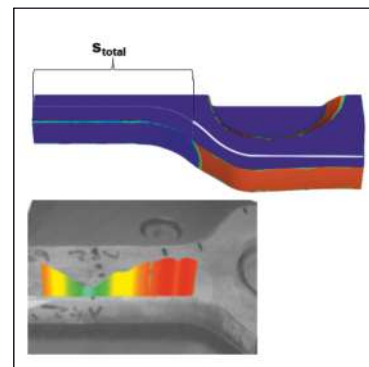
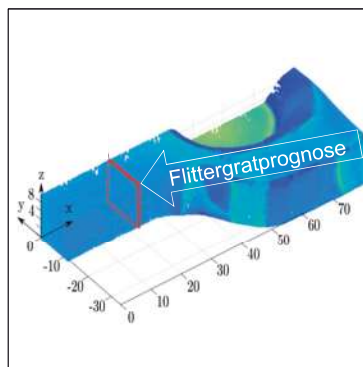
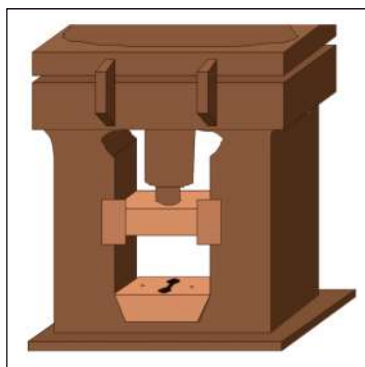


Johannes Richter

Prognose und Reduktion von Flittergratbildung zur Qualitätsverbesserung von gratlosen Schmiedeprozessen





Institut für
Integrierte Produktion Hannover gGmbH

Berichte aus dem IPH

Wissenschaftliche Schriftenreihe des
Instituts für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer

Zugleich: Dissertation,
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2019

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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung des vollständigen Werkes oder von Teilen davon, sind vorbehalten.

© TEWISS-Technik und Wissen GmbH, 2019
An der Universität 2 ♦ 30823 Garbsen
Tel: 0511-762-19434 ♦ Fax: 0511-762-18037
www.tewiss-verlag.de ♦ mail: info@tewiss-verlag.de

ISBN 978-3-95900-375-9
ISSN 1865-5513

Verlag: TEWISS Verlag,
Wissenschaftlicher Verlag der TEWISS – Technik und Wissen GmbH

Herstellung: Herstellung: DruckTeam Druckgesellschaft mbH, Hannover

Printed in Germany

**Prognose und Reduktion von Flittergratbildung zur
Qualitätsverbesserung von gratlosen Schmiedeprozessen**

**Prediction and reduction of thin flash generation for quality
improvement of flashless forging processes**

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Johannes Adrian Richter

2019

Referent: Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer
Tag der Promotion: 15.10.2019

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH. Die Untersuchungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des DFG-Forschungsprojekts STO 1011/4-1 „Flittergratvermeidung beim Präzisionsschmieden von Aluminium entlang der Prozesskette“ finanziell unterstützt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Behrens, dem geschäftsführenden Gesellschafter des IPH und dem Leiter des Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Leibniz Universität Hannover, gilt mein besonderer Dank für die vertrauensvolle und wohlwollende Unterstützung, die ich während meiner Tätigkeit am Institut erfahren habe.

Weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Lachmayer als Korreferenten und Herrn Prof. Dr.-Ing. Overmeyer für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Mein Dank gilt auch den Kollegen und Kolleginnen am IPH, besonders denen aus der Abteilung Prozesstechnik, die mich bei der Ideenfindung und Erstellung der Arbeit durch ihr großes Engagement und viele hilfreiche Anregungen unterstützt haben.

Besonders bedanken möchte ich mich bei den Kollegen Dr.-Ing. Jan Langner, Thoms Blohm und Dr.-Ing. Malte Stonis, nicht zuletzt für die vielen hilfreichen fachlichen Diskussionen und Ideen als auch für die kritische Durchsicht dieser Arbeit.

Weiterhin möchte ich mich bei den Kollegen Dirk Faikosch und Friedrich Breves für ihre engagierte Vorbereitung, Unterstützung und Durchführung der experimentellen Schmiedeversuche bedanken, die wichtig für diese Arbeit waren.

Herrn Roman Relge vom IFUM möchte ich ebenfalls für die kritische Durchsicht dieser Arbeit und die hilfreichen Anmerkungen danken. Darüber hinaus gilt mein Dank den studentischen Mitarbeitern Jens Kruse, Daniel Kampen, Sascha Brinkmann, Alexander Martini, Tim Anlage und Alexander Bessel. Auch sie brachten wertvolle Beiträge für diese Arbeit hervor.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern und meiner Frau Tina, die mich mit Rat und Tat aber vor allem mit Liebe, Geduld und Verständnis unterstützt haben.

Ich widme diese Arbeit meinem Großvater Dr.-Ing. Gerhard Richter (†) – Schmied.

Hannover, im April 2019

Johannes Richter

Kurzfassung

Die Vorteile des gratlosen Schmiedens liegen in der hohen Effizienz und in der hohen geometrischen Bauteilgenauigkeit. Insbesondere beim gratlosen Schmieden von Aluminium kann in die Spaltbereiche zwischen den Werkzeugelementen ungewollt Werkstoff eindringen und damit sogenannter Flittergrat entstehen. Flittergrat erschwert die Handhabung und die Positionierung der Bauteile in nachfolgenden Schmiede- oder Zerspanungsoperationen und führt dadurch zu Lage- und Toleranzfehlern am Bauteil. Mit gegenwärtig existierenden numerischen Methoden ist Flittergratbildung nicht prognostizierbar. Zudem gibt es keine industriell erprobten Ansätze zur Reduktion von Flittergrat.

In dieser Arbeit wurden daher zwei verschiedene Methoden zur erstmaligen numerischen Prognose von Flittergratbildung am Fertigteil erarbeitet. Methode I prognostiziert numerisch Flittergratbildung in spezifischen Bauteilbereichen durch die Ermittlung vorzeitiger Formfüllung vor Erreichen der Bauteilendhöhe. Methode II prognostiziert die Flittergratbildung über eine numerische Analyse des lokalen Druckes in den für Flittergratbildung kritischen Bereichen. Unter Verwendung unterschiedlicher Vorformgeometrien konnte die Flittergratbildung für spezifische Fertigteilbereiche in allen betrachteten Bereichen qualitativ prognostiziert werden. Des Weiteren wurde eine Methode zur Flittergratreduktion in gratlosen Schmiedeprozessen durch eine geometrische Optimierung von Vorformen mittels evolutionärer Algorithmen entwickelt. Die optimierten Vorformen erfüllten oder übertrafen die etablierten Qualitätsanforderungen im Vergleich zu konventionell entwickelten Vorformen bei einer signifikant verkürzten Optimierungsdauer von weniger als zehn Minuten.

Schlagerworte: Massivumformung, gratloses Schmieden, Flittergrat, Prognose, Optimierung

Abstract

The advantages of flashless forging are its high efficiency and the high geometric accuracy of the forged parts. Particularly in flashless aluminium forging, material can unintendedly flow into the small gaps between the tool elements. By this, the so-called thin flash generates. Thin flash complicates the handling and positioning in subsequent forging or machining operations and thereby leads to positioning and tolerance defects on the parts. Thin flash generation cannot be predicted by existing numerical approaches. In addition, there are no industrial proven approaches for the reduction of thin flash.

For the first time two different methods for the numerical prediction of thin flash generation were developed in this thesis. Method I numerically predicts thin flash generation in specific part areas by analysis of premature form filling before reaching the final part height. Method II predicts the thin flash generation by a numerical analysis of the local pressure in part areas critical to thin flash generation. By using different preform geometries for manufacturing one final part, a qualitative prediction of thin flash generation in specific part areas was achieved by both methods in all considered part areas. Furthermore, a method for the reduction of thin flash generation by geometric preform optimization using evolutionary algorithms was developed. The optimized preforms met or exceeded the established quality requirements compared to conventionally developed preforms while providing a significantly reduced optimization period of less than ten minutes.

Keywords: bulk forming, flashless forging, thin flash, prediction, optimization

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------|
| Formelzeichen und Abkürzungen..... | VIII |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Stand der Wissenschaft | 2 |
| 2.1 Grundlagen des Gesenkschmiedens und Einordnung in die DIN 8580 | 2 |
| 2.2 Schmiedbare Werkstoffe..... | 6 |
| 2.2.1 Stähle in der Umformtechnik und ihre Umformtemperaturen | 6 |
| 2.2.2 Leichtmetalle in der Umformtechnik und ihre Umformtemperaturen..... | 6 |
| 2.3 Gratbehaftetes Gesenkschmieden | 8 |
| 2.3.1 Grundlagen des Verfahrens..... | 8 |
| 2.3.2 Gesenkschmieden von Aluminium..... | 10 |
| 2.4 Gratloses Gesenkschmieden | 12 |
| 2.4.1 Grundlagen des Verfahrens..... | 12 |
| 2.4.2 Gratloses Gesenkschmieden von Aluminium..... | 14 |
| 2.5 Geometrische Vorformoptimierung beim Gesenkschmieden..... | 17 |
| 2.6 Qualitätsmerkmale von Schmiedeteilen und Schmiedefehler | 22 |
| 2.6.1 Überblick über Qualitätsmerkmale und Fehler von Schmiedeteilen | 22 |
| 2.6.2 Flittergratbildung beim gratlosen Schmieden | 24 |
| 3 Zielsetzung und Aufgabenstellung | 29 |
| 4 Festlegung der Bauteilgeometrien..... | 31 |
| 4.1 Festlegung einer Fertigteilgeometrie | 31 |
| 4.2 Festlegung von Vorformgeometrien | 31 |
| 5 Simulative und experimentelle Prozessanalyse..... | 34 |
| 5.1 FEM-Simulation | 34 |
| 5.1.1 Beschreibung des Modellaufbaus und der Eingangsparameter | 34 |
| 5.1.2 Auswertung der FEM-Simulationen der Umformprozesse | 38 |
| 5.2 Experimentelle Schmiedeversuche | 40 |
| 5.2.1 Beschreibung des experimentellen Versuchsaufbaus..... | 40 |
| 5.2.2 Auswertung der experimentellen Schmiedeversuche hinsichtlich der vorformabhängigen Flittergratbildung am Fertigteil | 42 |
| 6 Entwicklung der Flittergratprognosemethode I | 46 |
| 6.1 Grundlagen der Prognosemethode I | 46 |

| | | |
|-------|---|----|
| 6.2 | Prognose der Flittergratbildung durch einen Vergleich von Simulation und Experiment..... | 47 |
| 6.3 | Zwischenfazit | 50 |
| 7 | Entwicklung der Flittergratprognosemethode II | 51 |
| 7.1 | Grundlagen der Prognosemethode II | 51 |
| 7.2 | Vergleichende Analyse des Drucks und der experimentellen Flittergratbildung.... | 55 |
| 7.3 | Zwischenfazit | 60 |
| 8 | Entwicklung einer Methode zur Flittergratreduktion | 63 |
| 8.1 | Geometrische Beschreibung der Vorform- und Fertigteilgeometrien als Grundlage des Bewertungsmodells | 63 |
| 8.1.1 | Beschreibung der Vorform | 63 |
| 8.1.2 | Beschreibung des Fertigteils..... | 64 |
| 8.1.3 | Beschreibung von Vorform- und Fertigteilgeometrie durch die Prognose der Stoffflussbahnen | 65 |
| 8.2 | Festlegung von Kriterien zur Bewertung der Vorformen | 68 |
| 8.2.1 | Festlegung von Bewertungskriterien für eine Vorformoptimierung | 68 |
| 8.2.2 | 1. Kriterium: Massenvorverteilung und seine Beschreibung durch quantifizierbare Parameter..... | 70 |
| 8.2.3 | 2. Kriterium: Vorformgeometrie und seine Beschreibung durch quantifizierbare Parameter..... | 73 |
| 8.2.4 | 3. Kriterium: Fertigungsaufwand zur Herstellung der Vorformen und seine Beschreibung durch quantifizierbare Parameter | 76 |
| 8.2.5 | 4. Kriterium: Flittergratreduktion und seine Beschreibung durch quantifizierbare Parameter..... | 78 |
| 8.3 | Definition der Fitnessfunktion und Ablauf der algorithmischen Optimierung | 80 |
| 8.3.1 | Fitnessfunktion | 80 |
| 8.3.2 | Ablauf der Optimierung mit evolutionären Algorithmen | 81 |
| 8.4 | Untersuchung der Bewertungskriterien zur Eignung für Vorformoptimierung | 82 |
| 8.4.1 | Aufstellung eines Versuchsplans und Ableitung von manuellen Bewertungszielgrößen | 82 |
| 8.4.2 | Auswertung der Eignung der Bewertungskriterien | 84 |
| 8.5 | Simulative Untersuchung und Bewertung der Optimierungsergebnisse sowie Ergebnisvergleich mit manuell ausgelegten Vorformen..... | 89 |
| 8.6 | Vergleich der optimierten Vorform mit manuell von Konstruktionsingenieuren entwickelten Vorformen..... | 93 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 8.6.1 | Allgemeine Vorformbewertung mittels FEM sowie Vergleich der vorformabhängigen Flittergratbildung nach der entwickelten Methode I.... | 93 |
| 8.6.2 | Bewertung der vorformabhängigen Flittergratbildung nach der entwickelten Methode II | 96 |
| 8.7 | Zwischenfazit | 100 |
| 9 | Methodenanwendung auf ein komplexeres Fertigteil | 102 |
| 9.1 | Empfohlene Anwendungsabfolge der erarbeiteten Methoden im Kontext einer industriellen Prozessauslegung..... | 102 |
| 9.2 | Geometrien des Fertigteils sowie der Referenzvorform und der algorithmisch optimierten Vorform | 103 |
| 9.2.1 | Betrachtetes Fertigteil..... | 103 |
| 9.2.2 | Betrachtete Referenzvorform..... | 104 |
| 9.2.3 | Algorithmisch optimierte Vorform | 105 |
| 9.3 | Flittergratprognose der Vorformen durch Prognosemethode I..... | 106 |
| 9.4 | Flittergratprognose durch Methode II | 107 |
| 9.5 | Zwischenfazit | 110 |
| 10 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 111 |
| 10.1 | Zusammenfassung | 111 |
| 10.2 | Ausblick | 113 |
| 11 | Literaturverzeichnis | 114 |

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

| Zeichen | Einheit | Bezeichnung |
|------------------|---|--|
| A_1 | N/mm ² | Festigkeit |
| A_{max} | mm ² | Maximal mögliche Projektionsfläche |
| A_{min} | mm ² | Minimal mögliche Projektionsfläche |
| A_{opt} | mm ² | Optimale Projektionsfläche |
| A_v | mm ² | Projektionsfläche einer Vorform |
| $A_{Vorform, n}$ | mm ² | Flächeninhalt des Vorformmoduls n |
| b | J/(m ² K(s) ^{0,5}) | Wärmeeindringkoeffizient |
| b_i | mm | Bauteilbreite an der Stützstell i |
| $BP_{Bauteil}$ | - | Anzahl der Bildpunkte der Stoffflussbahnen des Fertigteils |
| $BP_{fehlend}$ | - | Anzahl der fehlenden notwendigen Bildpunkte |
| BP_{gesamt} | - | Gesamtzahl der aktivierten Bildpunkte einer Vorform |
| BP_u | - | Anzahl der überflüssigen Bildpunkte einer Vorform |
| e_i | - | Konturabstand an der Stelle i (normiert) |
| \bar{e} | - | Durchschnittlicher Konturabstand (normiert) |
| FA | - | Bewertungsparameter Projektionsfläche |
| FAL | - | Bewertungsparameter Kombinierte Länge & Fläche |
| FBP | - | Bewertungsparameter Übereinstimmende Bildpunktanzahl |
| F_{ges} | - | Gesamtfitnesswert |
| F_i | - | Zu maximierender Bewertungsparameter |
| F_j | - | Zu minimierender Bewertungsparameter |
| FKL | - | Bewertungsparameter Konturlänge |
| FL | - | Bewertungsparameter Vorformlänge |
| FS | - | Bewertungsparameter Überflüssige Bildpunktanzahl |
| FV | - | Bewertungsparameter Konturabstandsvariation |
| h_1 | mm | Spezifische Umformhöhe vor Erreichen der Fertigteilhöhe |

| | | |
|------------------|-----|---|
| h_{final} | mm | Finale Umformhöhe bzw. Fertigteilhöhe |
| $h_{grat,i,n}$ | mm | Durchschnittliche Flittergrathöhe von Vorform i an Stelle n |
| KL | mm | Konturlänge einer Vorform |
| KL_{max} | mm | Maximal mögliche Konturlänge |
| KL_{min} | mm | Minimal mögliche Konturlänge |
| l_i | mm | Länge i auf der Messlinie l |
| l_{max} | mm | Maximale mögliche Länge der Vorform |
| l_{opt} | mm | Optimale Länge der Vorform |
| l_V | mm | Länge der Vorform |
| $L_{Fertigteil}$ | mm | Länge des Fertigteils |
| $L_{Vorform}$ | mm | Länge der Vorform |
| m | - | Populationsgröße |
| m_1 | - | Temperaturabhängigkeitskoeffizient |
| m_2 | - | Verfestigungsverhaltenskoeffizient |
| m_3 | - | Vergleichsformänderungsgeschwindigkeitskoeffizient |
| m_4 | - | Vergleichsformänderungskoeffizient |
| m_r | - | Reibungsfaktor |
| n | - | Nummerierung der Segmente |
| N | - | Gesamtzahl der Segmente |
| N_{max} | - | Anzahl der zu maximierenden Parameter |
| N_{min} | - | Anzahl der zu minimierenden Parameter |
| P | - | Druckfunktion |
| P_i | - | Druckfunktion der Vorform i |
| p | MPa | Druck |
| $p_{i,l}$ | MPa | Druckwert der Vorform i am Punkt l |
| s_i | mm | Gravurkontaktlänge s der Vorform i |
| S_m | - | Mutationsrate |
| S_p | - | Selektionsdruck |

| | | |
|-------------|-----------------|--|
| S_{total} | mm | Gesamtgravurkontaktlänge |
| S_u | - | Überlebensrate |
| T_a | °C | Umgebungstemperatur |
| T_b | °C | Werkstücktemperatur |
| T_{die} | °C | Werkzeugtemperatur |
| v_F | mm/s | Pressengeschwindigkeit |
| Q_i | mm ² | Querschnittsfläche der Vorform Q_i an der Stelle i |
| $Q_{i,opt}$ | mm ² | Querschnittsfläche des fertigen Bauteils an der Stelle i |
| QV | - | Gesamtübereinstimmung der Querschnittsflächeninhalte |
| qv | - | Bewertungsparameter Querschnittsflächenverhältnis |
| w_g | mm | Führungsspaltbreite bzw. Fließspaltbreite |
| w_{max} | - | Gewichtungsfaktor für zu maximierende Parameter |
| w_{min} | - | Gewichtungsfaktor für zu minimierende Parameter |

Symbole

| | | |
|---------------------|----------------------|---------------------------|
| α_T | W/(m ² K) | Wärmeübergangskoeffizient |
| ε | - | Dehnung |
| $\dot{\varepsilon}$ | 1/s | Dehnungsrate |
| ε_i | - | Dehnung an der Stelle i |
| σ_F | MPa | Fließspannung |
| σ_N | MPa | Normalspannung |
| τ_R | MPa | Reibungsspannung |
| μ | - | Reibungskoeffizient |

Abkürzungen

| | |
|-----|--------------------------------|
| CAD | Computer-Aided-Design |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| FEM | Finite-Elemente-Methode |

| | |
|-------|--|
| IT | ISO-Toleranzreihe |
| KMU | Kleine und mittelständische Unternehmen |
| KNN | Künstliche neuronale Netze |
| V_i | Algorithmisch ausgelegte Vorform i |
| I_i | Manuell ausgelegte Vorform von Ingenieur i |