

Thermometrische Untersuchungen zum zyklischen Verformungsverhalten metallischer Werkstoffe

Von der Fakultät Energietechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von Dipl.-Ing. Klaus Friedrich Stärk
aus Mainz

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. K. Kußmaul
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. J. Wachter
Tag der mündlichen Prüfung: 16. Juni 1980

Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA), Universität Stuttgart

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Bezeichnungen	9
1. Einleitung	11
1.1. Problemstellung	11
1.2. Ziel der Untersuchungen	14
2. Stand der Forschung	17
2.1. Indirekte Meßverfahren	18
2.1.1. Meßwerterfassung an der Schwingprüfmaschine	18
2.1.2. Wärmestrommessungen mit Hilfe eines Koppelmediums	19
2.1.3. Klassische Dämpfungsmessungen	20
2.2. Direkte Meßverfahren	21
2.2.1. Bestimmung der Formänderungsarbeit aus der Hysteresisfläche	21
2.2.2. Temperaturmessungen an der Materialoberfläche	23
2.2.2.1. Temperaturmessung mit Thermoelementen	24
2.2.2.2. Temperaturmessung mit Widerstandsfühlern	25
2.2.2.3. Temperaturmessung mit Wärmebildkamera	27
2.2.2.4. Temperaturmessung mit Flüssigkristallen	27
3. Temperaturanalyse axial belasteter Proben	29
3.1. Temperaturanalyse glatter Proben mit Wärmequellen	29

	Seite
3.1.1. Zügige elastische Beanspruchung	29
3.1.2. Instationäre Temperaturverteilung bei zyklischer Kurzzeitbeanspruchung	30
3.1.3. Quasistationäre Temperaturverteilung bei zyklischer Kurzzeitbeanspruchung	32
3.1.4. Quasistationäre Temperaturverteilung bei zyklischer Langzeitbeanspruchung	37
3.2. Temperaturanalyse gekerbter Proben mit Wärmequellen	38
3.2.1. Quasistationäre Temperaturverteilung bei zyklischer Kurzzeitbeanspruchung	39
3.2.2. Quasistationäre Temperaturverteilung bei zyklischer Langzeitbeanspruchung	43
4. Meßverfahren, Temperaturfühler und Applikationsmethoden	45
4.1. Probengeometrie und -belastung	46
4.2. Der Kupferlackdraht-Meßfühler	47
4.2.1. Eigenschaften und Applikation	47
4.2.2. Eichung und Kalibrierung	49
4.2.3. Absolutmessungen	51
4.2.4. Meßbrückenschaltungen	52
4.3. Der Miniatur-Heißleiter-Meßfühler	53
4.3.1. Eigenschaften und Applikation	53
4.3.2. Meßaufbau	54
4.3.3. Eichung und numerische Auswertung der Widerstandsmessung	55
5. Werkstoffe und Werkstoffkennwerte	58
5.1. Versuchswerkstoffe	58
5.1.1. Graues Gußeisen	58
5.2.1. Austenit	59
5.2.3. Ferrit	59
5.2. Spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit	61

	Seite
6. Versuchsdurchführung	64
6.1. Prüfmaschinen	64
6.2. Meßwerterfassung	65
6.2.1. Spannungsermittlung	65
6.2.2. Prüffrequenzermittlung	65
6.2.3. Ermittlung der Probertemperaturen	66
6.2.3.1. Kurzzeitversuche	66
6.2.3.2. Langzeitversuche	67
6.3. Meßwertverarbeitung	67
6.3.1. Kurzzeitversuche	67
6.3.2. Langzeitversuche	68
7. Ergebnisse	70
7.1. Dehnungsmessungen	70
7.1.1. Querkontraktionszahlen	70
7.1.2. Zyklische Querdehnungszahlen	70
7.1.3. Hysteresisschleifen	71
7.1.4. Diskussion	72
7.2. Temperaturanalyse ungekerbter Proben In Kurzzeitversuchen	72
7.2.1. Zügige Belastung	72
7.2.1.1. Thermoelastischer Effekt	73
7.2.1.2. Diskussion	73
7.2.2. Instationäre Kurzzeitschwingversuche	74
7.2.2.1. Versuchsergebnisse	74
7.2.2.2. Diskussion	75
7.2.3. Quasistationäre Kurzzeitschwingversuche	76
7.2.3.1. Überprüfung der Herleitungsvoraussetzungen	76
7.2.3.1.1. Temperaturparabel	77
7.2.3.1.2. Wärmeabfuhrverhältnisse	78
7.2.3.1.3. Temperaturniveau	78
7.2.3.1.4. Parabelkrümmung	78

	Seite
7.2.3.1.5. Probenquerschnitt	79
7.2.3.1.6. Prüffrequenz	80
7.2.3.1.7. Eindimensionale Wärmeströmung	81
7.2.3.1.8. Wärmeleitfähigkeit des Probenwerkstoffs	82
7.2.3.1.9. Diskussion	82
7.2.3.2. Spez. Wärmemenge pro Lastspiel	83
7.2.3.2.1. Reproduktionsgenauigkeit	84
7.2.3.2.2. Vergleich der Meßverfahren	84
7.2.3.2.3. Abhängigkeit vom Spannungsausschlag	85
7.2.3.2.4. Abhängigkeit von der Mittelspannung	87
7.2.3.2.5. Abhängigkeit von Zeitstandbeanspruchungen	88
7.2.3.2.6. Abhängigkeit von Vorbelastungen	90
7.2.3.2.7. Diskussion	91
7.3. Temperaturanalyse gekerbter Proben in Kurzzeitschwingversuchen	94
7.3.1. Kerbwärme	95
7.3.2. Spezifische Wärmemenge	95
7.3.3. Diskussion	96
7.4. Temperaturanalyse in Langzeitschwingversuchen	97
7.4.1. Grauguß GG-20	97
7.4.2. Austenit X 10 CrNiMoTi 18 10	98
7.4.3. Diskussion	98
8. Entwicklungs- und Einsatzmöglichkeiten der Thermometrie	101
9. Zusammenfassung	105
10. Schrifttum	107
11. Bilder und Anhang	115

9. Zusammenfassung

Die polykristallinen metallischen Werkstoffe werden in der Festigkeitsrechnung als quasihomogenes Kontinuum behandelt. Die im Kristallhaufwerk bei mechanischer Beanspruchung ablaufenden mikroskopischen und submikroskopischen plastischen Verformungen äußern sich in einer Umsetzung von mechanischer Energie in Wärme.

Die thermometrische Untersuchung von schwingend bei Raumtemperatur axial belasteten glatten und gekerbten Rundproben aus den Werkstoffen GG-20, X 10 CrNiMoTi 18 10, C 45, 34 CrNiMo 6 und 13 CrMo 4 4 mit einem Nennquerschnitt von 100 mm^2 ergab, daß die theoretischen Grundlagen zur Wärmestrommessung mit den experimentellen Ergebnissen in Einklang stehen. Es konnten weitgehende Aussagen über die Größe der für die Schädigung verantwortlichen irreversiblen Formänderungsarbeit gemacht werden.

Umfangreiche Messungen in Schwingversuchen bestätigen im einzelnen den exakten Verlauf der Temperaturparabel, auf deren Kenntnis die Ermittlung der je Lastspiel und Volumeinheit in Wärme umgesetzten Formänderungsarbeit beruht. Wie an Beispielen gezeigt wird, stellt diese spezifische Wärmemenge pro Lastspiel als irreversible Formänderungsarbeit das Maß für die bei schwingender Beanspruchung wirkenden Wechselverformungen dar. Der Einfluß des Gefügezustandes auch nach Vorbeanspruchung wie Kaltverformung und Zeitstandbeanspruchung ließ sich dabei aufzeigen.

Die vorgestellte Temperaturanalyse an glatten, schwingend beanspruchten Proben ist das z.Zt. einzige Verfahren, das Aussagen über das mikroskopische und makroskopische plastische Verhalten der metallischen Werkstoffe mit hoher Genauigkeit von kleinen Spannungsausschlägen bis ins Gebiet der extremen Zeitfestigkeit ermöglicht. Insbesondere in dem wichtigen Bereich der Dauerfestigkeit übertrifft es an Auflösung und Genauigkeit die bekannten Verfahren.

Die Temperaturmeßverfahren eignen sich sowohl für Kurzzeit- und Langzeitschwingversuche (Stufen- bzw. Wöhlerversuche) als auch für Untersuchungen bei zügiger Belastung. Das Verfahren wurde mit weniger großem Erfolg auch auf gekerbte Proben zur Ermittlung der Gesamtwärmeerzeugung von Umlaufkerben angewendet,

jedoch werden hier Weiterentwicklungen und Verbesserungsmöglichkeiten gesehen.

Die Untersuchungsergebnisse deuten darauf hin, daß durch gezielte Anwendung der Thermometrie weitere Erkenntnisse über Vorgänge und Zustandsänderungen im Aufbau der Werkstoffe sowie ausreichend zuverlässige Werkstoffdifferenzierungen bei zügiger, schwingender und schlagartiger Beanspruchung zu erwarten sind.

Die vorliegende Arbeit beginnt mit einer Zusammenstellung der metallkundlichen und metallphysikalischen Verfahren und Werkstoffprüfmethoden zur Messung der Energieumsetzung bzw. der Temperaturänderungen mechanisch beanspruchter metallischer Werkstoffe. Hieraus folgte, daß nur bei homogener Spannungsverteilung und direkter Messung an der Probe eine präzise quantitative Aussage zu den Dissipationsvorgängen im Werkstoff möglich ist.

Für den speziellen Fall einer rein axial zyklisch belasteten zylindrischen Probe errechnet sich bei statistisch homogen verteilten örtlichen Wärmequellen eine parabelförmige Temperaturverteilung. Die exakte meßtechnische Erfassung auf der Grundlage einer Analyse der Oberflächentemperatur der zylindrischen Meßlänge der Probe gelang mit dem Einsatz von - dem vorliegenden Meßproblem besonders angepaßten - hochauflösenden Meßfühlern auf der Basis von Kupferdraht-Widerständen bzw. Halbleitern. Die erzielte hohe Meßgenauigkeit beruht u.a. auf der konsequenten Ausnutzung von Differenzmessungen, genauen Eichungen und rechnergestützten Auswertemethoden.