

Diss. ETH No. 21286

Prediction of Long Time Creep Rupture Properties of Welded Joints Using the Results of Short Duration Creep Crack Incubation Tests

A dissertation submitted to the
ETH Zurich

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
EHSAN HOSSEINI
MSc in Materials Engineering,
Sharif University of Technology, Tehran

born 2 May 1985
citizen of Iran

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. E. Mazza, examiner
Dr. S.R. Holdsworth, coexaminer
Prof. Dr. R. Hurst, coexaminer

2013

Abstract

The aim of this research project is to examine the applicability of the LICON methodology for predicting the long-time creep rupture strength of a dissimilar metal weld.

The LICON methodology is an approach for predicting the lifetime of materials under creep loading conditions. The LICON method predicts long-time uniaxial creep strength using the results from several short duration creep crack incubation tests in conjunction with the outcome of a mechanical analysis on the testpiece (e.g. a reference stress solution). In the late 1990s, this method was successfully applied to advanced 9%Cr pipe steels (including their welded joints) and later, reports on applicability of the method for a high creep strength 1CrMoV were published.

This study has re-examined the previous application of the LICON methodology for 9%Cr and 1CrMoV steels. It has shown that application of the original LICON method (based on reference stress solutions) for certain materials is not appropriate. Application of reference stress solutions is limited to materials which achieve complete stress redistribution before the onset of crack extension (e.g. for advanced 9%Cr pipe steels). For 'non-reference stress' materials (creep brittle, notch sensitive materials such as high creep strength 1CrMoV) crack initiation occurs before complete stress redistribution. Application of the original LICON method (based on reference stress solutions) for such materials is therefore not recommended. This study has shown that application of the LICON method to 'non-reference stress' materials requires careful adoption of a more sophisticated mechanical analysis approach (e.g. finite element method).

Careful examination has shown that the creep finite element analysis of a structure can result in non-unique numerical representations if the assessment procedure has not been carefully defined. In particular, this study has highlighted the importance of considering a reliable stress regime dependent creep constitutive model for analysis of structures with a wide range of redistributing stresses. This study introduced a new (primary-secondary-tertiary)

creep constitutive model which considers a gradual change of creep deformation/damage accumulation mechanisms with stress variation. Application of the new constitutive model in finite element continuum damage mechanics could successfully reproduce creep deformation and damage accumulation in a series of creep crack incubation tests. The creep damage development formulation of the introduced constitutive model has been constructed based on the LICON concept and its successful demonstration was a new confirmation for the LICON concept, and from a new point of view, i.e. finite element continuum damage mechanics.

From the gathered experience with application of the LICON method to high creep strength 1CrMoV, this study has proposed a procedure for consideration of finite element analysis in the LICON method when it is to be applied for 'non-reference stress' materials. It has also been shown that although the newly proposed procedure was developed for application to 'non-reference stress' materials, it is equally applicable for 'reference stress' materials.

As the last part of this study, application of the LICON method for a dissimilar metal weld has been examined. The investigated material is part of an existing weldment of 1CrMoV and Alloy 625 with filler metal of Alloy 617 which had been a candidate to use for rotor constructions in new advanced power plants, i.e. AD700 power plants. A set of experiments including uniaxial creep, multiaxial creep crack incubation and uniaxial tensile tests and also microstructure examinations were conducted to generate the required information for examination of the LICON method application for this joint. Mechanical analysis of the creep crack incubation tests showed that the material did not achieve complete stress redistribution before the start of crack extension and hence, this joint can be regarded as a 'non-reference stress' material. Application of the LICON method to this joint therefore followed the newly proposed procedure and used finite element analysis for the mechanical analysis part of the approach. It has also been shown that the LICON method formulation for application to predict the creep rupture behaviour of uniaxially testpieces of dissimilar metal welds requires further development. The original LICON method formulas consider a homogeneous uniaxial stress state within a loaded uniaxial testpiece. This assumption is reasonable for homogeneous materials, for a dissimilar metal weld however, the different inelastic (creep) deformation behaviour of different sections (i.e. base material, heat affected zone and weld material) generates a non-uniform multiaxial stress state within the loaded uniaxial testpiece.

This study therefore proposed a new development for the LICON approach which uses finite element analysis to account for the generated multiaxial stress states within weld uniaxial testpieces. Application of the developed approach for predicting uniaxial creep rupture behaviour of the investigated joint showed an acceptable agreement with experimental observations which was not achievable without introducing the new development.

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Anwendbarkeit der LICON Methode, zur prognostizierung der langzeit Kriechbruchfestigkeit von gemischten Metall-Verschweissungen, zu überprüfen. Die LICON Methode ist ein Verfahren zum prognostizieren der Lebensdauer von Materialien unter Kriechlast. Die Methode berechnet die Langzeit-Kriechbruchfestigkeit unter Verwendung mehrerer kurzzeit Kriech-Inkubationstests im Zusammenhang mit den Resultaten einer mechanischen Analyse des Probekörpers (z.B. eine Referenzspannungs-Lösung). Ende des 20. Jahrhunderts wurde diese Methode erfolgreich an fortschrittlichem 9%Cr Rohr Stahl (inklusive Schweißverbindung) angewandt. Später wurden Berichte zur Anwendbarkeit der Methode an 1CrMoV Stählen mit hoher Kriechbruchfestigkeit veröffentlicht.

Diese Arbeit prüfte die vorherige Anwendung der LICON Methode für 9%Cr und 1CrMoV Stahl nach. Es wurde gezeigt, dass die Anwendung der originalen LICON Methode (basierend auf Referenzspannungs-Lösungen) für gewisse Materialien nicht geeignet ist. Die Anwendbarkeit von Referenzspannungs-Lösungen ist auf Materialien beschränkt, welche vor Beginn der Rissausbreitung eine komplette Spannungsneuverteilung erlangen (z.B. fortgeschrittene 9%Cr Rohrstähe). Für nicht Referenzspannungsmaterialien (kriechspröd, kerbsensitive Materialien wie 1CrMoV) beginnt die Rissinitiation bevor der Neuverteilung der Spannungen. Die Anwendung der originalen LICON Methode (basierend auf nicht Referenzspannungslösungen) wird für solche Materialien nicht empfohlen. Diese Arbeit hat gezeigt, dass die Anwendungen der LICON Methode für nicht Referenzspannungsmaterialien eine anspruchsvollere mechanische Analyse benötigt (z.B. Finite Element Methode).

Vorsichtige Untersuchungen haben gezeigt, dass Finite-Element-Kriechanalysen einer Struktur in nicht singulären numerischen Repräsentationen enden können, falls das Beurteilungsverfahren nicht richtig definiert wurde. Diese Studie hat hervorgehoben, wie wichtig die Berücksichtigung eines zuverlässigen spannungsabhängigen konstitutiven Kriechmodells für die Analyse von Strukturen ist. In dieser Arbeit wird ein neues (primäres-sekundäres-tertiäres) konstitutives Kriechmodell eingeführt, welches die stufenweise Änderung von Kriechdeformation/Schadensakkumulationsmechanismen unter variierender Spannungen berücksichtigt. Durch Anwendung des neuen konstitutiven Modells in der Finite-Element-Kontinuumsschädigungsmechanik konnte die Kriechdeformation und Schade-

nakkumulation in Kriechriss-Inkubationstests reproduziert werden. Die Formulierung der Kriechschädigung des vorgestellten konstitutiven Modells basiert auf dem LICON Konzept und die erfolgreiche Anwendung ist eine neue Bestätigung der Funktionalität der LICON Methodik.

Mit der gesammelten Erfahrung aus der Anwendung der LICON Methode an 1CrMoV Stahl mit hoher Kriechfestigkeit, präsentiert diese Arbeit eine Vorgehensweise für die Finite-Element-Analyse mit der LICON Methode an Materialien welche nicht der Referenzspannung unterliegen. Obwohl dieses Verfahren für die Anwendung an nicht Referenzspannungsmaterialien entwickelt wurde, wurde unter anderem gezeigt, dass es ebenso anwendbar ist auf Referenzspannungsmaterialien.

Zum Abschluss dieser Arbeit wurde die Anwendung der LICON Methode an einer gemischten Metall-Verschweissung untersucht. Das beschriebene Material ist Teil einer bestehenden Verschweissung aus 1CrMoV und der Legierung 625 mit Füllmaterial aus der Legierung 617. Die Anwendung der Legierung 617 wurde für Rotorstrukturen in hochentwickelten Kraftwerken (z.B. AD700 Kraftwerke) in Erwägung gezogen. Zur Untersuchung der LICON Methode an dieser Schweissverbindung wurden uniaxial Kriechversuche, multiaxiale Kriechriss-Inkubationstests und uniaxial Zugversuche durchgeführt. Zudem wurden mikrostrukturelle Untersuchungen durchgeführt. Mechanische Analysen der Kriechriss-Inkubationstests haben gezeigt, dass das Material keine vollständige Spannungsneuverteilung vor Beginn der Rissausbreitung erreichte. Daher kann diese Verschweissung als nicht Referenzspannungsmaterial betrachtet werden. Die Anwendung der LICON Methode folgte daher der vorgeschlagenen Prozedur und nutze die Finite-Element-Methode für den mechanischen Teil der Analyse. Weiter wurde gezeigt, dass die Formulierung der LICON Methode zur Voraussage des Kriechbruchverhaltens von uniaxial Schweissproben weitere Entwicklung benötigt. Die Gleichungen der originalen LICON Methode berücksichtigen einen homogenen uniaxialen Spannungszustand mit einer belasteten uniaxialen Probe. Diese Annahme ist sinnvoll für homogene Materialien. Allerdings generiert das unterschiedliche inelastische (Kriechen) Deformationsverhalten der verschiedenen Sektoren (z.B. Basismaterial, Wärmeeinflusszone, und Schweissmaterial) einen nicht uniformen multiaxialen Spannungszustand in den belasteten, gemischten uniaxialen Schweissnahtproben.

Diese Arbeit schlägt daher eine Neuentwicklung der LICON Methode vor, welche die Finite-Element-Methode benutzt um den erzeugten multiaxialen Spannungszustand anzurechnen. Die Anwendung des entwickelten Verfahrens, zur Vorhersage vom uniaxialem Kriechrissverhalten der untersuchten Schweissnaht, zeigte eine akzeptable Übereinstimmung mit experimentellen Beobachtungen. Diese Übereinstimmung hätte ohne die Neuentwicklung nicht erfolgt.