

**Erhöhung der Standzeit von durch Thermoschock und  
Verschleiß hoch beanspruchten Warmarbeitswerkzeugen  
aus Stahl 1.2365**

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von **Diplom-Ingenieur**

**Martin Pant**

Essen

**Berichter:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck  
Hon.-Prof. Dr.-Ing. Horst Spitzer  
Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Dr.-Ing. e.h. Winfried Dahl

Tag der mündlichen Prüfung:

06. Februar 2004

## **INHALTSVERZEICHNIS**

### **Abstract**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Kenntnisse und Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Literaturübersicht der Beanspruchungsarten</b>	<b>8</b>
<b>3.1</b>	<b>Temperaturwechselbeständigkeit</b>	<b>8</b>
3.1.1	Definitionen	8
3.1.2	Begriffsbestimmungen der Temperaturwechselbeständigkeit	9
3.1.3	Schadensinitiierung	10
3.1.4	Arten der Temperaturwechselschäden	12
3.1.5	Einflussgrößen auf die Temperaturwechselbeständigkeit	14
3.1.6	Berechnung der Temperaturwechselbeständigkeit	17
3.1.7	Schäden in der Praxis	19
3.1.8	Prüfverfahren der Temperaturwechselbeständigkeit	20
<b>3.2</b>	<b>Verschleiß</b>	<b>23</b>
3.2.1	Grundlagen der Tribosysteme	24
3.2.2	Verschleißmechanismen	26
3.2.3	Verschleißarten	38
3.2.4	Verschleißbetrag in Abhängigkeit der Verschleißmechanismen	41
3.2.5	Verschleißprüfung und Prüfverfahren	42
3.2.6	Warmverschleiß	46
3.2.7	Verschleiß von Bauteilen in der Praxis	49
<b>4</b>	<b>Warmarbeitsstähle und -werkzeuge</b>	<b>52</b>
<b>4.1</b>	<b>Anforderungen an Gesenkschmiedewerkzeuge</b>	<b>52</b>
4.1.1	Beanspruchung von Schmiedegesenken	52
4.1.2	Schadensarten an Gesenkschmiedewerkzeugen	56
<b>4.2</b>	<b>Stand der Technik bei Warmarbeitsstählen</b>	<b>59</b>
4.2.1	Legierungsgehalte von Warmarbeitsstählen	61
4.2.2	Herstellung und Verarbeitung von Warmarbeitsstählen	63
4.2.3	Wärmebehandlung von Warmarbeitsstählen	65
4.2.4	Grenzen der üblichen Maßnahmen	67

<b>4.3</b>	<b>Der Warmarbeitsstahl 1.2365 (32CrMoV12-28)</b>	<b>68</b>
4.3.1	Anwendungen und chemische Zusammensetzung	68
4.3.2	Wärmebehandlung und physikalische Kennwerte	68
<b>5</b>	<b>Oberflächenbehandlung von Warmarbeitsstählen</b>	<b>72</b>
<b>5.1</b>	<b>Gängige Oberflächenbehandlungsverfahren</b>	<b>72</b>
<b>5.2</b>	<b>Nitrieren und Nitrokarburieren</b>	<b>80</b>
5.2.1	Grundlagen des Nitrierens	80
5.2.2	Verwendete Nitrier- und Nitrokarburierverfahren	83
5.2.3	Einfluss auf die Nitriertiefe und Anwendungsbeispiele	86
<b>5.3</b>	<b>Laseroberflächenbehandlung</b>	<b>88</b>
5.3.1	Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit Zusatzwerkstoff	88
5.3.2	Verfahrensprinzip des Laserlegierens	91
5.3.3	Erfahrungen mit Laser legierten Werkzeugen und Zusatzwerkstoffen	94
<b>5.4</b>	<b>Kombination von Laserlegieren und Nitrieren zur Standzeiterhöhung von Warmarbeitswerkzeugen</b>	<b>97</b>
5.4.1	Anforderungen an das Schichtsystem und Arbeitshypothese	97
5.4.2	Herstellungsweg der Duplex-Schichten	100
5.4.3	Bisherige Erfahrungen und Ergebnisse	101
<b>6</b>	<b>Aufgabenstellung und Arbeitsprogramm</b>	<b>103</b>
<b>7</b>	<b>Prüfmethoden und Auswerteverfahren</b>	<b>107</b>
<b>7.1</b>	<b>Schichtcharakterisierung</b>	<b>107</b>
<b>7.2</b>	<b>Temperaturwechselprüfungen</b>	<b>109</b>
7.2.1	Prüfstand und Prüfmethode	109
7.2.2	Auswertemethoden	114
<b>7.3</b>	<b>Stoßverschleißprüfung</b>	<b>116</b>
7.3.1	Prüfstand und Prüfmethode	116
7.3.2	Auswertemethoden	119
<b>7.4</b>	<b>Gemeinsame Betrachtung der Ergebnisse</b>	<b>120</b>

<b>8</b>	<b>Ergebnisse und Auswertung</b>	<b>121</b>
<b>8.1</b>	<b>Schichtcharakterisierung</b>	<b>121</b>
8.1.1	Gefügebetrachtung	122
8.1.2	Elementverteilung	134
8.1.3	Linienanalyse	146
8.1.4	Phasenanalyse mittels Goniometrie	152
8.1.5	Thermodynamische Rechnungen	156
8.1.6	Härteverlaufsprüfung	162
8.1.7	Diskussion der Ergebnisse der Schichtcharakterisierung	169
<b>8.2</b>	<b>Ergebnisse der Temperaturwechselversuche</b>	<b>171</b>
8.2.1	Rissanalyse und Kennwertberechnung	171
8.2.2	Bewertung der Temperaturwechselbeständigkeit	186
8.2.3	Diskussion der Ergebnisse der Temperaturwechselprüfungen	188
<b>8.3</b>	<b>Ergebnisse der Stoßverschleißversuche</b>	<b>190</b>
8.3.1	Stereomikroskopie der Kalottenoberflächen	192
8.3.2	Entwicklung der Kalottengrößen	194
8.3.3	Endkalottengröße über der Randhärte	200
8.3.4	Bewertung der Stoßverschleißbeständigkeit	206
8.3.5	Diskussion der Ergebnisse der Stoßverschleißversuche	207
<b>8.4</b>	<b>Gesamtbewertung der Ergebnisse aus den Prüfungen und Auswahl für die industriellen Versuche</b>	<b>209</b>
<b>8.5</b>	<b>Ergebnisse der industriellen Untersuchungen</b>	<b>212</b>
8.5.1	<i>Geometrie, Einsatz und Herstellung der Werkzeuge</i>	212
8.5.2	Schadensbetrachtung eines ausgefallenen Werkzeugs	216
8.5.3	Erzielte Standzeiterhöhungen	217
8.5.4	Diskussion der Ergebnisse der industriellen Versuche	219
<b>9</b>	<b>Diskussion</b>	<b>221</b>
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>226</b>
<b>11</b>	<b>Literatur</b>	<b>229</b>
<b>12</b>	<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>241</b>