

A comprehensive phenomenological model for shape memory alloys

Ein umfassendes phänomenologisches Modell
für Formgedächtnislegierungen

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

Dissertation

von
M.Sc. Lucas A. Woodworth
geboren am 05. September 1994 in Armenia

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
(Technische Universität Dresden)

Prof. Dr. Ferdinando Auricchio
(University of Pavia)

Prof. Dr.-Ing. Daniel Juhre
(Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg)

Tag der Einreichung: 01. Dezember 2023

Tag der Verteidigung: 08. April 2024

Summary

Shape memory alloys (SMAs) are versatile smart materials which exhibit “memory” effects, whereby a significant amount of strains can be recovered through phase transformation. These materials manifest primary behaviors such as superelasticity and the shape memory effect along with a variety of secondary behaviors related to phase transformation, plasticity and fatigue. The main properties of SMAs have led to their application in the biomedical, robotics, automotive and aerospace fields. The combination of the complexity of SMAs and a strong interest in developing SMA devices has inspired the development of many computational models to simulate SMAs.

This work focuses on extending research in the field of SMA modeling by developing a comprehensive model which captures most of the effects associated with phase transformation and the irrecoverable microstructure changes related to plasticity, functional fatigue and structural fatigue. The model considers four independent fields in SMA structures: the displacements, the temperature and two additional nonlocal fields to regularize the damage and the transformation. The constitutive description and the global balance of these fields are implemented in a finite element framework to solve boundary value problems. Furthermore, the model is implemented at finite strains using an additive logarithmic strain space approach. To help fit the many parameters of the model to experiments, an automatic fitting procedure is developed and strategies for manual fitting are suggested. All in all, the model introduces several novel methodologies for the simulation of SMAs.

The SMA model is then applied to simulate a variety of problems. Using a large set of experimental data, the model is validated for phase transformation, plasticity, functional fatigue and structural fatigue. In addition, simulations of stents, endodontic files and a robotic actuation device are performed to apply the model to real case scenarios. The model is shown to display a relevant amount of accuracy and provides insights into the behavior of SMA structures. In the end, additional work is suggested to improve the accuracy, consistency and robustness of the SMA model.

Zusammenfassung

Formgedächtnislegierungen oder *shape memory alloys* (SMAs) sind vielseitige intelligente Werkstoffe, die einen „Gedächtniseffekt“ aufweisen, bei dem durch Phasenumwandlung ein erheblicher Teil der Dehnungen zurückgewonnen werden kann. Diese Werkstoffe zeigen primäre Eigenschaften wie Superelastizität und Formgedächtniseffekt sowie eine Vielzahl sekundärer Eigenschaften im Zusammenhang mit Phasenumwandlung, Plastizität und Ermüdung. Die Haupteigenschaften von SMA führten zu ihrer Anwendung in den Bereichen Biomedizin, Robotik, Automobilbau und Luft- und Raumfahrt. Durch die Kombination aus der Komplexität von SMAs und dem starken Interesse an der Entwicklung von SMA-Bauteilen wurde die Entwicklung zahlreicher Berechnungsmodelle zur Simulation von SMAs initiiert.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Erweiterung der SMA-Modellierung durch die Entwicklung eines umfassenden Modells, das die meisten der mit der Phasenumwandlung verbundenen Effekte und die unwiederbringlichen Mikrostrukturänderungen im Zusammenhang mit Plastizität, funktioneller Ermüdung und struktureller Ermüdung erfasst. Das Modell berücksichtigt vier unabhängige Felder in SMA-Strukturen: die Verschiebungen, die Temperatur und zwei zusätzliche nichtlokale Felder zur Regularisierung der Schädigung und der Phasenumwandlung. Die konstitutiven Beschreibungen und Erhaltungsgleichungen werden mittels der Finite Elemente Methode gelöst. Für die Berücksichtigung von finiten Deformationen wird ein additiver Ansatz im logarithmischen Dehnungsraum verwendet. Um die vielen Parameter des Modells anhand von Experimente zu kalibrieren, wird ein automatisches Kalibrierungsverfahren entwickelt und es werden Strategien für die manuelle Kalibrierung vorgeschlagen. Das Modell führt mehrere neue Methoden für die Simulation von SMAs ein.

Das SMA-Modell wird zur Simulation einer Vielzahl von Problemen eingesetzt. Anhand einer großen Anzahl von Versuchsdaten wird das Modell für Phasenumwandlung, Plastizität, funktionelle Ermüdung und strukturelle Ermüdung validiert. Darüber hinaus werden Simulationen von Stents, endodontischen Feilen und einer robotergestützten Betätigungsvorrichtung durchgeführt. Dadurch wird die Anwendbarkeit des Modells an realen Beispielen demonstriert. Das SMA-Modell bildet das Materialverhalten genau genug ab, um das Verhalten von Strukturen realistisch zu simulieren. Abschließend werden mögliche, weitere Forschungsthemen vorgeschlagen, um die Genauigkeit, Konsistenz und Robustheit des SMA-Modells zu verbessern.