasislegierung und einem Schleudergusswerkstoff	118

7.2.3	Kontaktwärmeübergang zwischen beschichteten Proben aus Stahl und Sintermetall bei unterschiedlichen Mitteltemperaturen	120
7.3	Simulationsergebnisse	123
7.3.1	Numerische Untersuchung mehrdimensionaler Effekte in den Pro- benkörpern	123
7.3.2	FEM-Simulation der Kontaktwärmeversuche	127
8	Zusammenfassung	133
9	Literaturverzeichnis	135
	Anhang	145
A	Herleitung der Methode der konjugierten Gradienten	145
A.1	Das direkte Problem	145
A.2	Das Sensitivitätsproblem	146
A.3	Das Gütefunktional	148
A.4	Das adjungierte Problem	151
B	Stoffdaten	155
B.1	Stahlwerkstoffe	155
B.2	Aluminiumwerkstoffe	158
B.3	Nickelbasislegierungen	159
B.4	Schleudergusswerkstoffe	160
B.5	Sinterwerkstoffe	161