

Fatigue fracture characterization
by the cyclic material force approach

Ermüdungsbruchcharakterisierung
durch den zyklischen materiellen Kraftansatz

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing)
an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
eingereichte

Dissertation

von
M. Sc. Jad Khodor
geboren am 08 September 1993 in Batroun

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
(Technische Universität Dresden)
Prof. Dr.-Ing. Hüsnü Dal
(Middle East Technical University)
Dr.-Ing. habil. Fadi Aldakheel
(Leibniz Universität Hannover)

Einreichung: 31. August 2022
Öffentliche Verteidigung: 25. Januar 2023

Summary

Fatigue failure of materials is one of the problems engineers face. The pioneering law characterizing fatigue crack growth is the PARIS law. The aforementioned law correlates the crack growth rate per cycle to the cyclic stress intensity factor. The stress intensity factor is only applicable to problems where the theory of linear elastic fracture mechanics is valid. Unfortunately, some structures may experience plasticity and viscous behavior. Therefore, the aim of the work at hand is to characterize fatigue crack growth in elastic-plastic and linear viscoelastic solids by cyclic material forces.

Firstly, a modified ESHELBY thought experiment is introduced to derive the cyclic material force acting on an inclusion. Moreover, the balance of cyclic energy momentum in elastic-plastic and linear viscoelastic solids is derived. The cyclic crack driving force or the cyclic global material force is obtained by a path-independent or domain-independent integral surrounding the crack tip. The path-independence of the cyclic material force approach is illustrated by numerical examples. Finally, the cyclic global material force is proven to be a fatigue crack growth criterion by validating it with experiments.

Furthermore, an additional approach is introduced to characterize the three stages of fatigue crack growth. The PARIS law only describes stable crack propagation at cyclic loading. The newly developed approach is based on degrading the fracture toughness in the GRIFFITH criterion. The fracture toughness is degraded by accumulating the norm of the cyclic crack driving force in a non-local method. A mesh sensitivity study is carried out proving the feasibility of the non-local accumulation. Moreover, the approach is able to depict the three stages of fatigue crack propagation. The fracture toughness degradation approach is combined with the cyclic material forces in elastic-plastic and linear viscoelastic solids and validated by experimental data.

The novelty of this thesis is the derivation of cyclic material forces in elastic-plastic and linear viscoelastic solids. An additional novelty is the development of a modified GRIFFITH criterion that is able to characterize the three stages of fatigue crack growth by cyclic material forces.

Zusammenfassung

Ermüdungsbruch von Materialien ist eines der Probleme, mit denen Ingenieure konfrontiert sind. Der bahnbrechende Ansatz, der das Wachstum von Ermüdungsrissen charakterisiert, ist das Gesetz nach PARIS. Das genannte Gesetz korreliert die Risswachstumsrate pro Zyklus mit dem zyklischen Spannungsintensitätsfaktor. Der Spannungsintensitätsfaktor ist nur auf Probleme anwendbar, bei denen die Theorie der linear elastischen Bruchmechanik gültig ist. Jedoch können einige Strukturen Plastizität und viskoses Verhalten aufweisen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, das Ermüdungsrisswachstum in elastisch-plastischen und linear viskoelastischen Festkörpern durch zyklische materielle Kräfte zu charakterisieren.

Zunächst wird ein modifiziertes ESHELBY-Gedankenexperiment eingeführt, um die auf einen Einschluss wirkende zyklische materielle Kraft abzuleiten. Darüber hinaus wird die Bilanz zyklischer Energieimpulse in elastisch-plastischen und linear viskoelastischen Festkörpern hergeleitet. Die zyklische Rissantriebskraft, oder auch zyklische globale materielle Kraft, wird durch ein wegunabhängiges Bereichsintegral um die Risspitze herum berechnet. Die Pfadunabhängigkeit des zyklischen materiellen Kräfteansatzes wird anhand von numerischen Beispielen verdeutlicht. Abschließend wird die zyklische globale materielle Kraft durch experimentelle Validierung als Ermüdungsrisswachstumskriterium nachgewiesen.

Darüber hinaus wird ein zusätzlicher Ansatz eingeführt, um die Stadien des Ermüdungsrisswachstums zu charakterisieren. Das Gesetz nach PARIS beschreibt nur eine stabile Rissausbreitung bei zyklischer Belastung. Der neu entwickelte Ansatz basiert auf der Herabsetzung der Bruchzähigkeit im GRIFFITH-Kriterium. Die Bruchzähigkeit wird durch Akkumulieren der Norm der zyklischen Rissantriebskraft in einem nicht-lokalen Verfahren verringert. Es wird eine Mesh-Sensitivity-Studie durchgeführt, die die Machbarkeit der nicht lokalen Akkumulation beweist. Darüber hinaus ist der Ansatz in der Lage, die drei Stufen der Ermüdungsrissausbreitung abzubilden. Der Bruchzähigkeitsdegradationsansatz wird mit den zyklischen materiellen Kräften in elastisch-plastischen und linear viskoelastischen Festkörpern kombiniert und durch experimentelle Daten validiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die zyklische materielle Kräfte in elastisch-plastischen und linear viskoelastischen Festkörpern abgeleitet. Eine weitere Neuerung ist die Entwicklung eines modifizierten GRIFFITH-Kriteriums, das in der Lage ist, die drei Stadien des Ermüdungsrisswachstums durch zyklische materielle Kräfte zu charakterisieren.