



Doctoral Thesis

## Characterisation and modelling of the microstructural and mechanical evolution of a steam turbine rotor steel

**Author(s):**

Mayer, Thomas

**Publication Date:**

2012

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007593785> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 20752

# Characterisation and Modelling of the Microstructural and Mechanical Evolution of a Steam Turbine Rotor Steel

*Dissertation submitted to*  
ETH Zurich

*for the degree of*  
Doctor of Sciences

*presented by*  
THOMAS MAYER

MSc ETH ME  
born on June 5, 1983  
citizen of the Principality of Liechtenstein

*accepted on the recommendation of*  
Prof. Dr. Edoardo Mazza, examiner  
Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Christ, co-examiner  
Dr. Stuart R. Holdsworth, co-examiner

2012

## Summary

An effective mechanical analysis of steam turbine parts is not only required for the reliable and safe use of newly built steam turbines, but also for the remaining life assessment of components that have been exposed to service duty over long periods. Low cycle fatigue (LCF) represents an important damage mechanism in steam turbine rotors. There, it is caused by strains that arise due to restricted expansion as a result of thermal transients during the start-up and shut-down phases of operation. This cyclic plastic deformation causes the rearrangement of dislocations in the microstructure of the steels used for such rotor applications which is commonly accompanied by a significant evolution of their mechanical elastic-plastic properties. Further complexity is added by the fact that this cyclically evolving behaviour is strongly dependent on temperature, strain rate and amplitude. In order to predict the structural response of a steam turbine rotor subjected to complex service loading, engineers need accurate and reliable constitutive material models at hand. While such models need to appropriately represent the experimentally determined material characteristic, they further need to consistently predict the mechanical behaviour at conditions other than experimentally covered. In the absence of a sound physical basis, purely phenomenological models can generally not fulfil this requirement satisfactorily.

This Thesis aims to develop a physically motivated evolutionary constitutive model for a low-alloy bainitic 2CrMoNiWV (23CrMoNiWV8-8) steam turbine rotor steel. A comprehensive experimental characterisation is performed of the mechanical and microstructural evolution of 2CrMoNiWV as subjected to LCF deformation at elevated temperatures, at different strain rates and strain amplitudes. This research project is co-funded by the Swiss Competence Centre for Materials Science and Technology CCMX and ABB Turbochargers, ALSTOM Power and Swissnuclear in collaboration with the Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology Empa, the Swiss Federal Institute of Technology ETH Zurich and the Paul Scherrer Institute PSI.

Symmetric, strain controlled LCF experiments on 2CrMoNiWV have been carried out in the Laboratory of the High Temperature Integrity Group at Empa. These include mechanical tests in the temperature range between 20°C to 600°C at strain rates of 0.001%/s to 1.0%/s and strain amplitudes of  $\pm 0.25\%$  to  $\pm 1.0\%$ . The LCF experiments comprehensively characterise the temperature, strain rate and strain amplitude dependent cyclic softening elastic-plastic behaviour of 2CrMoNiWV. Both complete single-specimen endurance tests and interrupted multi-specimen tests have been performed. The latter have been used as a source of samples for the quantitative characterisation of the microstructural evolution of the material in order to gain a better understanding for the origin of the observed cyclic softening.

Different techniques have been applied for this microstructural characterisation, including electron microscopic techniques and neutron diffraction line profile analysis. The main focus is thereby laid on the quantification of the dislocation density and subgrain size evolution as well as on the identification of the carbide structure in 2CrMoNiWV. Neutron diffraction line profile analysis has revealed that LCF loading of the bainitic steel leads to a

reduction of the dislocation density from an initial high level of  $8.9 \cdot 10^{14} \text{m}^{-2}$  which is accompanied by the growth of subgrains from an initial diameter of  $\sim 150 \text{nm}$ . These results are strongly supported by evidence gained from (scanning) transmission electron microscopic (STEM) observations. Direct observation of the dislocation substructure with STEM has further shown that the initially strongly tangled dislocation structure develops towards an increasingly well-defined and growing subgrain structure with relatively dislocation free interiors and dislocation rich boundaries. Such a microstructure has been reported in the literature to introduce significant internal stresses that determine the local yield stresses in the material. Investigations of the carbide structure in the as-received and the as-fatigued condition of 2CrMoNiWV resulted in the identification and characterisation of the present carbide types. This is not indicated to change even after long-term LCF exposure at elevated temperatures. The cyclic softening behaviour of 2CrMoNiWV is thus mainly a result of the transition of the strength determining mechanism from dislocation to subgrain dominant strengthening.

On the basis of this experimental evidence, a constitutive model is formulated that considers the findings of the mechanical and microstructural characterisation. For this purpose, a continuous Masing-approach is adopted which not only assumes a discrete yield point as the classical plasticity models but a distribution of yield stresses or strains. This yield stress/strain distribution reflects the presence of internal stresses that arise due to the heterogeneous dislocation microstructure and which are responsible for variations of the local yield stresses on a mesoscale. The suggested formulation uses a Cauchy-type yield strain distribution that allows the derivation of an analytical stress-strain relationship which is fully determined by only four physically meaningful parameters. It is shown that the constitutive model represents the experimentally observed elastic-plastic behaviour of 2CrMoNiWV very well. Especially, it allows reproduction of the continuous transition between the elastic and plastic regimes as well as the nonlinear strain hardening characteristic for the monotonic uniaxial case. The model is further modified to cover the monotonic temperature and strain rate dependent strain hardening characteristic of 2CrMoNiWV on the basis of a restricted number of experiments. Benchmark experiments at lower and higher temperatures verify the excellent predictive capabilities of this model beyond the restricted experimentally covered regime. An evolutionary formulation of the model is further developed that reproduces very well the strain amplitude dependent mechanical evolution of 2CrMoNiWV when subjected to LCF loading at different constant strain amplitudes but equal temperature and strain rate. The simulation of benchmark experiments introducing increasing or decreasing strain amplitude steps into the LCF deformation history provide promising results. It is further an important finding of this Thesis that there exists a strong correlation between three of the model parameters and the actual evolution of the subgrain size and dislocation density. This underpins the physical basis of the modelling approach which is founded on the consideration of internal stresses and it enables a straight-forward identification of the model parameters.

## Zusammenfassung

Das Ziel der mechanischen Auslegung von Dampfturbinen beinhaltet sowohl die Gewährleistung des zuverlässigen und sicheren Betriebs neuer Anlagen als auch die Einschätzung der Restlebensdauer von Turbinenkomponenten nach längeren Betriebsperioden. Plastische Ermüdung (LCF – low cycle fatigue) stellt dabei einen wichtigen Schadensmechanismus für Dampfturbinen Rotoren dar. Diese wird durch Dehnungen verursacht, welche als Resultat eingeschränkter Ausdehnung während der thermisch transienten Anfahr- und Abschaltvorgänge entstehen. Diese zyklische plastische Verformung bewirkt die Neuordnung von Versetzungen in der Mikrostruktur von Rotorstählen, welche gewöhnlich von einer signifikanten zyklischen Entwicklung der elastisch-plastischen Eigenschaften begleitet wird. Die starke Abhängigkeit dieser zyklischen Evolution von Temperatur, Dehnrate und Dehnungsamplitude erschwert deren Beschreibung zusätzlich. Um die mechanische Strukturantwort eines Dampfturbinen Rotors unter komplexer Betriebsbelastung vorherzusagen, benötigen Ingenieure genaue und verlässliche konstitutive Materialmodelle. Diese sollen nicht nur das experimentell bestimmte Materialverhalten beschreiben, sondern müssen auch eine konsistente Vorhersage des Materialverhaltens ausserhalb des experimentell abgedeckten Bereichs ermöglichen. Rein phänomenologische Modelle können diese Anforderung aufgrund mangelnder physikalischer Grundlage nicht zufriedenstellend erfüllen.

Diese Doktorarbeit verfolgt das Ziel, ein physikalisch motiviertes evolutionäres konstitutives Materialmodell für einen niedriglegierten bainitischen 2CrMoNiWV (23CrMoNiWV8-8) Dampfturbinen Rotorstahl zu entwickeln. Zu diesem Zweck wurde eine umfassende experimentelle Charakterisierung der mechanischen und mikrostrukturellen Entwicklung von LCF verformtem 2CrMoNiWV Stahl unter Berücksichtigung erhöhter Temperatur sowie verschiedener Dehnraten und Dehnungsamplituden durchgeführt. Diese Forschungsarbeit ist kofinanziert von dem Swiss Competence Centre for Materials Science and Technology CCMX und ABB Turbochargers, ALSTOM Power und Swissnuclear in Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa, der Eidgenössischen Technischen Hochschule ETH Zürich und dem Paul Scherrer Institut PSI.

Symmetrische, dehnungsgeregelte LCF Versuche wurden an 2CrMoNiWV im Labor der High Temperature Integrity Gruppe der Empa durchgeführt. Diese beinhalten Versuche im Temperaturbereich zwischen 20°C und 600°C, bei Dehnraten zwischen 0.001%/s und 1.0%/s sowie Dehnungsamplituden von  $\pm 0.25\%$  bis  $\pm 1.0\%$ , welche eine umfassende Charakterisierung des von Temperatur, Dehnraten und Dehnungsamplituden abhängigen zyklisch entfestigenden Materialverhaltens darstellen. Dabei wurden sowohl vollständige Lebensdauerexperimente an einzelnen Proben als auch unterbrochene Versuche an mehreren Proben durchgeführt. Letztere wurden für die Charakterisierung der mikrostrukturellen Entwicklung verwendet, um ein besseres Verständnis für den Ursprung des zyklisch entfestigenden Verhaltens zu entwickeln.

Unterschiedliche Methoden wie Elektronenmikroskopie und Neutronendiffraktions-Linienprofil-Analyse (DLPA – diffraction line profile analysis) wurden für die quantitative Charakterisierung der mikrostrukturellen Entwicklung verwendet. Der Fokus wurde dabei auf die quantitative Bestimmung der Versetzungsdichte und Subkorngrösse sowie die Identifizierung der Karbidstruktur in 2CrMoNiWV gelegt. Die Neutronen DLPA hat gezeigt, dass die plastische Ermüdung in 2CrMoNiWV zu einer Verringerung der Versetzungsdichte von anfänglich  $8.9 \cdot 10^{14} \text{m}^{-2}$  führt und einhergeht mit einem Subkornwachstum von einem ursprünglichen Durchmesser von  $\sim 150 \text{nm}$ . Die Ergebnisse dieser Analyse werden gestützt durch Untersuchungen mit dem (Raster-) Transmissions Elektronen Mikroskop (STEM). Eine direkte Beobachtung der Versetzungsstruktur mit STEM hat weiter gezeigt, dass sich die anfänglich stark verworrenen Versetzungen zu einer zunehmend definierten und wachsenden Subkornstruktur anordnen, welche ein relativ versetzungsfreies Inneres und versetzungsreiche Subkorn Grenzen besitzen. Dieser Substruktur werden in der Literatur ausgeprägte innere Spannungen zugeschrieben, welche die lokalen Fließspannungen des Materials bestimmen. Untersuchungen der Karbidstruktur im ursprünglichen und ermüdeten Zustand von 2CrMoNiWV haben des Weiteren eine Identifikation und Charakterisierung der verschiedenen Karbidtypen ermöglicht. Dabei wurden keine Anzeichen beobachtet, welche auf eine Evolution der Karbidstruktur aufgrund zyklischer Ermüdung bei erhöhter Temperatur hinweisen. Die Schlussfolgerung liegt deshalb nahe, dass das zyklisch entfestigende Verhalten von 2CrMoNiWV hauptsächlich eine Folge des Übergangs von einem versetzungs- zu einem subkorn dominierten Deformationsmechanismus ist.

Auf der Basis dieser experimentellen Resultate wurde ein konstitutives Materialmodell formuliert, welches die Erkenntnisse der mechanischen und mikrostrukturellen Charakterisierung berücksichtigt. Zu diesem Zweck wurde ein kontinuierlicher Masing-Ansatz gewählt, welcher im Gegensatz zu klassischen Plastizitätsmodellen eine Verteilung von Fließspannungen oder -dehnungen annimmt. Diese Verteilung von Fließspannungen/-dehnungen widerspiegelt das Vorhandensein von inneren Spannungen, welche einer Subkornstruktur inhärent sind und welche verantwortlich sind für die Variation der lokalen Fließspannungen auf mesoskopischer Ebene. Die vorgeschlagene konstitutive Formulierung sieht eine Cauchy-Verteilung als Fließdehnungsverteilung vor und ermöglicht die Herleitung einer analytischen Spannungs-Dehnungs-Beziehung, welche vollständig durch vier physikalisch interpretierbare Parameter definiert ist. Ein Vergleich der Modellantwort mit dem experimentell beobachteten nichtlinearen elastisch-plastischen Verhalten zeigt eine hervorragende Übereinstimmung für den monotonen uniaxialen Lastfall. Insbesondere vermag das Modell den experimentell beobachteten kontinuierlichen Übergang zwischen elastischem und plastischem Verhalten wiederzugeben. Eine Modifikation des Modells erlaubt im Weiteren die temperatur- und dehnratenabhängige Beschreibung des monotonen Verformungsverhaltens von 2CrMoNiWV auf der Basis einer beschränkten Anzahl von Experimenten. Vergleichstests bei tieferen und höheren Temperaturen beweisen die Fähigkeit des vorgeschlagenen Modells, über den experimentell abgedeckten Bereich hinaus zu extrapolieren. Des Weiteren wurde eine evolutionäre Modellformulierung entwickelt, welche die mechanische Evolution von ermüdungsverformtem 2CrMoNiWV in Abhängigkeit der Dehnungsamplitude bei gleicher Temperatur und Dehnrate sehr gut wiedergibt. Die Simulation von und der Vergleich mit Vergleichsversuchen, welche Stufen zunehmender oder abnehmender Dehnungsamplituden während der LCF Belastung vorsehen, liefern vielversprechende Ergebnisse. Ein weiteres wichtiges Resultat dieser Arbeit stellt die

signifikante Korrelation zwischen drei der Modellparameter und der gemessenen Subkorngrösse sowie Versetzungsdichte dar. Dieses Ergebnis unterstreicht einerseits die physikalische Basis des Modellansatzes, welcher auf der Berücksichtigung der inneren Spannungen gründet und es zeigt andererseits den Grund für die einfache Identifikation der Modell Parameter.