Universität Paderborn

Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut
Dr.-Ing. Jonas Zweck

Robotergeführtes Fließlochformschrauben hochfester Stahlwerkstoffe mit Aluminium-Strangpressprofilen

LWF Schriftenreihe Band 155

Berichte aus dem Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik

Band 155

Gerson Meschut
Jonas Zweck

Robotergeführtes Fließlochformschrauben hochfester Stahlwerkstoffe mit Aluminium-Strangpressprofilen

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Düren 2021

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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8304-0
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 • E-Mail: info@shaker.de

Kurzdarstellung

Moderne Produktionssysteme im Automobilbau erfordern aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung der Antriebssysteme und der verstärkten Marktvolatilität flexible und kostengünstige Einsetzbarkeit. Für den Karosseriebau bedeutet das, dass Fügewerkzeuge für eine Vielzahl von Materialkombinationen anwendbar sein sollten. Des Weiteren sind die Kosten pro Fügepunkt in einer Fahrzeugkarosserie möglichst gering zu halten, um einen Wettbewerbsvorteil zu erreichen. Das Fließlochformschrauben ist ein effizientes Fügeverfahren, welches artfremde und einseitig zugängliche Bauteile verbinden kann. Das Fügen von vorlochfreien, hochfesten Stählen mit einseitig zugänglichen Aluminiumbauteilen mittels fließlochformenden Schraubens vermeidet kostenintensive Adapterblechlösungen und die Vorkonditionierung der Fügestellen mit Vor- und Sacklöchern. Ziel dieser Arbeit war es, die Einflusszusammenhänge beim Fügen hochfester Stahlwerkstoffe mit Aluminiumbauteilen in hochautomatisierten Produktionsstraßen zu untersuchen. Außerdem sollten die Randbedingungen des Fügeverfahrens für die Produkt- und Prozessplanung herausgearbeitet werden. Mithilfe einer Einflussfaktoranalyse und Vorversuchen wurde die Prozesskraft als zentrale Prozesseinflussgröße identifiziert. Es wurden experimentelle Versuche durchgeführt, um den Einfluss der Kraftgenerierung und des Industrieroboters auf die Verbindungsqualität zu bewerten. Die Wirkzusammenhänge zwischen Hilfsfügeteileigenschaften, Prozessparameter und der Beanspruchung des Hilfsfügeteils wurden anhand von FE-Simulationen dargestellt. Die Deformation der zu fügenden Bauteile, die aufgrund der hohen einseitigen Fügeprozesskräfte entstehen, wurden analysiert. Zuletzt sind die Verfahrensgrenzen mit hohen Fügekräften und vorschubgeregelter Prozessführung im Schliffbild untersucht worden.

Abstract

Modern production systems in automotive engineering must be flexible and cost-effective to use due to the increasing electrification of drivetrains and increased market volatility. For car body construction, this means that joining technologies must be applicable for a large number of material combinations. Furthermore, the costs per joining point in a car body must be kept as low as possible due to prize competition. Flow Drill Screwing is an efficient joining process that connects multi-material and one-sided accessible parts. Flow Drill Screwing of high strength steels without pre-holes avoids cost-intensive solutions and expensive pre-conditioning of the joining sheets. The aim of this thesis was to work out the interrelationships of influences when joining high-strength steel materials with aluminium components in highly automated environment. Furthermore, the boundary conditions for product and process planning are beeing worked out. With an influence factor analysis and preliminary tests, the process force was identified as the central process variable. The influence of the force generation and the industrial robot on the joint quality was demonstrated by experimental tests. The interrelationships between properties of the Flow Drill Element, process parameters on the stresses of the Flow Drill Element were investigated within an FE model. The deformation on the components caused by high one-sided joining forces were assessed. Finally new Process-limits with high forces and a feed-rate controlled process have been investigated with destructive Analysis.

Teilergebnisse dieser Arbeit wurden bereits in folgenden Veröffentlichungen vorgestellt:

[ZR18] Zweck, Jonas und Richter Thomas: Simulation of Flow Drill Screwing. Thermo-mechanical Analysis Using Coupled Eulerian-Lagrangian Element Formulation. In: Dassault Systems User Conference, 05.12.2018, Hanau

[Zwe20] Zweck, Jonas: FLOW-DRILL-SCREWING. Joining high strength steel without pre-holes with aluminium parts. In: Joining in Car Body Engineering (virtual Conference), 01.10.2020, Bad Nauheim

[IZ21] Ivanjko, Martin und Zweck, Jonas: Development of an adaptive, sensor-based FDS-robot-system. In: Joining in Car Body Engineering (virtual Conference), 22.04.2021, Bad Nauheim

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **i**

Abkürzungsverzeichnis **iii**

Nomenklatur **v**

1 Einleitung **1**

2 Stand der Technik **3**
2.1 Grundlagen des Fließ- und Fließlochformens 3
2.2 Fließlochformendes Schrauben 10
2.3 Mechanisches Fügen mittels Hochgeschwindigkeitsbolzensetzen 16
2.4 Prozesssimulation 17
2.5 Kennwertermittlung mittels Werkstoffsimulation 20
2.6 Mechanische Bearbeitung mit Industrierobotern 21
2.7 Zusammenfassung 24

3 Zielsetzung und methodisches Vorgehen **25**

4 Versuchswerkstoffe und -einrichtungen **27**
4.1 Fügeteilwerkstoffe 27
4.2 Hilfsfügeteile 28
4.3 Fertigungs- und Versuchseinrichtungen und Prüfverfahren 30
4.3.1 Fügeeinrichtung 30
4.3.2 Messeinrichtungen 33
4.3.3 Probengeometrien und Versuchsvorrichtungen 37

5 Voruntersuchungen **39**
5.1 Identifizierung der Versagensarten an der Prozessgrenze 39
5.2 Einfluss der Prozessparameter auf die Beanspruchung des Hilfsfügeteils 40
5.3 Einfluss der Prozessparameter auf die Werkstücktemperatur 41
5.4 Bewertung der Einflussgrößen in Bezug auf die Verbindungsqualität 42

6 Einfluss der Roboterdynamik auf den Fügeprozess und die Verbindungsqualität **47**
6.1 Einfluss der Roboterposition auf die Beanspruchung des Hilfsfügeteils beim Verbinden hochfester Werkstoffe 47
6.1.1 Vermessung der Roboterabdrängung beim FLS-Prozess 48
6.1.2 Beschreibung der untersuchten Fügepositionen 50
6.1.3 Bewertung der Hilfsfügeteilbeanspruchung bei Variation der Roboterposition 51

6.2 Methodik einer Vorhersage der Roboterabdrängung in Abhängigkeit der Roboterposition und des TCP . . . 55
6.2.1 Variation der Roboterposition . . . 57
6.2.2 Variation des TCP relativ zum Roboterflansch . . . 58

7 Experimentelle Prozessanalyse fließlochformendes Schrauben 59
7.1 Prozesskurvenanalyse servo-pneumatischer und servo-elektrischer Schraubsysteme . . . 59
7.2 Einfluss der Prozessführung auf die axiale Fügekraft . . . 61
7.3 Metallographie und Härtemapping gefügter FLS-Proben . . . 66
7.4 Tragfähigkeiten servo-elektrisch und servo-pneumatisch gefügter hochfester FLS-Verbindungen . . . 69

8 Numerische Simulation des fließlochformenden Schraubens 72
8.1 FLS-Simulationsmodell . . . 72
8.1.1 Aufbau des FLS-Simulationsmodells . . . 72
8.1.2 Kennwertermittlung mit JMAT Pro . . . 74
8.2 Experimentelle Prozessvalidierung . . . 76
8.2.1 Ermittlung der realen Vorschubgeschwindigkeit . . . 77
8.2.2 Prozessverifzierung . . . 79
8.3 Variation des Hilfsfügeteils . . . 81
8.4 Variation der Prozessparameter . . . 85
8.5 Numerische Berechnung der Beanspruchung der Schraube aufgrund der Roboternachgiebigkeit . . . 89

9 Einfluss der Bauteilsteifigkeiten auf die Verbindungsqualität 93
9.1 Lokale Deformation der Einschraubteile . . . 94
9.2 Einfluss der Einschraubteildeformation auf das Tragverhalten . . . 95
9.3 Bewertung der Deformationen des gesamten Bauteils . . . 96

10 Verfahrensgrenzenanalyse vom robotergeführten Fließlochschraubprozess 98
10.1 Bewertungskriterien für die Verbindungsqualität hochfester FLS-Verbindungen . 99
10.2 Schliffbildanalyse mit hochfester FLS-Verbindungen . . . 99

11 Zusammenfassung 102

Normen, Richtlinien und Merkblätter 105

Literaturverzeichnis 107

Datenblätter und Manuals 113