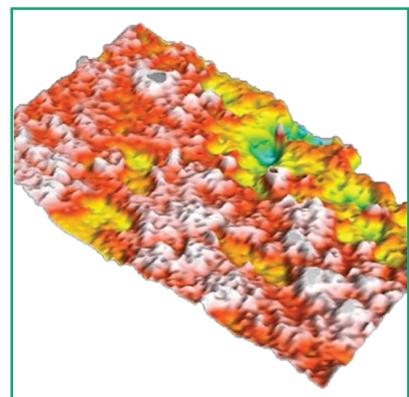
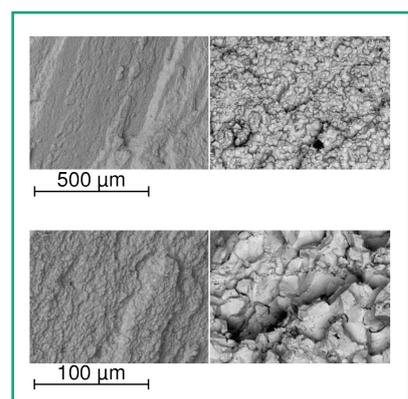


Lars Christian Gebel

Bewertung von martensitischen Chromstählen für die Warmumformung der automobilen Großserienfertigung

Berichte aus dem IFUM · Band 03/2021

Herausgeber: Bernd-Arno Behrens



IFUM

Institut für Umformtechnik
und Umformmaschinen

Berichte aus dem IFUM

Wissenschaftliche Schriftenreihe des
Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen
der Leibniz Universität Hannover

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Zugleich: Dissertation,
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 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.

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, 2021
An der Universität 2 ♦ 30823 Garbsen
Tel: 0511-762-19434 ♦ Fax: 0511-762-18037
www.tewiss-verlag.de ♦ mail: info@tewiss-verlag.de

ISBN 978-3-95900-560-9
ISSN 1613-9704

Verlag: TEWISS Verlag,
TEWISS-Technik und Wissen GmbH

Herstellung: DruckTeam Druckgesellschaft mbH, Hannover
Printed in Germany

**Bewertung von martensitischen Chromstählen für die
Warmumformung der automobilen Großserienfertigung**

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

von

Dipl.-Ing. Lars Christian Gebel

2021

Tag der mündlichen Prüfung: 17.03.2021

1. Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens
2. Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als externer wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Leibniz Universität Hannover. Die Untersuchungen wurden von der Volkswagen Aktiengesellschaft finanziell unterstützt. Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

Herrn Prof. Behrens, dem Leiter des IFUM, gilt mein besonderer Dank für die vertrauensvolle und motivierende Unterstützung, die ich während meiner Tätigkeit am Institut erfahren habe. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Maier für die gründliche Korrektur der Arbeit und die Übernahme des Korreferates sowie Herrn Prof. Poll für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Zusätzlich bedanke ich mich bei Frau Dr. Christina Sunderkötter, Herrn Prof. Jan-Frederik Laß und Herrn Dr. Haucke-Frederik Hartmann, deren außerordentliche Unterstützung, guten Ratschläge und wissenschaftlicher Austausch einen großen Teil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Mitarbeitern des IFUM. Eure Unterstützung und Erfahrung in fachlicher und administrativer Hinsicht führten zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit.

Für die Möglichkeiten, Freiheiten und sehr gute Zusammenarbeit während meiner Zeit als Doktorand, danke ich den Mitarbeitern im Presswerk Wolfsburg der Volkswagen AG. Besonders hervorheben möchte ich die Kollegen des Materiallabors und meine motivierten Studenten, die bedeutend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen Freunden, meiner Familie und insbesondere meiner Frau für die moralische und wertvolle Unterstützung während der Zeit als Doktorand.

Zusammenfassung

In dieser Dissertation wird schwerpunktmäßig ein Chromstahl, mit Hinblick auf die Verwendung für crashrelevante Strukturbauteile im Automobilbau, nach entsprechender Wärmebehandlung untersucht. Ziel der Dissertation ist es, das Potenzial dieses Stahls unter Berücksichtigung prozessrelevanter Einflussfaktoren zu bewerten. Sämtliche Erkenntnisse ergeben ein Prozessfenster des Stahlwerkstoffs X46Cr13 für die Warmumformung von Bauteilen moderner Karosserien. Dies beinhaltet die Ermittlung einer geeigneten Wärmebehandlungsrouten sowie die Durchführung von umformtechnischen Untersuchungen. Darauf aufbauend werden Versuchsteile in Form eines Seitenaufprallträgers mit, im Vergleich zur Großserie bis zu 80 % reduzierter Haltezeit, warm umgeformt, weisen aber beispielsweise bei Festigkeitsuntersuchungen eine um ca. 50 % erhöhte Bauteilfestigkeit auf. Auf der Grundlage von experimentellen Versuchen zeigt die abschließende Betrachtung von X46Cr13 für den großseriennahen Warmumformungsprozess im automobilen Bereich die Stärken aber auch die Herausforderungen auf.

Warmumformung, Formhärten, Chromstahl

Evaluation of martensitic chromium steels for hot forming in the large-scale automotive production

This dissertation focuses on chromium steel, with a view to its use for crash-relevant structural components in automobile construction, after appropriate heat treatment. The aim of the dissertation is to evaluate the potential of this steel while taking process-relevant influencing factors into account. All the findings result in a process window for the steel X46Cr13 for the hot forming of components in modern car bodies. This includes the determination of a suitable heat treatment route as well as the implementation of metal forming investigations. Based on this, test parts in the form of a side impact beam are hot-formed with a holding time that is up to 80% shorter than in large-scale production, but show an approx. 50% increase in component strength in strength tests. On the basis of experimental tests, the final consideration of X46Cr13 shows the strengths but also the challenges for the large-scale hot forming process in the automotive sector.

Hot Forming, Press Hardening, Chromium Steel

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Formelzeichen und Abkürzungen | VII |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 2 Stand der Technik | 4 |
| 2.1 Charakteristik der Warmumformung von Karosseriebauteilen | 4 |
| 2.2 Anforderungen an warmumgeformte Karosseriekomponenten in der Automobilindustrie..... | 22 |
| 3 Motivation und Zielsetzung | 29 |
| 4 Versuchswerkstoffe und Apparaturen..... | 32 |
| 4.1 Versuchswerkstoffe | 32 |
| 4.2 Versuchsaufbauten und Apparaturen..... | 34 |
| 4.3 Prüfapparaturen..... | 37 |
| 5 Analyse werkstofftechnischer Randbedingungen..... | 48 |
| 5.1 Gegenüberstellung von Stahlwerkstoffen für die Warmumformung | 48 |
| 5.2 Eingrenzung der Wärmebehandlungsparameter | 51 |
| 5.3 Zusammenfassung und Diskussion der werkstofftechnischen Ergebnisse | 56 |
| 6 Prozessanalyse der Warmumformung..... | 58 |
| 6.1 Betrachtung vor der Warmumformung | 58 |
| 6.1.1 Untersuchungen zur Kaltumformung von X46Cr13..... | 59 |
| 6.1.2 Gegenüberstellung von zwei Erwärmungsverfahren..... | 61 |
| 6.2 Werkstoffverhalten während der Warmumformung | 63 |
| 6.2.1 Einfluss der Temperatur auf das Fließverhalten | 63 |
| 6.2.2 Vergleich von Umformgraden und Umformtemperaturen | 66 |
| 6.2.3 Betrachtung der Abkühlgeschwindigkeit..... | 68 |
| 6.3 Variation der Werkzeughaltezeit | 71 |
| 6.3.1 Einfluss der Werkzeughaltezeit auf die Formgenauigkeit | 71 |
| 6.3.2 Vergleich von Versuchsbauteilen bei Belastung | 79 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 6.4 | Korrosive Eigenschaften und Lackierbarkeit von X46Cr13..... | 82 |
| 7 | Großseriennahe Warmumformung von X46Cr13 | 88 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 96 |
| 9 | Quellenverzeichnis | 99 |
| 10 | Anhang | 122 |

Formelzeichen und Abkürzungen**Formelzeichen**

| Zeichen | Bezeichnung | Einheit |
|-----------------|---|---------|
| A_{c1} | Austenitstarttemperatur | °C |
| A_{c3} | Ende der Austenitumwandlung | °C |
| A_{50} | Bruchdehnung (Zugprobe mit Messlänge 50 mm) | % |
| A_{80} | Bruchdehnung (Zugprobe mit Messlänge 80 mm) | % |
| b | Zargenbreite | mm |
| F | Kraft | N |
| G | Gewicht | kg |
| h | Höhe | mm |
| k_f | Fließspannung | MPa |
| M_f | Martensitfinishtemperatur | °C |
| M_s | Martensitstarttemperatur | °C |
| R_m | Zugfestigkeit | MPa |
| $R_{p0,2}$ | Dehngrenze (techn.) | MPa |
| t | Zeit | s |
| T | Temperatur | °C |
| v | Geschwindigkeit | mm/s |
| β | Verzugswinkel | ° |
| σ | Technische Spannung | MPa |
| φ | Umformgrad | – |
| $\dot{\varphi}$ | Umformgeschwindigkeit | 1/s |
| ε | Dehnung | % |

Abkürzungen

| | |
|-----------------|---|
| 22MnB5 | Borlegierter Vergütungsstahl, Werkstoffnummer: 1.5528 |
| 3D | Dreidimensional |
| A | Austenit |
| Al | Chemisches Symbol für Aluminium |
| AlSi | Aluminium-Silizium-Beschichtung |
| AS150 | Aluminium-Silizium-Beschichtung mit Beschichtungsmenge 150 g/m ² |
| ATOS | Advanced Topometric Sensor |
| B | Chemisches Symbol für Bor |
| C | Chemisches Symbol für Kohlenstoff |
| CAD | Computer-Aided Design (rechnergestützter Entwurf) |
| CO ₂ | Kohlenstoffdioxid |
| Cr | Chemisches Symbol für Chrom |
| CP-Stahl | Complexphasen-Stahl |
| DC06 | Flachstahl kaltgewalzt, Werkstoffnummer: 1.0873 |
| DP-Stahl | Dualphasen-Stahl |
| EDS | Energiedispersive Röntgenspektroskopie |
| FEM | Feldemissionsmikroskop |
| FLC | Forming Limit Curve (Grenzformänderungskurve) |
| FLD | Forming Limit Diagram (Grenzformänderungsdiagramm) |
| GOM | Gesellschaft für Optische Messtechnik (Firmenname) |
| HV | Härte nach Vickers |
| IF-Stahl | Interstitial-Free- Stahl |
| IFUM | Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen |

| | |
|----------|--|
| KTL | Kathodische Tauchlackierung |
| Mn | Chemisches Symbol für Mangan |
| MS-Stahl | Martensitischer Stahl |
| PHS | Presshärter Stahl (Markenname Voestalpine) |
| REM | Rasterelektronenmikroskop |
| RPS | Referenz-Punkt-System |
| Si | Chemisches Symbol für Silizium |
| VW | Automobilhersteller Volkswagen AG |
| X46Cr13 | Martensitischer Chrom-Stahl, Werkstoffnummer: 1.4034 |
| ZTA | Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Diagramm |
| ZTU | Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm |