

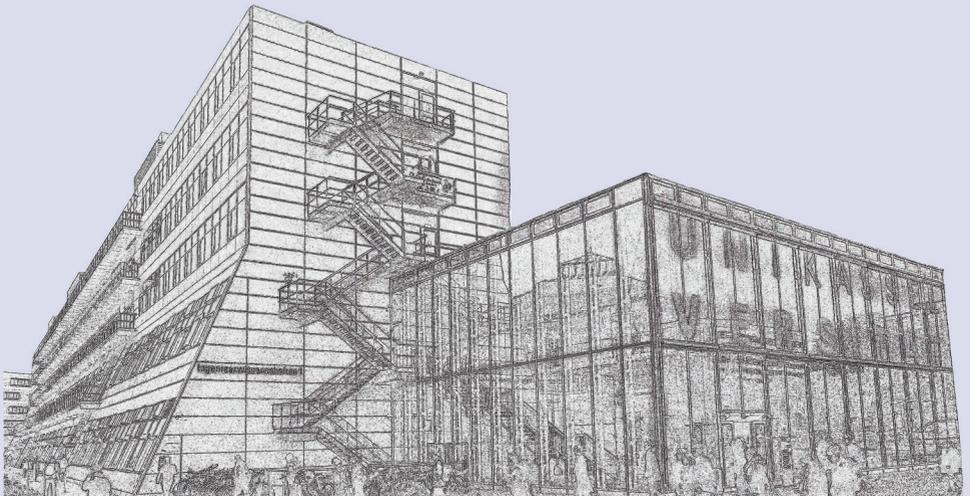
Fortschrittsberichte aus der Produktionstechnik

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm

Band 18

Igor Kryukov

Einsatz der induktionsangeregten Shearografie für die zerstörungsfreie Prüfung von nichtrostenden Stählen



Fortschrittsberichte aus der Produktionstechnik

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm
Universität Kassel

Band 18

Igor Kryukov

**Einsatz der induktionsangeregten Shearografie für
die zerstörungsfreie Prüfung von nichtrostenden
Stählen**

D 34 (Diss. Univ. Kassel)

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2021

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm,
(Universität Kassel)
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger,
(Technische Universität Braunschweig)
Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Thomas Niendorf,
(Universität Kassel)
Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach,
(Universität Kassel)

Tag der mündlichen Prüfung: 19.07.2021

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8392-7

ISSN 2195-5670

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich Menschen aus meinem Umfeld danken, die mich bei der Erstellung dieser Dissertation unterstützt und damit maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss dieses Projektes beigetragen haben.

Besonderen Dank möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm für die langjährige vertrauensvolle Zusammenarbeit aussprechen. Die nicht selbstverständliche, gebotene Möglichkeit, sich selbstständig wissenschaftlich zu orientieren, haben die vorliegende Arbeit ermöglicht.

Weiterhin bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger für die Begutachtung und Durchsicht der Dissertation sowie bei den Mitgliedern der Prüfungskommission Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Niendorf und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach.

Des Weiteren möchte ich mich bei den administrativen, technischen und wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fachgebiets Trennende und Fügende Fertigungsverfahren für die mentale Unterstützung, aber auch die gemeinsame Zeit und die vielen schönen Momente bedanken. Insbesondere danke ich herzlichst Herrn Eugen Prints, Herrn Christian Wolf, Herrn Eugen Schumacher, Herrn Dr. Martin Kahlmeyer, Herrn Dr. Andreas Winkel, Herrn Andreas Suckau, Herrn Rached Toumia und Herrn Jonas Stüber für die selbstverständliche Unterstützung bei Planung, Durchführung und Auswertung der unterschiedlichen Versuche und dem Verfassen dieser Arbeit.

Ein besonderer Dank geht an Doris Ullmann und Katharina Schlein für die Unterstützung bei der Korrektur der Arbeit. Außerdem gilt der Dank meinen Freunden für die Ermutigung und Motivation, die Arbeit fertig zu stellen.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Leonid Kryukov und Alia Kryukova sowie meiner Schwester Maria Sterzer bedanken, die mir ermöglichten, den eingeschlagenen Weg zu gehen. Schließlich bedanke ich mich bei Annemarie Ullmann für die Unterstützung, den Zuspruch, die Geduld und vieles, vieles mehr in dieser langen und nervenaufreibende Phase.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Kurzfassung	1
1 Einleitung	3
2 Nichtrostende Stähle und ihre Eigenschaften	7
2.1 Eigenschaften nichtrostender Stähle	7
2.1.1 Mechanische Eigenschaften	9
2.1.2 Thermische Eigenschaften	10
2.1.3 Elektrische Eigenschaften	13
2.1.4 Magnetische Eigenschaften	14
2.1.5 Passivschicht	17
2.2 Korrosionsarten und Unregelmäßigkeiten bei nichtrostenden Stählen . .	19
2.2.1 Korrosionsarten nichtrostender Stähle	20
2.2.2 Unregelmäßigkeiten nichtrostender Stähle	24
2.3 Zerstörungsfreie Prüfung von nichtrostenden Stählen	25
2.3.1 Verfahren der zerstörungsfreien Volumenprüfung von Metallen .	26
2.3.2 Zerstörungsfreie Volumenprüfung austenitischer nichtrostender Stähle	29
2.4 Zusammenfassung: Nichtrostende Stähle	30
3 Shearografie in der zerstörungsfreien Prüfung	31
3.1 Grundlagen der Shearografie	31
3.1.1 Speckle und ihre Eigenschaften	32
3.1.2 Messprinzip der Shearografie	36
3.1.3 Messprinzip der Phasenschiebe-Shearografie	43
3.1.4 Digitale Bildverarbeitung der Shearografie	47
3.1.5 Zerstörungsfreie Prüfung mittels Shearografie	50
3.2 Anregungen der Shearografie-Prüfung	52
3.2.1 Anregungsarten der Shearografie	52
3.2.2 Anregungssignale der shearografischen Prüfung	54
3.3 Grundlagen der Induktion	55
3.3.1 Grundlage der Induktionserwärmung	56
3.3.2 Elektromagnetische Effekte	57
3.3.3 Kraftwirkung im Magnetfeld	61

3.4	Einsatz der Shearografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren bei metallischen Werkstoffen	62
3.5	Zusammenfassung: Induktionsangeregte Shearografie	64
4	Zielsetzung und Forschungshypothesen	67
5	Methodisches Vorgehen	69
5.1	Werkstoffauswahl	69
5.2	Definition und Herstellung der Prüfkörper	71
5.3	Auswahl der Anlagentechnik	76
5.4	Entwicklung vom Messaufbau	80
5.5	Vorbereitung der Messungen	81
5.6	Datenauswertung	84
5.7	Zusammenfassung: Methodisches Vorgehen	87
6	Einflüsse von Oberfläche, Anregung und Auswertung auf das Messergebnis	89
6.1	Untersuchung zur Erhöhung des diffusen Reflexionsgrades metallischer Oberflächen	89
6.2	Untersuchung der Einflüsse der Induktionsanregung	95
6.3	Untersuchung der Einflüsse des Messsystems	99
6.4	Untersuchung des Einflusses des Referenzbildes	102
6.5	Untersuchung zur Reproduzierbarkeit der SNR-Wert-Bestimmung . . .	104
6.6	Zusammenfassung: Einflüsse von Oberfläche, Anregung und Auswertung	105
7	Detektion von inneren Fehlern in austenitischen nichtrostenden Stählen	107
7.1	Bestimmung optimaler Anregungs- und Messparameter	107
7.2	Fehlerdetektion mit optimalen Messparametern	109
7.2.1	Einfluss der Restwanddicke	109
7.2.2	Einfluss der Fehlergröße	110
7.2.3	Einfluss des Volumens oberhalb der Fehlstelle	110
7.2.4	Einfluss der Fehlergeometrie	111
7.2.5	Beurteilung der Fehlerauflösung	112
7.2.6	Bestimmung der Fehlergröße	114
7.3	Fehlerdetektion mit gleichbleibenden Messparametern	117
7.3.1	Einfluss der Restwanddicke	117
7.3.2	Einfluss der Fehlergröße	118
7.3.3	Einfluss des Volumens oberhalb der Fehlstelle	119
7.3.4	Einfluss der Fehlergeometrie	120

7.3.5	Beurteilung der Fehlerauflösung	121
7.3.6	Bestimmung der Fehlergröße	122
7.4	Einfluss der erzwungenen Deformation auf die Shearografiemessung	124
7.4.1	Grundlagen der dreidimensionalen Bildkorrelation	124
7.4.2	Erfassung der erzwungenen Deformation	125
7.4.3	Shearografisch detektierbare Deformationen	127
7.5	Zusammenfassung und Diskussion: Fehlerdetektion an austenitischen nichtrostenden Stählen	130
8	Detektion von inneren Fehlern in ferromagnetischen nichtrostenden Stählen	137
8.1	Fehlerdetektion an ferritischen nichtrostenden Stählen	137
8.1.1	Einfluss der Restwanddicke	137
8.1.2	Einfluss der Fehlergröße	138
8.1.3	Einfluss des Volumens oberhalb der Fehlstelle	139
8.1.4	Einfluss der Fehlergeometrie	140
8.1.5	Beurteilung der Fehlerauflösung	141
8.1.6	Bestimmung der Fehlergröße	142
8.2	Fehlerdetektion an martensitischen nichtrostenden Stählen	144
8.2.1	Einfluss der Restwanddicke	144
8.2.2	Einfluss der Fehlergröße	145
8.2.3	Einfluss des Volumens oberhalb der Fehlstelle	146
8.2.4	Einfluss der Fehlergeometrie	147
8.2.5	Beurteilung der Fehlerauflösung	148
8.2.6	Bestimmung der Fehlergröße	149
8.3	Fehlerdetektion an austenitisch-ferritischen nichtrostenden Stählen	150
8.3.1	Einfluss der Restwanddicke	151
8.3.2	Einfluss der Fehlergröße	152
8.3.3	Einfluss des Volumens oberhalb der Fehlstelle	153
8.3.4	Einfluss der Fehlergeometrie	154
8.3.5	Beurteilung der Fehlerauflösung	155
8.3.6	Bestimmung der Fehlergröße	156
8.4	Einfluss der Werkstoffeigenschaften auf die Fehlerdetektion	158
8.5	Zusammenfassung: Fehlerdetektion an ferromagnetischen nichtrostenden Stählen	160
9	Validierung der Messdaten an realen inneren Fehlern	163
9.1	Herstellung und Charakterisierung der Prüfkörper mit realen inneren Fehlern	163

9.2	Gegenüberstellung der Messdaten von nachgebildeten und realen inneren Fehlern	171
9.3	Zusammenfassung: Prüfung an realen inneren Fehlern	175
10	Fazit und Ausblick	177
	Literaturverzeichnis	VII
	Abkürzungsverzeichnis	XXI
	Symbolverzeichnis	XXIII
	Abbildungsverzeichnis	XXVII
	Tabellenverzeichnis	XXXV
	Anhang	XXXVI
A	Prüfkörper und ihre Eigenschaften	XXXVII
A.1	Eigenschaften verwendeter nichtrostender Stähle	XXXVII
A.2	Technische Zeichnungen der verwendeten Prüfkörper	XXXIX

Kurzfassung

Nichtrostende Stähle sind eine bedeutende Werkstoffklasse für eine Vielzahl von Anwendungen in unterschiedlichen Industriezweigen. Trotz ihrer hohen Beständigkeit gegenüber gleichmäßiger Flächenkorrosion führen Korrosionserscheinungen bei nichtrostenden Stählen jährlich zu hohen personellen und wirtschaftlichen Schäden. Um Korrosion rechtzeitig zu detektieren und Schäden zu verhindern, bedarf es geeigneter zerstörungsfreier Prüfmöglichkeiten. Aufgrund verfahrensspezifischer Limitierungen relevanter Prüftechniken wie Ultraschall-, Durchstrahlungs- sowie Thermografieprüfung besteht die Notwendigkeit, weitere wirtschaftliche Prüfmethoden zu etablieren. Aufgrund der vergleichsweise hohen Wärmeausdehnung nichtrostender Stähle bietet sich hier der Einsatz der Shearografie an, um Korrosionsschäden aber auch innere Unregelmäßigkeiten zerstörungsfrei zu detektieren.

Für die Erzeugung der notwendigen Oberflächendeformation wird die Induktionserwärmung als thermische Anregungsart gewählt. Durch die induzierten Wirbelströme lässt sich innerhalb von Sekunden eine ausreichende Wärmeausdehnung in dem elektrisch leitfähigen Werkstoff erzeugen und die fehlerbedingte Deformationsänderung auswerten. Mit der vorliegenden Arbeit werden systematisch Grundlagen zur induktionsangeregten Shearografieprüfung von nichtrostenden Stählen geschaffen. Die vorgestellten Methoden beschreiben den Prüfaufbau, die Vorbereitung zur Sicherstellung reproduzierbarer Messdaten sowie die Messdatenauswertung. Hier liegt der Fokus auf der objektiven, schwellwertbasierten Fehlerbewertung über das Signal-Rausch-Verhältnis.

Die Ermittlung der werkstoffabhängigen Detektionsgrenzen der induktionsangeregten Shearografie erfolgt an relevanten Werkstoffen der austenitischen, ferritischen, martensitischen sowie austenitisch-ferritischen nichtrostenden Stähle. Dazu werden Prüfkörper mit simulierten inneren Unregelmäßigkeiten (durch Sacklochbohrungen verschiedener Größe, Restwandstärke und Geometrie) hergestellt und untersucht. Die Messdaten zeigen die Abhängigkeit des Signal-Rausch-Verhältnisses von der Fehlergröße, der -tiefe und der -geometrie sowie die Genauigkeit der Fehlergrößenbestimmung. Die anhand simulierter Unregelmäßigkeiten ermittelten Detektionsgrenzen werden anhand realer Lochkorrosionen validiert. Hier ist die Messtechnik in der Lage, Korrosionen mit $\varnothing 2 \text{ mm}$ in einer Tiefe von 2 mm sicher zu detektieren und mit einer Genauigkeit $> 90\%$ zu vermessen. Die Arbeit zeigt, dass die induktionsangeregte Shearografie ermöglicht, relevante Fehler in nichtrostenden Stählen sicher zu detektieren und damit als Verfahren zur Prüfung dieser Werkstoffe geeignet ist.

Abstract

Stainless steels are an important class of materials for a large number of applications in different branches of industry. Despite their high resistance to uniform corrosion, corrosion phenomena in stainless steels lead to high personnel and economic losses every year. In order to detect corrosion at an early stage and prevent damage, suitable non-destructive testing methods are required. Due to process-specific limitations of relevant test methods such as ultrasonic, radiographic and thermographic testing, there is a need to establish further economical test methods. Due to the comparatively high thermal expansion of stainless steels, shearography could be used to detect corrosion damage as well as internal irregularities in a non-destructive manner.

Induction heating is selected as the thermal excitation method for generating the necessary surface deformation. Due to the induced eddy currents, sufficient thermal expansion can be generated in the electrically conductive material within seconds and the change of deformation caused by the irregularity can be evaluated. The present work systematically establishes the fundamentals of induction-excited shearography testing of stainless steels. The presented methods describe the test setup, the preparation to ensure reproducible measurement data and the evaluation of measurement data. The focus here is on objective, threshold-based defect evaluation using the signal-to-noise ratio.

The material-dependent detection limits of induction-excited shearography are determined on relevant materials of the austenitic, ferritic, martensitic and austenitic-ferritic stainless steels. For this purpose, test specimens with simulated internal irregularities (due to blind holes of various sizes, remaining wall thickness and geometry) are produced and examined. The measurement data show the dependence of the signal-to-noise ratio on the size, depth and geometry of the defect, as well as the accuracy of the determination of the defect size. The detection limits determined on the basis of simulated irregularities are validated using real pitting corrosion. Here, the measurement technology is able to detect corrosion with $\varnothing 2 \text{ mm}$ at a depth of 2 mm reliably and to measure its size with an accuracy of $> 90\%$. The work shows that induction-excited shearography makes it possible to reliably detect relevant defects in stainless steels and is therefore suitable as a method for non-destructive testing of these materials.