



Ultraschallunterstütztes Flüssigkeitsabschrecken bei der Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) der Fakultät für Maschinenbau
und Schiffstechnik der Universität Rostock.

*vorgelegt von Rabea Steuer geb. Redmann
geboren am 26.06.1983 in Waren (Müritz)*

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler

Universität Rostock
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Werkstofftechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. Franz Hoffmann

Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen

Abgabe: 27.08.2014, Verteidigung: 24.02.2015

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Werkstofftechnik der
Universität Rostock

Band 4

Rabea Steuer

**Ultraschallunterstütztes Flüssigkeitsabschrecken
bei der Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Rostock, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3667-1

ISSN 2192-0729

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

„Alles Wissen und alles Vermehren unseres Wissens endet nicht mit einem Schlusspunkt
sondern mit einem Fragezeichen.“

Hermann Hesse

Kurzfassung

Das Abschrecken ist ein wesentlicher Teilschritt der Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe. Es wird überwiegend als Flüssigkeitsabschreckung durchgeführt, die aufgrund der unterschiedlichen Siedephasen inhomogen ist. Die Unterstützung der Flüssigkeitsabschreckung mittels Ultraschall ist eine innovative Möglichkeit, das Filmsieden durch eine Destabilisierung des Dampffilms zu beeinflussen. Im Rahmen dieser Arbeit werden der Einfluss der Ultraschallparameter auf Abschreckwirkung und Abschreckgleichmäßigkeit sowie die wirkenden Mechanismen der ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckung von Aluminium- (EN AW-6082) und Stahlzylindern (X5CrNi18-10, C45E) systematisch untersucht. Die Ultraschallunterstützung führt zu einer signifikanten Beeinflussung der Abschreckvorgänge. Mit Ultraschallunterstützung lässt sich der Wärmeübergang, insbesondere in der Filmsiedephase, im Vergleich zur konventionellen Abschreckung zum Teil deutlich erhöhen. In axialer Richtung ist eine potentielle Vergleichmäßigung der Abschreckung zu beobachten. In Umfangsrichtung der Probe zeigt sich eine ungleichmäßigere Abschreckung verglichen zur konventionellen Abschreckung, die sich durch zwei gegenüberliegende Sonotroden jedoch deutlich verringern lässt. Ein zunehmender Einfluss auf die Abschreckwirkung ist mit zunehmender Ultraschallamplitude, abnehmendem Abstand zwischen Sonotrode und Probenoberfläche sowie zunehmender Größe der schallabgebenden Fläche zu verzeichnen. Über die Prozessparameter lassen sich sowohl die Abschreckwirkung als auch die Abschreckgleichmäßigkeit gezielt beeinflussen, so dass sich ein weiterer Bereich an Werkstoffstrukturen mit entsprechenden Werkstoffeigenschaften einstellen lässt. Als wesentliche Ursachen für die Beeinflussung der Flüssigkeitsabschreckung mittels Ultraschall werden der Schalldruck und der Schallstrahlungsdruck angesehen. Beide werden mit einer Reduzierung der Dampffilmdicke und einer damit verbundenen Erhöhung des Wärmeübergangs in die Abschreckflüssigkeit in Zusammenhang gebracht.

Abstract

Quenching is an important step during heat treatment of metals. Usually liquid quenching is performed, which is inhomogeneous due to the different boiling stages. The ultrasonic assisted liquid quenching is an innovative method to influence the film boiling stage by destabilising the vapour film. Within this study the influence of the ultrasonic parameters on the quenching power and homogeneity as well as the acting mechanisms of ultrasonic assisted liquid quenching of aluminium (6082) and steel cylinders (304, SAE 1045) are investigated systematically. The ultrasonic assistance leads to a significant alteration of the quenching processes. Compared to conventional quenching, the ultrasonic assistance causes an enhancement of the heat transfer, especially during the film boiling stage. Unidirectional ultrasound causes a potential quenching homogenisation in axial direction, but an inhomogeneity in circumferential direction compared to conventional quenching. This non-uniformity of unidirectional ultrasound is markedly reduced by bidirectional ultrasound. An increasing influence on quenching power is achieved by an increasing ultrasonic amplitude, a decreasing distance between sonotrode and sample and an increasing size of the sound emitting surface. By considering the process parameters, the quenching power as well as the quenching homogeneity can be strongly influenced. Consequently, a wide range of material structures and material properties can be achieved through ultrasonic assistance. Both, the acoustic pressure and the acoustic radiation pressure are seen to be the main reasons for influencing liquid quenching. They are associated with a reduction of the vapour film thickness and hence with an enhancement of the heat transfer to the liquid quenchant.

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Ultraschall	3
2.1.1	Begriffserläuterungen und Eigenschaften	3
2.1.2	Erzeugung von Ultraschall	6
2.2	Schallausbreitung in Flüssigkeiten	8
2.2.1	Wellengleichung	8
2.2.2	Nichtlineare Effekte	10
2.2.3	Schallgeschwindigkeit	12
2.3	Wärmebehandlung metallischer Bauteile	15
2.3.1	Bedeutung des Abschreckens	15
2.3.2	Flüssigkeitsabschreckung	16
2.3.3	Ultraschallunterstütztes Flüssigkeitsabschrecken	21
3	Werkstoffe und Methoden	27
3.1	Untersuchte Werkstoffe	27
3.1.1	Aluminiumknetlegierung EN AW-6082	27
3.1.2	Austenitischer Stahl X5CrNi18-10	29
3.1.3	Vergütungsstahl C45E	32
3.2	Abschreckexperimente	33
3.2.1	Versuchseinrichtung	33
3.2.2	Proben	36
3.2.3	Versuchsparameter	37
3.2.4	Versuchsdurchführung	40
3.2.5	Auswertung der Temperatur-Zeit-Messdaten	42
3.2.6	Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten	44
3.3	Probencharakterisierung	50
3.3.1	Metallographische Untersuchungen	50
3.3.2	Härteprüfungen	51

3.3.3	Rissprüfungen.....	52
3.3.4	Eigenspannungsbestimmung.....	52
3.3.5	Verzugsbestimmung.....	53
4	Experimentelle Ergebnisse.....	55
4.1	Ergebnisdarstellung.....	55
4.2	Wasserabschreckung am Werkstoff EN AW-6082.....	57
4.2.1	Konventionelle Abschreckung.....	57
4.2.2	Einseitige Ultraschallunterstützung.....	60
4.2.2.1	Charakterisierung der Abschreckwirkung.....	60
4.2.2.2	Beurteilung der Gleichmäßigkeit.....	67
4.2.2.3	Charakterisierung der Eigenschaften.....	70
4.2.3	Zweiseitige Ultraschallunterstützung.....	73
4.2.3.1	Charakterisierung der Abschreckwirkung.....	73
4.2.3.2	Beurteilung der Gleichmäßigkeit.....	80
4.2.3.3	Charakterisierung der Eigenschaften.....	83
4.3	Wasserabschreckung am Werkstoff X5CrNi18-10.....	85
4.3.1	Konventionelle Abschreckung.....	85
4.3.2	Einseitige Ultraschallunterstützung.....	86
4.3.2.1	Charakterisierung der Abschreckwirkung.....	86
4.3.2.2	Beurteilung der Gleichmäßigkeit.....	95
4.3.2.3	Charakterisierung der Eigenschaften.....	97
4.3.3	Zweiseitige Ultraschallunterstützung.....	100
4.3.3.1	Charakterisierung der Abschreckwirkung.....	100
4.3.3.2	Beurteilung der Gleichmäßigkeit.....	108
4.3.3.3	Charakterisierung der Eigenschaften.....	111
4.4	Ölabschreckung am Werkstoff X5CrNi18-10.....	115
4.4.1	Charakterisierung der Abschreckwirkung.....	115
4.4.2	Beurteilung der Gleichmäßigkeit.....	121

4.4.3	Charakterisierung der Eigenschaften	123
4.5	Ergebnisse am Werkstoff C45E.....	125
4.5.1	Wasserabschreckung	125
4.5.2	Ölabschreckung	130
5	Simulation	141
5.1	Modellierung	141
5.2	Ergebnisse der Simulation.....	143
5.2.1	Einseitige Ultraschallunterstützung.....	143
5.2.2	Zweiseitige Ultraschallunterstützung	146
6	Diskussion.....	151
6.1	Einfluss des Ultraschalls und der Prozessparameter.....	151
6.2	Zusammenhang tangentialer Abkühlgleichmäßigkeit und Abkühlwirkung ..	158
6.3	Vergleich des Abkühlverhaltens der untersuchten Werkstoffe.....	162
6.4	Wirkmechanismen des Ultraschalls	165
6.5	Vergleich von Experiment und Simulation	169
6.6	Ausblick	172
7	Zusammenfassung.....	175
	Selbständigkeitserklärung.....	I
	Literaturverzeichnis	II
	Anhang	VIII
A.	Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
B.	Symbolverzeichnis.....	VIII
C.	Abbildungsverzeichnis	X
D.	Tabellenverzeichnis	XVIII
E.	Verzeichnis im Rahmen der Promotion betreuter studentischer Arbeiten...	XIX
	Danksagung	XXI
	Akademischer Lebenslauf	XXIII