Versagensverhalten von Austenit-Martensit Rohrmischverbindungen für 600°C – Dampfkraftwerke unter Kriechermüdungsbelastung

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Valérie Friedmann geb. Denner

aus Haguenau (Frankreich)

Tag der mündlichen Prüfung: 12.07.2011
Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Riedel
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Alexander Wanner

Fraunhofer
IWM

Versagensverhalten von Austenit-Martensit Rohrmischverbindungen für 600°C – Dampfkraftwerke unter Kriechermüdungsbelastung

Valérie Friedmann geb. Denner

November 2011

Die vorliegende Dissertation wird im Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM als wissenschaftlicher Bericht mit folgender Berichtsnummer geführt:

W 13/2011

Fraunhofer-Institut
für Werkstoffmechanik IWM
Wöhlerstraße 11
79108 Freiburg

Schriftenreihe Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik

Band 74/2011

Valérie Friedmann

Versagensverhalten von Austenit-Martensit Rohrmischverbindungen für 600°C – Dampfkraftwerke unter Kriechermüdungsbelastung

Shaker Verlag
Aachen 2011

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0539-4
ISSN 1439-4790

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

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik in Freiburg und Doktorandin am Institut für Angewandte Materialien – Zuverlässigkeit von Bauteilen und Systemen des Karlsruher Instituts für Technologie. Dem Leiter beider Institute Prof. Dr. Peter Gumbsch gebührt mein herzlicher Dank, diese Arbeit ermöglicht zu haben.

Bei Prof. Dr. Hermann Riedel bedanke ich mich herzlich für die sehr motivierende Betreuung, die intensiven Diskussionen, die wertvollen Anregungen beim Verfassen der Dissertation und die Übernahme des Hauptreferats. Prof. Dr. Alexander Wanner vom Institut Angewandte Materialien – Werkstoffkunde des KIT danke ich herzlich für sein Interesse für diese Arbeit, die zügige Durchsicht der Dissertation und die Übernahme des Korreferats.

Meinem Gruppenleiter Dr. Dieter Siegele danke ich herzlich für die wertvollen Anregungen und Diskussionen und dafür, dass er mir die Freiräume zur Promotion gewährt hat. Den Leitern des Forschungsvorhabens „MARCKO-Schweißnaht“ am Fraunhofer IWM Dr. Thomas Hollstein und Dr. Wolfgang Burget danke ich herzlich für die wertvollen Diskussionen.

Bei meinen Kollegen des Fraunhofer IWM bedanke ich mich herzlich für die immer angenehme Zusammenarbeit. Bernhard Urich, Walter Weinschenk, Erhard Haas und Martin Möser gilt mein besonderer Dank für ihr hohes Engagement bei der Durchführung der Versuche. Monika Aberham, Hilde Urich, Ying Zahner und Michael Krause danke ich herzlich für ihre große Unterstützung und den wertvollen Ratschlägen bei den mikroskopischen Untersuchungen. Philipp von Hartrott danke ich herzlich für die sehr engagierte Zusammenarbeit bei den Lebensdaueruntersuchungen. Für die vielen wertvollen Diskussionen und ihre Unterstützung danke ich herzlich Dr. Ralf Mohrmann, Prof. Dr. Thomas Seifert, Christoph Schweizer, Gerhard Maier, Dr. Florence Andrieux, Dr. Silke Sommer und Ram Kumar Krishnasamy.

Den Mitgliedern des Lenkungsausschusses des Forschungsvorhabens „MARCKO-Schweißnaht“, insbesondere Herrn Ralf-Udo Husemann von der Firma Hitachi Power, Dr. Michael Schwienheer und Dr. Falk Müller vom Institut für Werkstoffkunde der TU Darmstadt sowie Dr. Walter Bendick vom Salzgitter Mannesmann Forschungsinstitut danke ich herzlich für die wertvollen Diskussionen während und nach dem Vorhaben.

Meinem Ehemann Patrick, meinen Eltern Marie-Paule und René, meinen Schwiegereltern Sieglinde und Rudolf, Barbara und Roland, meinem Schwager Andreas, meiner Schwester Claire und ihrem Partner Ludovic danke ich von ganzem Herzen für die liebevolle Betreuung unserer Kinder Anna und Marc und ihren großen Rückhalt. Ihnen, Anna und Marc ist diese Dissertation gewidmet.

Kurzfassung

Moderne Dampfkraftwerke mit erhöhtem Wirkungsgrad sollen bei höheren Dampfparametern als bisher betrieben werden und häufiger an- und abgefahren werden können. Außerhalb des Kessels werden Überhitzerrohre aus ferritischen oder martensitischen Werkstoffen hergestellt. Im Kessel werden hochtemperaturkorrosionsbeständige Austenite oder Nickelbasislegierungen eingesetzt. Die Qualifizierung der Mischverbindungen für den Betrieb setzt voraus, ihre Versagensmechanismen unter der höheren Wechselbelastung zu kennen. Ziel dieser Arbeit ist es, ein Beitrag zum Verständnis der Schädigungsvorgänge und Versagensmechanismen von Austenit/Martensit Überhitzerrohrmischverbindungen unter den neuen Belastungsbedingungen zu leisten. In Laborversuchen an geschweißten Rohren wird die komplexe thermomechanische Beanspruchung nachgebildet. Schwerpunkte der Arbeit sind die experimentelle Untersuchung der Versagensmechanismen in den Rohrversuchen und ihre Bewertung durch Lebensdauerdauerabschätzungen.

Alle Mischverbindungen versagen durch Kriechbruch im martensitischen Rohrteil, jedoch nicht unmittelbar entlang der Schmelzlinie. Ermüdungsrisse werden nicht beobachtet. Das Versagensverhalten von angelassenen Mischverbindungen wird durch eine Axialzusatzbelastung beeinflusst. Die experimentellen Lebensdauern lassen sich gut mit einer für mehrachsige Spannung verallgemeinerten Monkmant-Grant Beziehung erklären. Die mit dem Schädigungsparameter D_{TMF} berechneten Ermüdungslebensdauern, die zu erwarten wären, sind deutlich niedriger als die experimentellen. Dies zeigt, dass Ermüdung und Ermüdungsrisse die Kriechschädigung von Überhitzerrohrmischverbindungen unter den untersuchten Bedingungen kaum beeinflussen.

Abstract

Modern fossil fired power plants with increased thermal efficiency will be operated at higher steam temperatures and started and shut down more frequently. Ferritic or martensitic superheatertube steels are used outside the boiler. In the boiler superheater tubes are made of high temperature corrosion resistant austenites or nickelbased alloys. The failure mechanisms of the dissimilar tube welds have to be known for their qualification for service. The present work aims to contribute to the understanding of the damage and failure mechanisms of austenite/martensite dissimilar tube welds under the new loading conditions. The complex mechanical and thermal loads are reproduced in laboratory tests on welded tubes. The key aspects of this work are the experimental investigation of the failure mechanisms in the tube tests and their assessment by lifetime estimates.

All dissimilar welds failed by creep failure in the martensitic tube, but no fusion line failures occurred. No fatigue cracks were observed. Additional axial loading leads to a change of failure behaviour of annealed welds. Lifetime estimates using a Monkman-Grant relationship generalized for multiaxial stresses were in accordance with the experimental lifetimes. The expected fatigue lifetimes calculated using the damage parameter D_{TMF} were much lower than the experimental lifetimes. These results show that creep damage of dissimilar tube welds is marginally influenced by fatigue and fatigue cracks under the investigated loading conditions.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
2 Überhitzerrohrmischverbindungen in Dampfkraftwerken 4
2.1 Überhitzerrohrwerkstoffe 4
2.2 Wolfram-Inert-Gas (WIG) Schweißen 6
2.2.1 Prozessbeschreibung 6
2.2.2 Schweißeigenspannungen 8
2.2.3 Mikrostrukturelle Veränderungen durch die Schweißwärme 8
2.3 Untersuchung des Versagensverhaltens von Mischverbindungen 10
3 Grundlagen des Hochtemperaturbruchs 13
3.1 Kriechverformung 13
3.2 Porennukleation 16
3.3 Unbehindertes und behindertes diffusives Porenwachstum 17
3.4 Porenwachstum durch Kriechverformung 19
3.5 Kriechlebensdauerabschätzung durch empirische Beziehungen 20
3.6 Modifizierte Monkman-Grant Beziehung 21
3.7 Zyklische Verformung 23
3.8 Verformungsmodell für zyklische thermomechanische Belastung 24
3.9 Bruchmechanismen unter Kriechermüdung 26
3.10 Lebendauervorhersage für beliebige zyklische Hochtemperaturbelastung 27
4 Basisversuche und Anpassung der Modellparameter 30
4.1 Experimentelle Datenbasis 30
4.1.1 Versuche an Grundwerkstoffen und am Schweißgut 30
4.1.2 Erzeugung von Wärmeeinflusszonengefügen 33
4.1.3 Versuche an Wärmeeinflusszonengefügen 39
4.2 Anpassung des Verformungsmodells 44
4.2.1 Schweißgut und Grundwerkstoffe (homogene Proben) 45
4.2.2 Wärmeeinflusszonen (inhomogene Proben) 52
4.3 Anpassung der modifizierten Monkman-Grant Beziehungen 63
4.4 Anpassung des D_{TMF} –Ermüdungslebensdauermodells 63
5 Rohrversuche 66
5.1 Untersuchte Rohrmischverbindungen 66
5.2 Rohrproben und Rohrprüfstände 73
5.3 Rohrversuche unter konstantem Innendruck 78
5.4 Rohrversuche unter zyklischem Innendruck und Axialzusatzlast 81
5.5 Versagensmechanismen 85
5.5.1 Angelassene Mischverbindungen: Einfluss der Belastungsart 85
5.5.2 Neuvergütete Mischverbindungen 98
5.6 Zusammenfassung des Kapitels 5 101

6 Abschätzung der Lebensdauer in den Rohrversuchen 102
6.1 Lebensdauer mit den modifizierten Monkman-Grant Beziehungen.....102
6.1.1 Kritische Bereiche in den Rohrversuchen unter konstantem Innendruck.....104
6.1.2 Kritische Bereiche in den Rohrversuchen unter zyklischem Innendruck und Axialzusatzlast.....106
6.2 Lebensdauer in den Rohrversuchen mit dem Schädigungsparameter D_{TMF}.....108
6.2.1 Validierung des Verformungsmodells.....109
6.2.2 Auswertung des Schädigungsparameters D_{TMF} 109
6.2.3 Bereiche niedrigster Bruchzyklenzahlen in den Rohrversuchen unter konstantem Innendruck 110
6.2.4 Bereiche niedrigster Bruchzyklenzahlen in den Rohrversuchen unter zyklischem Innendruck und Axialzusatzlast.....112
7 Diskussion 115
7.1 Bewertung der Kriechschädigung 115
7.2 Versagensmechanismen bei hohen mechanischen Belastungen.....116
7.2.1 Angelassene Rohrmischverbingungen 116
7.2.2 Neuvergütete Rohrmischverbindungen 118
7.2.3 Erkenntnisse zu Versagensverhalten und Schädigungsvorgänge bei betriebsrelevanten mechanischen Belastungen.....119
7.3 Modellierung der martensitischen Wärmeeinflusszone 120
7.3.1 Erzeugung der Wärmeeinflusszonengefüge 120
7.3.2 Ableitung von Wechselplastitzitätsmodellen für die Zielzonen.....121
7.3.3 Eigenschaftgefälle der modellierten Wärmeeinflusszone 122
7.4 Lebensdauerabschätzung mit dem modifizierten Monkmant-Grant Produkt 124
8 Zusammenfassung und Ausblick 126

Literaturverzeichnis 128

Lebenslauf 136

Mathematische Notationen

Tensoren werden in fetter kursiver Schrift geschrieben.

Deviatorischer Anteil eines Tensors $\boldsymbol{a}$: $\boldsymbol{a}'$

Erste Ableitung nach der Zeit (Beispiel: Skalar x): $\dot{x}$

Spur eines Tensors: tr($\boldsymbol{a}$)

Macauley-Klammern: $\langle x \rangle = \frac{1}{2}(x + |x|)$