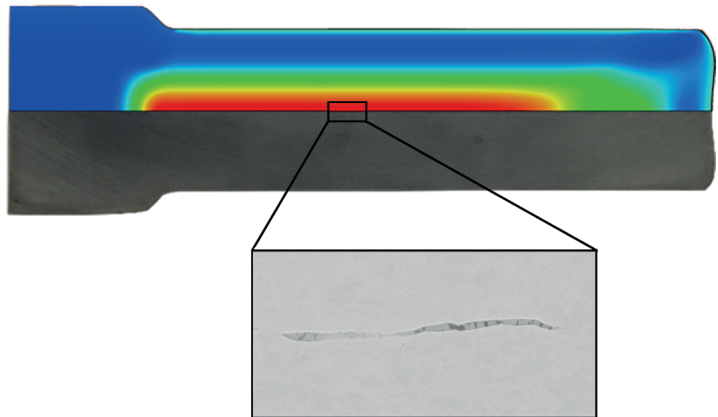


Alexander Schowtjak

Vorhersage der Porenentwicklung in der Umformtechnik



Vorhersage der Porenentwicklung in der Umformtechnik

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau

der Technischen Universität Dortmund

genehmigte Dissertation

Alexander Schowtjak M. Sc.

aus

Marl

Dortmund, 2024

Vorsitzender der Prüfungskommission: Jun. Prof. Dr.-Ing. Peer Woizeschke
Berichter: Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Jörn Mosler
Prof. Dr.-Ing. Sebastian Münstermann
Tag der mündlichen Prüfung: 26.05.2023

Dortmunder Umformtechnik

Band 122

Alexander Schowtjak

**Vorhersage der Porenentwicklung
in der Umformtechnik**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2024

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2024

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9433-6

ISSN 1619-6317

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Abstract

In order to minimize the ecological and social impacts of man-made climate change, it is necessary to drastically reduce greenhouse gas emissions. In this context, lightweight construction offers the possibility of saving the associated primary energy and resources both during manufacturing as well as service life of products. Usually, safety factors are used in the design of formed components due to unknown properties such as ductile damage caused by the manufacturing process. Ductile damage is defined as the nucleation, growth and coalescence of voids due to plastic deformation. In order to increase the knowledge of component properties, the aim of this work is to accurately predict the void evolution.

Damage models are used to predict damage in components. In the literature, these are often calibrated using only force-displacement-curves. More advanced methods additionally use local strain and displacement measurements. This usually implies weighting by the user or the error functional. In this work, such a multi-objective optimisation problem is reduced to a single objective function using Pareto optimisation. The strategies based on macroscopic data are compared with new methods developed in this work. These methods use microscopic void measurements in addition to the microscopic data. They are applied to the dual-phase steel DP800 and the case-hardening steel 16MnCrS. After calibrating the Gurson-Tvergaard-Needleman and Lemaitre models using notched tensile specimens, the different strategies are applied to forming processes. Air bending is considered for the dual-phase steel and forward rod extrusion for the case-hardening steel. While the parameter identification strategies based on macroscopic data strongly overestimate the void area fraction, the parameter identification based on void measurements provides significantly better results.

However, the prediction quality is limited by the experiments used for calibration, as the load conditions in the calibration tests and forming processes sometimes differ significantly. To this end, a model based on a neural network is developed that can predict the void evolution based on experimental void measurements. Thus, no assumptions for the void evolution are required, as is usual for constitutive models. A very large data set is used for training, so that a wide range of loading conditions can be covered. This can significantly improve the prediction accuracy.

Kurzzusammenfassung

Um die ökologischen und sozialen Auswirkungen des menschengemachten Klimawandels zu minimieren, ist es notwendig, die Emissionen von Treibhausgasen drastisch zu reduzieren. In diesem Kontext bietet der Leichtbau die Möglichkeit, die damit verbundene Primärenergie und -ressourcen sowohl während der Herstellung als auch der Nutzungsdauer von Produkten einzusparen. Üblicherweise werden bei der Auslegung von umformtechnisch hergestellten Bauteilen aufgrund unbekannter Eigenschaften wie bspw. der duktilen Schädigung durch das Herstellungsverfahren Sicherheitsfaktoren verwendet. Unter duktiler Schädigung versteht man die Nukleierung, das Wachstum und den Zusammenschluss von Poren infolge plastischer Deformation. Um das Wissen über die Bauteileigenschaften zu erhöhen, ist es das Ziel dieser Arbeit, die Porenevolution präzise vorherzusagen zu können.

Schädigungsmodelle werden verwendet, um die Schädigung in Bauteilen vorherzusagen. In der Literatur werden diese häufig nur anhand von Kraft-Weg-Verläufen kalibriert. Fortschrittlichere Arbeiten verwenden zusätzlich lokale Dehnungs- und Verschiebungsmessungen. Dies impliziert üblicherweise eine Gewichtung durch den Anwender oder das Fehlerfunktional. In dieser Arbeit wird ein solches multikriterielles Optimierungsproblem mittels Pareto-Optimierung auf eine Zielfunktion reduziert. Die Strategien, die auf makroskopischen Daten basieren, werden mit neuen, eigens entwickelten Methoden verglichen, die zusätzlich mikroskopische Porenmessungen verwenden. Angewendet werden diese Methoden für den Dualphasenstahl DP800 und den Einsatzstahl 16MnCrS. Nach der Kalibrierung der Modelle von Gurson-Tvergaard-Needleman und Lemaitre anhand von gekerbten Zugproben werden die verschiedenen Strategien auf Umformprozesse angewendet. Beim Dualphasenstahl wird das Freibiegen betrachtet und beim Einsatzstahl das Voll-Vorwärts-Fließpressen. Während die Parameteridentifikations-Strategien, die auf makroskopischen Daten basieren, den Porenflächenanteil stark überschätzen, liefert die Parameteridentifikation anhand von Porenmessungen deutlich bessere Ergebnisse.

Die Vorhersagequalität ist allerdings limitiert durch die Experimente, die zur Kalibrierung verwendet werden, da sich die Lastzustände in den Grundversuchen und Umformprozessen teilweise deutlich unterscheiden. Aus diesem Grund wird ein Modell, basierend auf einem neuronalen Netz, entwickelt, das die Porenevolution, basierend auf experimentellen Porenmessungen, vorhersagen kann. So werden keine Annahmen für die Porenevolution benötigt, wie bei konstitutiven Modellen üblich. Für das Training wird ein sehr umfangreicher Datensatz verwendet, sodass ein großer Bereich von Lastzuständen abgedeckt werden kann. Dadurch kann die Vorhersagegenauigkeit deutlich verbessert werden.

Inhaltsverzeichnis

Vorabveröffentlichung von Inhalten	i
Externe Ergebnisse und Leistungen	iii
Formelzeichen und Abkürzungen	v
1 Einleitung	1
2 Stand der Kenntnisse	3
2.1 Duktile Schädigung	3
2.1.1 Grundlagen duktiler Schädigung	3
2.1.2 Grundlagen zum Spannungszustand	5
2.1.3 Charakterisierung duktiler Schädigung	7
2.1.4 Einfluss der Schädigung auf die Produkteigenschaften	11
2.2 Schädigungsmodelle	15
2.2.1 Versagenskriterien	16
2.2.2 Konstitutive Schädigungsmodelle	18
2.3 Inverse Parameteridentifikation	22
2.3.1 Grundlagen der inversen Parameteridentifikation	22
2.3.2 Vorhersage der Porenevolution	25
2.4 Maschinelles Lernen	26
2.4.1 Grundlagen neuronaler Netze	26
2.4.2 Anwendung in der Umformtechnik	31
2.5 Fazit	32
3 Zielsetzung	33
4 Grundlagen für die inverse Parameteridentifikation	35
4.1 Charakterisierungsversuche des DP800	36
4.2 Charakterisierungsversuche des 16MnCrS5	40
4.3 Aufbau und Analyse der FE-Modelle	44
4.4 Konstitutive Materialmodelle	46
4.4.1 Lemaitre-Modell	48
4.4.2 GTN-Modell	49
4.5 Entwicklung eines Tools zur Parameteridentifikation	51
4.5.1 Optimierungsprozess	51
4.5.2 Postprocessing und Interpolation	53
4.5.3 Optimierung mit mehreren Zielfunktionen	55
4.6 Details zur Implementierung von ADAPT	56

5	Parameteridentifikation zur Porenvorhersage	57
5.1	Konventionelle inverse Parameteridentifikation	57
5.1.1	Anwendung für den Dualphasenstahl DP800	58
5.1.2	Anwendung für den Einsatzstahl 16MnCrS5	61
5.1.3	Validierung anhand von Porenmessungen	65
5.1.4	Zwischenfazit	67
5.2	Kalibrierung des GTN-Modells anhand von Porenmessungen des DP800	68
5.3	Erweiterung der Methodik auf andere Modelle	69
5.3.1	Anwendung am Beispiel des Lemaitre-Modells für den DP800 .	71
5.3.2	Anwendung für den Einsatzstahl 16MnCrS5	71
5.4	Fazit	73
6	Anwendung auf Umformprozesse	75
6.1	Freibiegen des DP800	75
6.1.1	Experimentelle Daten	75
6.1.2	Aufbau und Analyse des FE-Modells	76
6.2	Vorhersage der Porenentwicklung beim Freibiegen	77
6.3	Voll-Vorwärts-Fließpressen des 16MnCrS5	79
6.3.1	Experimentelle Daten	79
6.3.2	Aufbau und Analyse des FE-Modells	81
6.4	Vorhersage der Porenentwicklung beim Voll-Vorwärts-Fließpressen . .	83
6.5	Fazit	84
7	Porenvorhersage mittels maschinellen Lernens	87
7.1	Generierung der Datenbasis	88
7.1.1	Durchführung und Analyse der Grundversuche	88
7.1.2	Durchführung und Analyse des Biegens	92
7.2	Entwicklung eines Modells für die Porenvorhersage	94
7.2.1	Trainingsstrategien	94
7.2.2	Hyperparameter des neuronalen Netzes	96
7.2.3	Strategien für die Schädigungsvorhersage	97
7.3	Anwendung auf das Biegen	99
7.3.1	Freibiegen	99
7.3.2	RSS-Biegen	101
7.4	Fazit	101
8	Zusammenfassung und Ausblick	103
	Literaturverzeichnis	107
	Anhang	119