

**Constitutive modeling
of a semicrystalline thermoplastic
under cyclic creep loading**

**Konstitutive Modellierung
eines teilkristallinen Thermoplast
unter zyklischer Kriechlast**

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

Dissertation

von

Patrick Zerbe, M.Sc. (hons)
geboren am 29. Mai 1987 in Gummersbach

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Technische Universität Dresden
Prof. Dr.-Ing. habil. Fabian Duddeck
Technische Universität München
Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Kästner
Technische Universität Dresden

Tag der Einreichung: 16. Dezember 2016

Tag der Verteidigung: 02. Juni 2017

Summary

This work aims to model the mechanical material behavior of a semicrystalline thermoplastic for creep and cyclic creep loads and to increase the efficiency of finite element simulations for cyclic creep cases. Creep loads are constant and lead to monotonic time-dependent deformation. Cyclic creep loads change periodically between loading and unloading phases leading to partial deformation recovery over time during unloading phases. Experiments demonstrate the response of the material towards both load cases.

To describe the material behavior, a constitutive model is proposed. A finite strain approach is used that allows a formulation similar to the geometric linear theory. A viscoelastic generalized MAXWELL model accounts for reversible time-dependent deformation. This is combined with a viscoplastic model based on creep evolution equations to account for irreversible time-dependent deformation. Both model components consider volumetric flow. An isotropic damage model deteriorates the material properties for the stiffness and viscoplastic flow. A damage-recovery model is proposed to model a lifetime extension observed for cyclic creep loads compared to creep loads. The constitutive model is implemented into a finite element software through a strain-driven implicit time integration algorithm. Finite element simulations demonstrate the applicability of the model. Experiments with creep and cyclic creep loads on flat specimens are well represented. Faster strain-controlled loads lead to a softer response in simulations than in experiments. Creep and cyclic creep loads on a notched specimen show limitations in the prediction of lifetime by the model.

To increase the simulation efficiency for cyclic creep loads, two methods are presented that approximate incremental cycle-by-cycle finite element simulations efficiently. First, a cycle jump method is modified for the constitutive model and cyclic creep loads. This method is based on a second-order extrapolation of the internal variables of the constitutive model over several loading cycles at once. Second, a time homogenization method is presented where the separation of a fast loading time scale and a slow material time scale is utilized. Based on the separation, an approximate averaged solution for cyclic creep loads may be found with time step sizes spanning over several cycles. Both methods demonstrate large savings in computational cost while maintaining a high result quality as long as the change of internal variables per cycle is small and many cycles are considered.

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Modellierung des mechanischen Materialverhaltens eines teilkristallinen Thermoplast für Kriech- und zyklische Kriechlasten. Eine Steigerung der Effizienz von Finite Elemente Simulationen für zyklische Kriechlasten wird zusätzlich angestrebt. Kriechlasten sind konstante Lasten und führen zu monotoner zeitabhängiger Deformation. Zyklische Kriechlasten wechseln zwischen Be- und Entlastungsphasen. Während Entlastungsphasen kann sich die Deformation mit der Zeit teilweise erholen. Experimente untersuchen das Materialverhalten für beide Lastfälle.

Um das Materialverhalten zu beschreiben, wird ein Konstitutivmodell präsentiert. Ein Ansatz für finite Verzerrungen wird eingesetzt, der eine einfache Verwendung geometrisch linearer Formulierungen erlaubt. Ein viskoelastisches generalisiertes MAXWELL-Modell bildet die zeitabhängigen reversiblen Deformationen ab. Ein viskoplastisches Modell basierend auf Kriechgleichungen bildet die zeitabhängigen irreversiblen Deformationen ab. Volumetrisches Fließen ist in beiden Modellkomponenten berücksichtigt. Ein isotropes Schädigungsmodell degradiert die Materialeigenschaften für die Steifigkeit und das viskoplastische Fließen. Ein Schädigungserholungs-Modell wird vorgestellt, um eine Lebensdauererweiterung zu modellieren, die für Kriechlasten mit Entlastungsphasen beobachtet wird. Das Konstitutivmodell ist in eine Finite Elemente Software implementiert mittels eines verzerrungsgesteuerten impliziten Zeitintegrationsalgorithmus. Simulationen mit der Finite Elemente Methode und dem konstitutiven Modell zeigen Anwendungen des Modells. Experimente mit Kriech- und zyklischen Kriechlasten an ungekerbten Flachproben werden gut abgebildet. Schnellere dehnungsgesteuerte Lasten werden dagegen weicher in der Simulation abgebildet als im Experiment. Kriech- und zyklische Kriechlasten an gekerbten Proben zeigen Einschränkungen bezüglich der Lebensdauerprognose des Modells.

Zur Steigerung der Simulationseffizienz für zyklische Lasten werden Methoden vorgestellt, die reguläre inkrementelle Finite Elemente Simulationen effizient approximieren. Zunächst wird eine Zyklensprungmethode für das Konstitutivmodell und zyklische Kriechlasten modifiziert. Die Methode basiert auf einer Extrapolation zweiter Ordnung der internen Variablen des konstitutiven Modells über mehrere Lastzyklen in einem Schritt. Die zweite vorgestellte Methode ist die Zeithomogenisierung, in welcher die Trennung zwischen einer schnellen Zeitskala der Belastung und einer langsamen Zeitskala des Materials ausgenutzt wird. Basierend auf dieser Trennung kann eine ungefähre gemittelte Lösung für zyklische Kriechlasten gefunden werden. Die Zeitschritte können dabei mehrere Zyklen auf einmal umfassen. Beide Methoden können große Kostenersparnisse bei gleichzeitig hoher Ergebnisgüte erreichen, vorausgesetzt die Änderung der internen Variablen pro Zyklus bleibt klein und viele Zyklen werden berücksichtigt.