DISS. ETH NO. 22136

Thermo-Mechanical Lifetime Assessment of Components for 700°C Steam Turbine Applications

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

FRANK EHRHARDT

Dipl.-Ing., TU Dresden

born on 27.06.1980

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Edoardo Mazza, *examiner*
Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Maile, *co-examiner*
Dr. Stuart Holdsworth, *co-examiner*

2014

Summary

In order to increase the thermal efficiency and to reduce resource exploitation, recent development of advanced steam turbine technology has been targeted to steam inlet temperatures above 700°C and corresponding steam pressures exceeding 350 bar. These temperature levels are not sustainable for heat resistant steals and alternatively the much more expensive nickel- and cobalt based alloys have to be exploited. Previous European collaborative research and development activities between turbine manufacturers, forgemasters and research centres have identified candidate Ni-base alloys as suitable forgable high pressure steam turbine rotor materials and have also comprised welding procedure development for joints between Ni-base alloys and low as well as high alloyed ferritic steels. Due to economical reasons it is desired to replace the expensive Ni-base alloys with conventional heat resistant steels in these regions of the steam turbine rotor that are operating below ~500-550°C. Since a welded rotor design is favoured, dissimilar metal weldments are required.

The presented research work is aimed at the development of thermo-mechanical lifetime assessment methodologies for the evaluation of 700°C steam turbine components involving the formulation of advanced constitutive deformation and damage model equations. The first main objective was the development and verification of the effectiveness of advanced creep-fatigue lifetime assessment methodologies and determination of the required material input parameters for the accurate and reliable evaluation of Alloy 617 steam turbine rotor features at maximum application temperatures. To achieve the appointed objectives an extensive material testing campaign was required. For the characterisation of the material behaviour under static loading conditions creep rupture experiments for medium and target application temperatures have been conducted in order to investigate the influence of ageing treatment of Alloy 617. Taking into account material property data from previous research activity a constitutive creep deformation equation was developed on the basis of a modified Graham-Walles law, which well represents the mean creep behaviour of the investigated and reviewed Alloy 617 heats. In order to determine the time-independent plastic flow as well as the fatigue endurance characteristics, continuous cycling LCF experiments have been performed for the entire temperature range. On this basis a constitutive plasticity model of Chaboche type have been developed, which accurately describes the observed material response under cyclic loading. Furthermore cyclic/hold experiments have been conducted on Alloy 617 in order to investigate the occurring creep-fatigue damage mechanism and to determine the CF endurance characteristics. Thereby a modification on the creep law was introduced for description of the materials decreased creep resistance under combined creep-fatigue loading. For the assessment of creep and fatigue damage fractions a very promising approach considering plastic and creep dissipated energy as failure criterion was developed. The effectiveness of this energy exhaustion method was verified with the calculation of endurance curves for continuous cycling LCF and cyclic/hold conditions over a broad range of temperatures, strain ranges and hold periods. The effectiveness of the developed constitutive deformation model was further verified on a service-type TMF experiment, which cycle definition was determined from a life-limiting location in a 700°C high-pressure steam turbine rotor under realistic loading conditions while featuring significantly different strain ranges within an anisothermal cycle. The developed creep-fatigue lifetime assessment methodology for Alloy 617 was verified with the help of post test microstructural investigations, where the accordant damage appearances could reliably be represented.

For further characterization of Alloy 617 and accordant verification of applicability of the material in future steam turbine technology, with particular respect to the planned long-term operation in steam turbine rotors, additional creep-rupture experiments are necessary for a reliable creep rupture strength prediction. Additionally creep-fatigue experiments, preferably also thermomechanical experiments, with representative strain ranges and sufficiently long hold durations are to be performed to further investigate the apparent creep-fatigue damage mechanism. The post-test metallographic investigation on the TMF test conducted within the present work have revealed, despite the comparable large strain range of the experiment, extensive creep damage development under the imposed thermomechanical cycle.

The second main objective of the present research work was the identification of the maximum application temperatures of dissimilar metal welded joints between the Ni-base Alloy 617 and a 1% CrMoV low alloy bainitic rotor steel as well as a higher alloyed 10% Cr martensitic rotor steel, with respect to their creep rupture and fatigue properties. A testing procedure for the static creep and cyclic testing of the DMW joints was developed and a extensive testing campaign was conducted comprising creep rupture, continuous cycling LCF as well as CF cyclic/hold experiments for target temperatures defined on experience with accordant similar metal weldments. Based on the experimental results the fatigue and creep-fatigue endurance characteristics have been determined and corresponding models have been developed for their description. Accordingly the creep rupture strength curves have been determined, whereas CR strength extrapolation were only possible to maximum rupture times of 30 kh, due to the limited test duration of available DMW joint creep data. On this basis information could be obtained on the maximum achievable application temperatures of the investigated DMW joints. Post-test metallographic investigations revealed Type IV creep damage in the FGHAZ of the steels, which constitutes the main creep failure observed during creep loading of similar metal weldments. Additionally fusion line cracking associated with a Type I precipitate condition at the interface between Alloy 617 weld metal and the steel HAZ was observed in the investigated Alloy 617 - 1% CrMoV and Alloy 617 - 10% Cr DMW joints. Whereas the Type I carbide layer was apparent in Alloy 617 - 1% CrMoV DMW joint specimens even after short duration high temperature exposure, the situation was not clearly visible within the Alloy 617 - 10% Cr DMW joint. One major reason for the development of these Type I precipitates are the cross fusion line chemical composition gradients, mainly for the constituents C and Cr, which are obviously larger for the low alloyed 1% CrMoV steel compared to the 10% Cr steel with respect to the chemical composition of Alloy 617. For long-term creep loading conditions, representative of service condition existing in steam turbine rotors, the predominant failure mechanism for both DMW joints appeared to be FL cracking associated with the Type I precipitate condition. Since additional element diffusion is to be expected during long-term high temperature exposure, the experimental verification of long-term creep rupture strength is absolutely essential in order to guarantee the safe operation of the dissimilar metal weldments under service conditions. Additionally it should be noted that the presented experimental results have been obtained by uniaxial loaded cross-weld specimens with relatively small cross-sections that have been extracted from the weldments. On the one hand possible welding residual stresses have been reduced by the cutting out of the specimens and on the other hand no experience has been obtained on the effect of multiaxial stress states on the creep behaviour of the investigated DMW joints.

Zusammenfassung

Für die Steigerung des thermischen Wirkungsgrades sowie die Senkung des Rohstoffverbrauches zielen aktuelle Entwicklungen von fortschrittlicher Dampfturbinentechnologie auf Dampfeintrittstemperaturen von über 700°C und entsprechenden Dampfeintrittsdrücken von über 350 bar ab. Diese Temperaturbereiche sind für herkömmliche hochwarmfeste Stähle nicht erreichbar, weswegen der Einsatz der sehr viel teureren Nickel- bzw. Kobaltbasislegierungen notwendig wird. In vorangegangenen Europäischen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zwischen Herstellern von Kraftwerkstechnik, Lieferanten von Schmiedeteilen sowie Forschungseinrichtungen konnten geeignete Nickelbasislegierungen für den Einsatz als schmiedbare Rotorwerkstoffe für Hochdruckdampfturbinen identifiziert werden. Diese Aktivitäten beinhalteten auch die Entwicklung von Schweissverfahren für Verbindungen zwischen den Nickelbasislegierungen und herkömmlichen hochwarmfesten niedrig- und hochlegierten ferritischen Stählen. Aus ökonomischen Gründen wird ein Ersatz der teuren Nickelbasislegierungen durch konventionelle hochwarmfeste Stähle in Bereichen der Dampfturbinenrotoren angestrebt, deren Temperaturen im Betrieb ~500-550°C nicht überschreiten. Da eine geschweisste Ausführung bevorzugt wird, sind artungleiche Schweissverbindungen notwendig.

Das vorliegende Forschungsvorhaben zielt auf die Entwicklung von Methoden für die thermomechanische Lebensdauerabschätzung von 700°C Dampfturbinenkomponenten ab und beinhaltet die Formulierung von fortschrittlichen konstitutiven Deformations- und Schädigungsgleichungen. Die erste Zielsetzung der vorliegenden Arbeit beinhaltet die Entwicklung und Verifikation der Anwendbarkeit von Methoden der Kriechermüdungslebensdauerabschätzung sowie die Ermittlung der benötigten Werkstoffparameter für die zuverlässige Beurteilung von Dampfturbinenrotoren aus der Nickelbasislegierung Alloy 617 unter maximalen Einsatztemperaturen. Für die Erfüllung der Forschungsziele war eine umfangreiche Prüfkampagne durchzuführen. Für die Charakterisierung des Werkstoffverhaltens unter statischer Beanspruchung wurden Kriechexperimente unter mittleren sowie maximalen Einsatztemperaturen durchgeführt, um den Einfluss von Glühbehandlungen von Alloy 617 zu untersuchen. Unter Berücksichtigung von Werkstoffdaten aus früheren Forschungsvorhaben konnte eine konstitutive Kriechverformungsgleichung auf der Basis einer modifizierten Graham-Walles-Gleichung entwickelt werden, welche das mittlere Kriechverhalten der untersuchten sowie überprüften Alloy 617 Chargen sehr gut beschreibt. Für die Bestimmung des zeitunabhängigen

plastischen Fliessverhaltens und der Ermüdungsfestigkeit wurden für den gesamten Temperaturbereich LCF-Experimente ohne Haltezeit durchgeführt. Anschliessend wurde ein konstitutives Plastizitätsmodell nach Chaboche entwickelt und an die Messergebnisse angepasst, welches die ermittelte Werkstoffantwort unter zyklischer Beanspruchung sehr zufriedenstellend beschreibt. Darüberhinaus wurden für Alloy 617 LCF-Experimente mit Haltezeit durchgeführt, um die auftretenden Schädigungsmechanismen sowie die erträglichen Schwingspielzahlen unter Kriechermüdung zu untersuchen. Für die Beschreibung der auftretenden Verringerung der Kriechfestigkeit unter kombinierter Kriechermüdungsbeanspruchung von Alloy 617 wurde eine Modifikation der Kriechgleichung eingeführt. Ein sehr vielversprechender Ansatz für die Bestimmung der Kriech- und Ermüdungsschadensanteile unter Berücksichtigung der dissipierten Energien wurde entwickelt. Die Effektivität dieses Energieerschöpfungsverfahrens wurde anhand der Ermüdungskurven von LCF-Experimenten ohne sowie mit verschiedenen Haltezeiten in einem breiten Temperaturbereich verifiziert. Darüberhinaus konnte das entwickelte konstitutive Verformungsmodell anhand eines betriebsähnlichen TMF-Experimentes verifiziert werden. Der Beanspruchungszyklus des TMF-Experimentes wurde bestimmt durch die errechneten Belastungen an einer Lebensdauer begrenzenden Position eines 700°C Hochdruckdampfturbinenrotors unter realistischen Betriebsbeanspruchungen. Das entwickelte Verfahren zur Bestimmung der Kriechermüdungslebensdauer für Alloy 617 wurde anhand von mikrostrukturellen Untersuchungen geprüfter Proben verifiziert, wobei die aufgetretenen Schädigungsbilder verlässlich repräsentiert werden konnten.

Für eine erweiterte Beschreibung des Werkstoffverhaltens und Verifizierung der Anwendbarkeit von Alloy 617 in zukünftigen Dampfturbinentechnologien sind zusätzliche Kriechexperimente für eine zuverlässige Voraussage der Kriechfestigkeit notwendig, was besonders für die geplanten Einsatzzeiten für Dampfturbinenrotoren gilt. Weitere Kriechermüdungsexperimente, bevorzugt auch anisotherme TMF-Experimente, mit repräsentativen Dehnungsschwingbreiten und ausreichend langen Haltezeiten sollten durchgeführt werden, um den auftretenden Schadensmechanismus unter Kriechermüdung noch eingehender zu untersuchen. Die mikrostrukturellen Untersuchungen der TMF-Probe der vorliegenden Arbeit zeigten eine erhebliche Kriechschädigung für den beaufschlagten thermomechanischen Zyklus mit vergleichbar grosser Dehnschwingbreite.

Die zweite Zielstellung der vorliegenden Forschungsarbeit war die Bestimmung der maximalen Einsatztemperaturen von artungleichen Schweissverbindungen zwischen der Nickelbasislegierung Alloy 617 und einem niedriglegierten bainitischen 1% CrMoV-Stahl sowie einem hochlegierten martensitischen 10% Cr-Stahl, in Bezug auf deren Kriech- und Ermüdungsfestigkeiten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Testverfahren für Kriech- sowie LCF-Experimente von artungleichen Schweissverbindungen (DMW) entwickelt und ein umfangreiches Testprogramm durchgeführt, welches LCF-Experimente mit und ohne Haltezeit sowie Kriechexperimente für Zieltemperaturen beinhaltete, welche basierend auf Erfahrungen mit vergleichbaren artgleichen Schweissverbindungen festgelegt wurden. Mithilfe der experimentellen Ergebnisse konnten die Ermüdungs- und Kriechermüdungsfestigkeiten der DMW bestimmt werden. Entsprechend konnten für beide Schweissverbindungen die Kriechfestigkeiten bestimmt werden, wobei Extrapolationen aufgrund begrenzter experimenteller Prüfzeiten nur bis zu Kriechbruchzeiten von 30 kh möglich waren. Basierend auf den ermittelten Kriech- und Kriechermüdungsergebnissen konnten für die untersuchten artungleichen Schweissverbindungen die maximal möglichen Einsatztemperaturen festgelegt werden. Mikrostrukturelle Untersuchungen der DMW zeigten Kriechschädigung vom Typ IV in der FGHAZ der Stähle, was auch für das hauptsächliche Kriechversagen von artgleichen Schweissverbindungen verantwortlich ist. Zusätzlich wurde Kriechbruch an der Schmelzlinie beobachtet, welcher mit Typ I Ausscheidungen an der Grenzfläche zwischen Alloy 617 Schweissgut und der Wärmeeinflusszone der Stähle in Verbindung gebracht werden konnte. Während die Typ I Karbidschicht bei Proben der Alloy 617 - 1% CrMoV DMW schon bei kurzen Einsätzen unter hohen Temperaturen deutlich sichtbar war, konnte dies für die Alloy 617 - 10% Cr DMW nicht bestätigt werden. Einer der Haupteinflussfaktoren für die Bildung der Typ I Ausscheidungen ist der Gradient der chemischen Elementzusammensetzungen entlang der Schmelzlinie, wobei im wesentlichen C und Cr von Interesse sind. Dieser Gradient ist für den 1% CrMoV-Stahl klar grösser als für den 10% Cr-Stahl im Vergleich zu Alloy 617. Unter Langzeitkriechbeanspruchung der Schweissverbindungen, welche charakteristisch für den Betriebseinsatz von Dampfturbinenrotoren ist, kann der vorherrschende Schadensmechanismus der DMW als Kriechbruch entlang der Schmelzlinie, hervorgerufen durch die Typ I Ausscheidungen, angenommen werden. Da während der Langzeitbeanspruchung zusätzliche Elementdiffusionen erwartet werden können, stellt die Verifikation der Kriechfestigkeit der DMW eine essentielle Notwendigkeit für deren sicheren Betrieb in Dampfturbinenkomponenten dar. Darüberhinaus sollte erwähnt werden, dass die experimentellen Ergebnisse für einachsig beanspruchte Proben mit relativ kleinen Probenquerschnitten erzeugt wurden. Während auf der einen Seite mögliche Schweisseigenspannungen durch die Entnahme der Proben aus der Schweissnaht verringert wurden, konnten zu den untersuchten artungleichen Schweissverbindungen keinerlei Erkenntnisse zum Einfluss von mehrachsigen Spannungszuständen gewonnen werden.