

Prozessfenster beim Presshärten
bei schneller Erwärmung von Stahlplatten
mit Aluminium-Silizium-Beschichtung

DISSERTATION
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften

von
Dipl.-Wirt.-Ing. Tobias Todzy
geb. am 31.01.1982 in Bad Berleburg,

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen
Siegen 2015

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich

Tag der Einreichung: 25.04.2015

Tag der mündlichen Prüfung: 18.11.2015

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik

Band 6

Tobias Todzy

**Prozessfenster beim Presshärten
bei schneller Erwärmung von Stahlplatten
mit Aluminium-Silizium-Beschichtung**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.: Siegen, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4371-6

ISSN 2191-0030

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

Vorwort

Die vorliegende Dissertation wurde von mir im Rahmen meiner dreijährigen Doktorandentätigkeit bei der Daimler AG im Werk Sindelfingen in der Technologiefabrik, Bereich Verfahrensentwicklung und Werkstoffe, verfasst. Durch die Kooperation mit dem Lehrstuhl für Umformtechnik der Universität Siegen stand mir für das erfolgreiche Gelingen dieser Arbeit ein stets verlässlicher Partner zur Seite.

Meinen besonderen Dank möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel vom Lehrstuhl für Umformtechnik der Universität Siegen für die Betreuung meiner Abhandlung und die Übernahme des Hauptreferats aussprechen. Vornehmlich haben mich seine Besuche in Sindelfingen und seine wertvollen fachlichen Anregungen erfreut. Für die Übernahme des Koreferats und seine persönliche Unterstützung danke ich ganz herzlich Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich vom Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik der Universität Stuttgart. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Xiangfan Fang und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Robert Brandt bedanke ich mich für den Einsatz als Mitglied der Promotionskommission.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Oberingenieur Dr.-Ing. Rainer Steinheimer vom Lehrstuhl für Umformtechnik der Universität Siegen für die sehr gute Kooperation insbesondere während der Durchführung meiner experimentellen Versuche im Lehrstuhllabor. Nicht weniger danken möchte ich Herrn Wolfgang Staufner für die Förderung meiner Person. Besonderer Dank gilt meinem Teamleiter Herrn Dr.-Ing. Daniel Wortberg für seine Unterstützung und die seinerseits mir gegenüber eingeräumten Freiheiten im Rahmen der Anfertigung dieser Abhandlung sowie über sein Vertrauen in mich, in Eigenregie eine Versuchspresse zu bauen.

Mein herzlicher Dank richtet sich zudem an meine Teammitglieder sowie an Herrn Dr.-Ing. habil. Peter Bogon, Herrn Dr.-Ing. Winfried Nester, Herrn Dr. rer. nat. Jürgen Mautz, Herrn Dr.-Ing. Peter Feuser und nicht zuletzt an Herrn Jochen Bold für die fachlichen Diskussionen. Ebenso möchte ich mich bei der Firma ThyssenKrupp Steel Europe AG, der Firma ArcelorMittal, der Firma Kirchhoff Automotive GmbH, der Firma IBB Induktorbau Bergel, der Firma Peer Technologies GmbH & Co. KG, der Firma voestalpine AG, dem Technikum und den Mitarbeitern des Werkstofftechniklabors sowie meinen studentischen Hilfskräften für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung bedanken.

Großer Dank gebührt meinen Eltern, die mich stets unterstützt und mir bereits früh die Freiheit für den Gang meiner eigenen Wege eröffnet haben. Meiner Ehefrau Henriette danke ich für ihr Verständnis, welches sie mir für die zahlreichen zeitlichen Entbehrungen während der Anfertigung meiner Doktorarbeit entgegengebracht hat.

Kurzfassung

Zugenommene Sicherheitsanforderungen, gesetzliche Umweltauflagen und die Erhöhung der Reichweiten insbesondere für die Elektromobilität sorgen für einen stetigen Anstieg pressgehärteter Bauteile im Automobilbau. Der wachsende Einsatz pressgehärteter Bauteile erfordert weltweit höhere Produktionskapazitäten und neue Produktionsanlagen.

Bezogen auf die Anforderungen an eine kompakte, flexible und ressourcenschonende Produktion gilt es im Rahmen dieser Arbeit das Prozessfenster bezüglich einer schnellen Platinerwärmung ausfindig zu machen. Die Ermittlung des Prozessfensters basiert auf der Untersuchung des Grundwerkstoffs 22MnB5, der Al-Si-Beschichtung und der verwendeten induktiven Erwärmungstechnik.

Zunächst wird auf der Grundlage einer Literaturrecherche der Ursprung des Presshärtens erläutert. Ferner werden die verschiedenen Fertigungsverfahren und die allgemeinen Prozessparameter des Presshärtens dargestellt. Zudem werden aktuelle Entwicklungen im Rahmen des Presshärtens aufgezeigt. Um eine Grundlage für die später folgenden Untersuchungen zu schaffen, wird zuerst der Grundwerkstoff bezüglich seiner Legierungszusammensetzung und der mechanisch-technologischen Eigenschaften detailliert beschrieben. Weiterhin wird ein Überblick auf die beim Presshärtens einsetzbaren Beschichtungen gegeben. Der Schwerpunkt dieser Analyse bezieht sich dabei auf die Al-Si-Beschichtung und deren Phasenveränderung während des Erwärmungsvorgangs. Ein weiteres Kapitel stellt die verschiedenen Erwärmungstechnologien vor, die sich möglicherweise für das Presshärtens eignen. Insbesondere wird die induktive Erwärmungstechnik betrachtet.

Um den Einfluss einer schnellen Erwärmung auf den Grundwerkstoff zu analysieren, werden Warmfließkurven erstellt sowie Zugversuche, Härtemessungen und Gefügeuntersuchungen durchgeführt.

Für die Untersuchung der Machbarkeit der induktiven Erwärmung von Platinen für das Presshärtens werden verschiedene Ansätze vorgestellt und Lösungen erarbeitet. Hierzu wird auf die Einflussgrößen der induktiven Erwärmung und deren Veränderung eingegangen. Auf der Grundlage experimenteller Versuchsergebnisse wird ein numerisches Modell entwickelt, das die Untersuchung der induktiven Erwärmung unterstützt.

Die Beschichtung wird zunächst bezüglich ihrer Eignung zur schnellen Erwärmung im heutigen Anlieferzustand untersucht. Für die Erzielung einer Verkürzung der Erwärmungszeiten wird die Beschichtung speziell durch ein Glühprozess vordiffundiert. Die veränderte Beschichtung durchläuft den Presshärteprozess und wird anschließend auf ihre Qualität und Eignung für die Automobilindustrie geprüft.

Abschließend wird das ermittelte Prozessfenster anhand von Versuchen mit einem Prinzipbauteil überprüft.

Abstract

Increased safety requirements, statutory environmental requirements, and increasing the range especially for electric vehicles provide a steady rise in press-hardened components in the automotive industry. The increasing use of press-hardened components requires higher global production capacity and new production facilities.

Based on the requirements of a compact, flexible and resource-saving production, it is necessary to determine the process window with respect to rapid heating of blanks within the scope of this work. The determination of the process window is based on the examination of the base material 22MnB5, the Al-Si coating, and the inductive heating technique used.

First, the origin of the hot stamping process is shown, based on a literature review. Furthermore, the different manufacturing processes and the general process parameters of press hardening are explained. Furthermore, recent developments in the area of press hardening are presented. To provide a basis for later investigations, the base material with respect to its alloy composition and mechanical properties will be described in detail. Furthermore, an overview is given on the usable coatings in the press hardening process. The focus of this analysis refers to the Al-Si coating and the phase change during the heating process. Another chapter introduces the different heating technologies that may be suitable for press hardening. In particular, the induction heating-technology is considered.

To investigate the influence of rapid heating on the base material, hot flow curves, tensile tests, hardness measurements, and microstructure investigations are carried out.

To investigate the practicability of induction heating of blanks for press hardening, various approaches are presented and solutions are developed. For this purpose, the influence factors of induction heating and its changes are discussed. On the basis of the experimental test results a numerical model is developed that supports the study of induction heating.

The coating is initially investigated for its suitability for rapid heating in today's delivery state. For achieving a reduction of the heating time the coating is specially pre-diffused by an annealing process. The modified coating undergoes the press hardening process and is then tested for its quality and suitability for the automotive industry.

Finally, the determined process window is reviewed on the basis of experiments with a principle component.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Ursprung und aktuelle Entwicklungen des Presshärtens	3
2.2	Fertigungsvarianten und Prozessparameter	7
2.3	Der Grundwerkstoff 22MnB5.....	11
2.4	Eingesetzte Beschichtungen	19
2.5	Alternativen zur konventionellen Platinenerwärmung	24
2.5.1	Ansätze neuer Erwärmungskonzepte.....	24
2.5.2	Induktive Erwärmung	26
3	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	33
4	Versuchseinrichtungen und angewandte Methoden	35
4.1	Einrichtungen zur Wärmebehandlung	35
4.1.1	Öfen zur Halbzeugerwärmung.....	35
4.1.2	Induktionsanlagen	35
4.1.3	Temperaturmesstechnik	36
4.2	Versuchspressen und Werkzeuge	38
4.3	Methoden zur Werkstoffcharakterisierung	39
4.3.1	Funkenspektrometer.....	39
4.3.2	Auflagemassenbestimmung.....	39
4.3.3	Zugversuch.....	39
4.3.4	Biegeprüfung	40
4.3.5	Metallografie.....	41
4.3.6	Härteprüfung.....	41
4.3.7	Glimmentladungsspektroskopie.....	42
4.3.8	Oberflächenmorphologieuntersuchung.....	43
4.3.9	Lackhaftungsprüfung	43
4.3.10	Korrosionsprüfung	44
4.4	Numerische Simulationsumgebungen	45

5	Untersuchung des Grundwerkstoffs zur schnellen Erwärmung...47	
5.1	Charakterisierung des verwendeten Grundwerkstoffs	47
5.2	Einfluss des Austenitisierens auf das Fließverhalten	48
5.2.1	Methodische Vorgehensweise.....	48
5.2.2	Fließverhalten des Grundwerkstoffs	56
5.2.3	Bewertung der Fließkurvenenergebnisse	65
5.3	Diskussion des Grundwerkstoffs zur schnellen Erwärmung	69
6	Untersuchung der schnellen Erwärmung..... 71	
6.1	Vorgehensweise	71
6.2	Einflussgrößen der induktiven Erwärmung	72
6.3	Induktive Erwärmung.....	83
6.3.1	Homogene Erwärmung	83
6.3.2	Wirkungsgradermittlung	93
6.3.3	Formplatinenerwärmung.....	95
6.4	Bewertung der induktiven Erwärmungstechnik.....	100
7	Untersuchung der Beschichtung zur schnellen Erwärmung 103	
7.1	Prozessgrenzen der heutigen Al-Si-Beschichtung	103
7.2	Einfluss wesentlicher Presshärteparameter	109
7.2.1	Methodische Vorgehensweise.....	109
7.2.2	Vordiffusion	111
7.2.3	Schnelle Erwärmung und Presshärten.....	117
7.2.1	Lackhaftung und Korrosion	127
7.3	Ermittlung der mechanischen Werkstoffeigenschaften	131
7.4	Diskussion der Beschichtung zur schnellen Erwärmung.....	138
8	Definition des Prozessfensters zur schnellen Erwärmung 141	
9	Verifikation anhand eines Prinzipbauteils 145	
9.1	Beschreibung der Vorgehensweise	145
9.2	Untersuchung des Grundwerkstoffs und der Beschichtung	150
9.3	Untersuchung der funktionalen Eigenschaften	153
9.4	Bewertung der Verifikationsergebnisse	155
10	Zusammenfassung und Ausblick..... 157	
11	Quellenverzeichnis 163	