PRODUKTIONSMASCHINEN

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Thomas Storms

Laserunterstütztes Kragenziehen

Edition Wissenschaft
Apprimus

Laserunterstütztes Kragenziehen

Laser-Assisted Flange Forming

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
D o k t o r s d e r I n g e n i e u r w i s s e n s c h a f t e n
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Thomas Christian Storms

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke

Tag der mündlichen Prüfung: 20. November 2020

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Thomas Storms

Laserunterstütztes Kragenziehen

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. T. Bergs
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 35/2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über https://portal.dnb.de abrufbar.

Thomas Storms:

Laserunterstütztes Kragenziehen

1. Auflage, 2021

Apprimus Verlag, Aachen, 2021
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen
Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

Printed in Germany

ISBN 978-3-86359-953-9

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2020)

Vorwort

Preamble

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Gruppenleiter in der Abteilung Faserverbund- und Lasersystemtechnik am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT in Aachen entstanden.

Für die Betreuung dieser Dissertation, das entgegengebrachte Vertrauen und den Freiraum bei der wissenschaftlichen Ausarbeitung möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, herzlich bedanken. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke danke ich für die Übernahme des Korreferats und die wertvollen Anregungen. Ebenfalls danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel für den Vorsitz der Prüfungskommission. Für die Übernahme des Prüfungsbeisitzes danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. (Osaka) Jochen Büchs.

Ein herzlicher Dank gebührt meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen vom Fraunhofer IPT, die mich in vielfältiger Weise fachlich unterstützt haben. Durch die engagierte und freundschaftliche Zusammenarbeit wird mir die Promotionszeit in schöner Erinnerung bleiben.

Ganz besonders möchte ich mich an dieser Stelle bei meinen ehemaligen Kollegen Florian Schmidt und Markus Eckert bedanken, die in vielen gemeinsamen Stunden des Experimentierens und Diskutierens einen wichtigen Beitrag zum Gelingen der Arbeit geleistet haben.

Ein großer Dank gilt darüber hinaus meinem damaligen Vorgesetzten, Herrn Dr.-Ing. Henning Janssen, für die Durchsicht meiner Dissertation und die freundschaftliche Zusammenarbeit.

Mein Dank gilt ebenso allen Studentinnen und Studenten, die im Rahmen ihrer Studien- und Abschlussarbeiten sowie als wissenschaftliche Hilfskraft zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Besonders erwähnen möchte ich Adrian Spahn, Sebastian Jahr, Nadine Schmitz, Kai Harperscheidt und Gustavo Mancini.

Meinen Eltern, die mir den eingeschlagenen Weg ermöglicht haben, möchte ich an dieser Stelle danken. Von ganzem Herzen danke ich schließlich meiner Frau Katharina, die mich stets unterstützt hat und durch den Verzicht auf viele gemeinsame Stunden einen wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet hat. Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Kindern Philippa und Franziskus bedanken, deren Lebensfreude mir stets eine Motivation war.

Lippstadt, im November 2020 Thomas Storms

Kurzdarstellung

Abstract

Das Kragenziehen ist ein Verfahren der Zugdruckumformung und hat einen großen Anwendungsbereich in der blechverarbeitenden Industrie. Kragen dienen beispielsweise als Befestigungselement für Bolzen oder um tragfähige Gewinde in dünne Bleche einzubringen. Der Trend zum Einsatz hochfester Stähle stellt für das Kragenziehen eine Herausforderung dar, denn steigende Festigkeiten wirken sich oft negativ auf deren Umformbarkeit aus. Beim Kragenziehen hochfester Stähle sind die erreichbaren Aufweitverhältnisse dadurch limitiert, was sich durch Risse im Kragen äußert.

Der Ansatz des laserunterstützten Kragenziehens besteht darin, das Einreißen des Kragens bei kritischen Aufweitverhältnissen zu verhindern, indem das vorgelochte Blech lokal mit dem Laser erwärmt und der Kragen anschließend bei erhöhter Blechtemperatur umgeformt wird. Ziel der Forschungsarbeit ist die Untersuchung des neuen, hybriden Umformverfahrens und der systemtechnischen Integration der lokalen Lasererwärmung des Blechs in eine industriell relevante Produktionsumgebung.

Laserunterstützte Kragenzugversuche auf einem Prüfstand zeigen, dass die Aufweitverhältnisse beim Kragenziehen des Dualphasenstahls DP1000, des bainitischen Stahls SZBS800 und des austenitischen Stahls 1.4310 durch die lokale Lasererwärmung mehr als verdoppelt werden können. Der Blechwerkstoff, das Aufweitverhältnis und die Kragenabmessungen beeinflussen die dazu notwendigen Erwärmungsparameter. Bei dem Stahl DP1000 mit der Blechdicke von 1 mm und dem Kragendurchmesser von 10 mm lässt sich die Rissentstehung beim Aufweitverhältnis von 2,0 bereits nach der Erwärmungsdauer von 0,1 s mit der Laserleistung von 3000 W unterdrücken. Mit Blick auf den Spannungszustand ist der Blechbereich innerhalb der Matrizenöffnung zu erwärmen. Durch eine Bestrahlung der Blechseite, die der späteren Kragenaußenseite entspricht, lässt sich die notwendige Laserleistung minimieren.

Die Steigerung der Aufweitverhältnisse durch die Laserunterstützung ergibt höhere Kragen. Metallografische Analysen zeigen, dass eine Wärmeeinflusszone im Kragen auftritt. Die Härtewerte laserunterstützt gezogener Kragen liegen auf bzw. über dem Niveau der Ausgangshärte der Blechwerkstoffe DP1000, 1.4310 und SZBS800. Bei der Verarbeitung von Vergütungsstählen mit entsprechend hohen Umformtemperaturen können auch lokal gehärtete Kragen hergestellt werden. Auszugversuche an laserunterstützt gezogenen Kragen aus DP1000 zeigen, dass die maximalen Auszugkräfte mit zunehmendem Aufweitverhältnis ansteigen.

Im Rahmen der Arbeit wird das laserunterstützte Kragenziehen in ein Folgeverbundwerkzeug integriert und auf einer Servopresse mit rund 40 Hub pro Minute durchgeführt. Hierfür wird eine 3-Achsen Strahlablenkeinheit in ein von den Pressenschwingungen entkoppeltes Erwärmungsmodul integriert. Die Laserstrahlung wird über einen Strahlengang unmittelbar vor der Umformstufe auf das Blech geleitet.

Insgesamt ist festzuhalten, dass sich das laserunterstützte Kragenziehen eignet, um die Aufweitverhältnisse bei der Verarbeitung hochfester Stähle zu steigern.

Abstract

Flange forming is a method of tensile-compressive forming and has a wide range of applications in the sheet metal processing industry. Flanges are used, for example, as a fastening element for bolts or to insert load-bearing threads into thin sheets. The trend towards the use of high-strength steels poses a challenge for flange forming, as increasing strength often has a negative effect on their formability. When flange forming high-strength steels, the achievable expansion ratios are therefore limited, which is reflected by cracks in the flange.

The approach of laser-assisted flange forming is to prevent the flange from cracking under critical expansion ratios by locally heating the pre-punched sheet metal with a laser beam and subsequently forming the flange at elevated sheet metal temperature. The aim of the research is to investigate the new, hybrid forming process and the system integration of local laser heating of the sheet metal in an industrially relevant production environment.

Laser-assisted flange forming trials on a testing bench show that the expansion ratios during flange forming of the dual phase steel DP1000, the bainitic steel SZBS800 and the austenitic steel 1.4310 can be more than doubled by local laser heating. The sheet material, the expansion ratio and the dimensions of the flange influence the necessary heating parameters. In the case of the steel DP1000 with a sheet thickness of 1 mm and a flange diameter of 10 mm, crack formation at the expansion ratio of 2.0 can be suppressed with the laser power of 3000 W after a heating time of only 0.1 s. With regard to the stress condition during flange forming, the sheet area within the die opening has to be heated. The necessary laser power can be minimized by irradiating the sheet side, which corresponds to the outside of the flange after forming.

The increase of the expansion ratio due to local laser heating results in higher flanges. Metallographic analyses show that a heat-affected zone occurs in the flange. The hardness values of laser-assisted formed flanges are equal to or above the initial hardness of the sheet materials DP1000, 1.4310 and SZBS800. When processing heat-treatable steels with correspondingly high forming temperatures, locally hardened flanges can be produced. Pull-out tests on laser-assisted formed flanges of DP1000 show that the maximum pull-out forces increase with an increasing expansion ratio.

As part of the research, laser-assisted flange forming is integrated into a progressive die and performed on a servo press with about 40 strokes per minute. For this purpose, a 3-axis beam deflection unit is integrated into a heating module that is decoupled from the press vibrations. The laser radiation is directed onto the sheet metal via a beam path directly before the forming stage of the flange.

In summary, it can be concluded that laser-assisted flange forming is capable of increasing the expansion ratios when processing high-strength steels.

Inhaltsverzeichnis

Content

1 Einleitung 1

2 Stand der Technik 5

2.1 Einsatz hochfester Stähle 5
2.2 Kragenziehen 7
2.2.1 Verfahrenseinordnung, -anwendung und -ablauf 7
2.2.2 Spannungszustand und Aufweitverhältnis 8
2.2.3 Kragenhöhe 11
2.2.4 Vorlochen durch Scherschneiden 12
2.2.5 Maschinen und Werkzeuge 13
2.3 Laserunterstützte Blechbearbeitung 14
2.3.1 Laserunterstütztes Scherschneiden 15
2.3.2 Laserunterstütztes Umformen 16
2.3.3 Werkzeugintegration lokaler Lasererwärmungsprozesse 19
2.4 Physikalische Grundlagen und Systeme zur Lasererwärmung 20
2.4.1 Absorption von Laserstrahlung 21
2.4.2 Strahlquellen und Strahlführung bzw. -formung 22
2.5 Blechwerkstoffe 23
2.5.1 Einflussgrößen auf das Formänderungsvermögen 23
2.5.2 Laserstrahlhärten von Blechwerkstoffen 25
2.6 Zusammenfassende Bewertung des Standes der Technik 29

3 Aufgabenstellung und Zielsetzung 31

4 Theoretische Betrachtung 33

4.1 Prozessabfolge und Systemkonzept 33
4.2 Versuchswerkstoffe 35
4.2.1 Mechanische Eigenschaften der Versuchswerkstoffe 36
4.2.2 Thermische Materialeigenschaften 41
4.3 Prozessauslegung 43
4.3.1 Erwärmungsbereich um das Vorloch 43
4.3.2 Analyse des Lasererwärmungssystems 45
4.3.3 Erwärmungsgeometrien für das laserunterstützte Kragenziehen 46
4.3.4 Prozesseinflussgrößen beim laserunterstützten Kragenziehen 47
4.3.5 Modellierung der Temperaturverteilung um das Vorloch 48
4.3.6 Vorgehen zur experimentellen Parameterermittlung 56

5 Experimentelle Grundlagenuntersuchung 59

5.1 Prüfstand Stanz-Nibbelmaschine 59
5.1.1 Strahlquellen und optischer Aufbau 60
5.1.2 Messsysteme und Umformgeschwindigkeit 62

5.2 Schnittqualität des Vorlochs 63
5.2.1 Schneidwerkzeuge 64
5.2.2 Schnittflächenkenngrößen 65
5.2.3 Härteverteilung an der Schnittkante des Vorlochs 66
5.3 Konventionelles Kragenziehen ohne Lasererwärmung 67
5.3.1 Umformwerkzeuge 67
5.3.2 Grenzaufweitverhältnis ohne Lasererwärmung 69
5.3.3 Einlaufanalyse der Ziehstempel und Prozesskräfte 70
5.3.4 Kragengeometrie 72
5.3.5 Gefüge und Härteverlauf 75
5.3.6 Fazit zum Kragenziehen ohne Lasererwärmung 76
5.4 Steigerung des Grenzaufweitverhältnisses durch lokale Lasererwärmung 76
5.4.1 Machbarkeitsnachweis mit DP1000 77
5.4.2 Prozessfenster der Lasererwärmung 78
5.4.3 Einfluss der Erwärmungsseite des Blechs auf die Laserleistung 83
5.4.4 Grenzaufweitverhältnis beim laserunterstützten Kragenziehen 85
5.4.5 Einlaufanalyse und Prozesskräfte beim laserunterstützten Kragenziehen 86
5.4.6 Geometrie laserunterstützt gezogener Kragen 89
5.4.7 Einfluss der lokalen Lasererwärmung auf die Mikrostruktur und Härte 91
5.4.8 Auszugversuche laserunterstützt gezogener Kragen aus DP1000 94
5.4.9 Einfluss der Erwärmungsgeometrie 97
5.4.10 Zwischenfazit zum laserunterstützten Kragenziehen 99
5.5 Lokales Härten beim laserunterstützten Kragenziehen 100
5.5.1 Blechwerkstoffe zum lokalen Laserhärten 100
5.5.2 Prozessauslegung zum lokalen Laserhärten beim Kragenziehen 102
5.5.3 Grundlagenversuche zum lokalen Laserhärten von Blechen 106
5.5.4 Versuch zum Kragenziehen mit lokalem Laserhärten 112
5.6 Zusammenfassende Beurteilung der Grundlagenversuche 114

6 Übertragung auf eine Pressenlinie 117

6.1 Optikkonzepte für das laserunterstützte Kragenziehen 117
6.2 Pressenlinie für das laserunterstützte Kragenziehen 118
6.3 Anforderungsanalyse und Integrationskonzept 119
6.3.1 Allgemeine Prozessanforderungen 119
6.3.2 Systemanforderungen und Integrationskonzept 120
6.4 Versuchswerkzeug 122
6.5 Lasererwärmungseinheit zum laserunterstützten Kragenziehen 123
6.5.1 3-Achsen Strahlablenkeinheit 124
6.5.2 Bestrahlungsmodul und Strahlengang 125
6.5.3 Lasererwärmungseinheit 126
6.6 Versuche zum laserunterstützten Kragenziehen auf der Pressenlinie 127
6.6.1 Gesamtanlage zum laserunterstützten Kragenziehen 127

6.6.2 Laserunterstütztes Kragenziehen im Folgeverbundwerkzeug.....129
6.6.3 Lokales Laserhärten im Folgeverbundwerkzeug.....132
6.6.4 Zusammenfassende Bewertung des laserunterstützten Kragenziehens im Folgeverbundwerkzeug 133

7 Zusammenfassung und Ausblick.....135

8 Literaturverzeichnis.....143

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

Griechische Buchstaben

α	1/K	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
α_A	°	Öffnungswinkel
β	°	Bruchflächenwinkel
ΔT	K	Temperaturdifferenz
ΔT_{cn}	K	Temperaturerhöhung pro Überlauf
ΔT_{rn}	K	Abkühlung pro Überlauf
$\dot{\varepsilon}$	1/s	Dehnrate
ε_p	-	Plastische Dehnung
ϵ_d	-	Bezogene Durchmesseränderung
ϵ_s	-	Bezogene Wanddickenänderung
λ	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit
λ_K	nm	Wellenlänge der Prozesskamera
λ_L	nm	Wellenlänge der Laserstrahlung
λ_{M1}	nm	Messwellenlänge des Quotientenpyrometers
λ_{M2}	nm	Messwellenlänge des Quotientenpyrometers
λ_P	nm	Wellenlänge des Laserpointers
ρ	g/cm³	Dichte
σ_a	N/mm²	Axialspannung
σ_r	N/mm²	Radialspannung
σ_R	N/mm²	Reibspannung (Fließgrenze reiner Einkristalle)
σ_t	N/mm²	Tangentialspannung

Lateinische Großbuchstaben

A	-	Absorptionsgrad
A_{c1}	°C	Temperatur; Einsetzen Austenitbildung (Erwärmung)
A_{c3}	°C	Temperatur; Abschluss Austenitbildung (Erwärmung)
B_M	mm	Breite Bestrahlungsmodul
B_W	mm	Werkzeugbreite

CL	mm	Schneidspiel
E	kN/mm²	E-Modul
E_L	J	Energieeintrag durch Laserstrahlung
E_{min}	J	Minimaler Energieeintrag
F_N	N	Niederhaltekraft
F_S	N	Stempelkraft
G	-	Erwärmungsgeometrie
H_B	mm	Bandeinlaufhöhe
H_M	mm	Höhe des Bestrahlungsmoduls
H_P	mm	Maximale Werkzeugeinbauhöhe der Presse
H_S	mm	Höhe des Strahlengangs
H_W	mm	Werkzeughöhe
I	W/mm²	Intensität
I_L	mm	Linienlänge
KE	mm	Kanteneinzug
L_M	mm	Länge des Bestrahlungsmoduls
L_{WD}	mm	Arbeitsabstand
M²	-	Beugungsmaßzahl
M_f	°C	Temperatur; Ende der Martensitumwandlung
M_s	°C	Temperatur; Beginn der Martensitumwandlung
P	W	Laserleistung
P_1	W	Untere Grenze der Laserleistung
P_{abs}	W	Absorbierte Laserleistung
P_{Ist}	W	Ist-Laserleistung
P_L	W	Obere Grenze der Laserleistung
P_{max}	W	Maximale Laserleistung
P_{min}	W	Minimale Laserleistung
P_{Soll}	W	Soll-Laserleistung
$\dot{Q}_K$	W	Wärmestrom, konvektiver Anteil
$\dot{Q}_L$	W	Wärmestrom, konduktiver Anteil
$\dot{Q}_S$	W	Wärmestrom, Strahlungsanteil
R	-	Reflexionsgrad

R_a	µm	Arithmetischer Mittenrauwert
R_{eL}	N/mm²	Untere Streckgrenze
R_K	mm	Kreisradius
$R_{p0,2}$	N/mm²	0,2 %-Dehngrenze
RT	°C	Raumtemperatur
R_z	µm	Rautiefe
SPP	mm·mrad	Strahlparameterprodukt
T	°C	Temperatur
T_0	°C	Ausgangstemperatur
T_A	°C	Austenitisierungstemperatur
T_L	°C	Umgebungstemperatur
T_{max}	°C	Maximaltemperatur
T_O	°C	Oberflächentemperatur
T_{OMax}	°C	Maximale Oberflächentemperatur
T_R	°C	Rekristallisationstemperatur
T_S	°C	Schmelztemperatur
T_U	°C	Umformtemperatur
U	mm	Kragenumfang
V_M	mm³	Blechvolumen in der Matrizenöffnung

Lateinische Kleinbuchstaben

a	-	Aufweitverhältnis
a_G	-	Grenzaufweitverhältnis
a_l	m²/s	Temperaturleitfähigkeit
b_{RZ}	mm	Beeinflusste Randzone
c_p	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität
d_0	mm	Vorlochdurchmesser
d_1	mm	Ziehstempeldurchmesser
d_2	mm	Krageninnendurchmesser
d_A	mm	Außendurchmesser
d_F	mm	Fokusdurchmesser
d_G	mm	Durchmesser der Erwärmungsgeometrie

d_I	mm	Innendurchmesser
d_K	mm	Kreisdurchmesser
d_M	mm	Matrizenöffnungsdurchmesser
d_S	mm	Schneidstempeldurchmesser
h	mm	Kragenhöhe
h_a	mm	Kragenhöhe Außen
h_B	mm	Bruchflächenhöhe
h_E	mm	Kanteneinzughöhe
h_G	mm	Schnittgrathöhe
h_m	mm	Mantelflächenhöhe
h_S	mm	Glattschnitthöhe
k_f	MPa	Fließspannung
l_K	mm	Werkzeuglänge Kragenzugmodul
l_L	mm	Werkzeuglänge für die Lasererwärmung
l_V	mm	Werkzeuglänge Vorbearbeitungsmodul
n	-	Anzahl Überläufe
r_F	mm	Radius des Laserfokus
r_M	mm	Matrizenradius
r_{ST}	mm	Ziehstempelradius
s	mm	Blechdicke
s_0	mm	Ausgangsblechdicke
t	s	Erwärmungsdauer
$t_{8/5}$	s	Abkühldauer von 800 °C auf 500 °C
t_i	s	Startwert der Erwärmungsdauer
t_{max}	s	Maximale Erwärmungsdauer
t_{min}	s	Minimale Erwärmungsdauer
t_n	s	Zeit pro Überlauf
u	mm	Schneidspalt
u_z	mm	Ziehspalt
v_a	K/s	Aufheizgeschwindigkeit
v_B	mm/s	Vorschubgeschwindigkeit
v_{krit}	K/s	Kritische Abkühlgeschwindigkeit