

Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut  
Dr.-Ing. Mortaza Otroshi

# **Damage modeling in the numerical simulation of mechanical joining processes**

Berichte aus dem Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik

Band 160

**Gerson Meschut  
Mortaza Otroshi**

**Damage modeling in the numerical simulation of  
mechanical joining processes**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag  
Düren 2022

**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.: Paderborn, Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8777-2

ISSN 1434-6915

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Kurzfassung**

Bei der Umsetzung von metallischen Mischbaukonzepten zur Reduktion des Gewichtes und somit auch der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Fahrzeugen finden verstärkt mechanische Fügeverfahren Anwendung. Zeitgleich zu gestiegenen Anforderungen im Hinblick auf Komfort und Sicherheit steigt zunehmend der Kostendruck und die Produktentwicklungszyklen nehmen stetig ab. Diese Aspekte machen den Einsatz von Simulationsmethoden zur Qualifizierung der Fügeverfahren für Neuentwicklungen in frühen Entwicklungsphasen erforderlich. Die numerische Simulation des Fügeprozesses beim Halbhohlstanzen wird zurzeit maßgeblich durch eine begrenzte Vorhersagegenauigkeit der Fügepunktausbildung auf Grund eines fehlenden, genauen Schädigungsmodells beschränkt. Dies setzt eine möglichst realitätsnahe Beschreibung des Schädigungsverhaltens voraus. Durch eine präzise numerische Abbildung der fortschreitenden fügeprozessinduzierten Schädigungsakkumulation in mechanischen Fügepunkten wird neben dem Verständnis der wirkenden Mechanismen auch eine Optimierung der Verbindung bezogen auf das Trag- und Energieaufnahmeverhalten möglich. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Entwicklung der duktilen Schädigung sowie das Versagensverhalten vom stempelseitigen Werkstoff in der 2D Prozesssimulation des Halbhohlstanzen abzubilden. Außerdem wird der Einfluss der durch den Fügeprozess induzierten Vorschädigung auf das Tragverhalten der Verbindung untersucht.

## **Abstract**

Mechanical joining processes are increasingly being used as an approach towards multi-material design concepts to reduce weight of vehicles and thus CO<sub>2</sub> emissions. As the requirements of customers in terms of comfort and safety are increasing, the cost pressure is also rising and the product development cycles are steadily decreasing. These aspects make it necessary to use simulation methods to qualify joining processes for new developments in early development phases. In the simulation of mechanical joining processes, it is important to predict the damage and fracture behavior of the material. Due to lack of an accurate damage model, the accuracy of joining process simulation is significantly limited. A precise modeling of process-induced damage accumulation in mechanical joining simulation, enables not only an understanding of the acting mechanisms but also an optimization of the joint with respect to the load-bearing capacity and the energy absorption. The aim of this work is to describe the evolution of ductile damage as well as the failure behavior of upper sheet in the 2D simulation of self-piercing riveting process. Furthermore, it is intended to investigate the influence of pre-damage induced by joining process on the strength of the joint.

**Parts of this work have been appeared in the following publications:**

Otroshi, M.; Meschut, G. Influence of cutting clearance and punch geometry on the stress state in small punch test. *Engineering Failure Analysis* **2021**, *136*, 106183. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106183>

Otroshi, M.; Meschut, G.; Nesakumar, A. The influence of manufacturing processes and optical measurement methods on the damage behavior of HX340LAD micro-alloyed steels. *Journal of Manufacturing Engineering* **2021**, *16*, 70-76.

Otroshi, M.; Rossel, M.; Meschut, G. Stress state dependent damage modeling of self-pierce riveting process simulation using GISSMO damage model. *Journal of Advanced Joining Processes* **2020**, *1*. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2020.100015>

Otroshi, M.; Meschut, G. Spannungszustandsabhängige Schädigungsmodellierung zum Halbhohlstanznieten. *Umformtechnik Blech Rohre Profile* **2020**, *20*, 48-50.

Otroshi, M.; Meschut, G. *Methodenentwicklung zur Schädigungsmodellierung für die numerische Prozesssimulation mechanischer Fügeverfahren*. Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. **2020**, 1-182. ISBN: 978-3-86776-582-4

## Table of contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>State of the Art</b>	<b>3</b>
2.1	Self-piercing riveting .....	3
2.2	Numerical simulation of mechanical joining processes.....	5
2.2.1	Sequence of an FEM analysis .....	5
2.2.2	Description of the Plasticity .....	6
2.2.3	Description of damage and fracture in the simulation of SPR.....	8
2.2.4	Multiaxial stress state .....	10
2.3	Damage and fracture mechanisms .....	13
2.3.1	Brittle fracture .....	15
2.3.2	Ductile fracture.....	15
2.4	Modeling of damage and fracture .....	18
2.4.1	Fracture criteria .....	19
2.4.2	Continuum mechanics damage models .....	19
2.4.3	GISSMO damage model .....	22
2.4.4	Micromechanical models .....	23
2.4.5	Stress state dependent damage modeling .....	24
2.4.6	Damage modeling using small punch test.....	24
<b>3</b>	<b>Task description</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>Experimental investigations</b>	<b>29</b>
4.1	Materials.....	29
4.1.1	Micro-alloyed steel HX340LAD.....	29
4.1.2	Aluminum alloy EN AW-5182 .....	31
4.2	Experimental facilities .....	32
4.2.1	Zwick Z100 .....	32
4.2.2	Instron high-speed machine.....	33
4.3	Joining of sheet materials.....	35
4.4	Experimental investigation of damage specimens .....	36

---

4.4.1	Notched flat specimens with radius $R = 4$ mm .....	36
4.4.2	Grooved flat specimens with radius $R = 2$ mm .....	39
4.4.3	Double-notched tensile specimens according to ASTM-B 831 .....	41
4.4.4	Small punch test .....	47
4.5	Experimental investigation of single-lap shear test .....	52
<b>5</b>	<b>Determination of fracture strain and stress state</b> .....	<b>54</b>
5.1	Numerical simulation of damage specimens .....	54
5.1.1	Notched flat specimen .....	54
5.1.2	Grooved flat specimen .....	56
5.1.3	Double-notched tensile specimens according to ASTM-B 831 .....	57
5.1.4	Small punch test .....	59
5.2	Influence of manufacturing processes .....	64
5.2.1	Influence of manufacturing processes on the fracture location .....	65
5.2.2	Influence of manufacturing processes on the stress state .....	65
5.2.3	Identification of the crack initiation using different sprays .....	66
5.2.4	Identification of the crack initiation using different measuring systems ....	67
5.3	Determination of fracture locus .....	69
<b>6</b>	<b>Numerical simulation of damage specimens with damage</b> .....	<b>71</b>
6.1	Tensile specimens .....	71
6.2	Small punch test .....	75
6.3	Influence of tool geometries on stress state .....	83
<b>7</b>	<b>Simulation of self-piercing riveting with damage</b> .....	<b>87</b>
7.1	Simulation of self-piercing riveting .....	87
7.2	Comparison between simulations with and without damage modeling .....	90
7.3	Influence of pre-damage on the joint strength .....	93
7.4	Implementation of the method for other joint combinations .....	96
<b>8</b>	<b>Summary and conclusions</b> .....	<b>98</b>
<b>9</b>	<b>References</b> .....	<b>101</b>