Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Durchsetzfugeverbindungen an Aluminiumwerkstoffen

Von der Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Chemnitz
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Dirk Thieme
aus Treuen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Matthes
Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel
Prof. Dr.-Ing. habil. H. Herold

Tag der mündlichen Prüfung: 26. November 1999
Tag der Verteidigung: 07. Dezember 1999

Schriftenreihe Fügechnik / Schweißtechnik

Band 1/2000

Dirk Thieme

**Verbesserung
der mechanischen Eigenschaften
von Durchsetzfugeverbindungen
an Aluminiumwerkstoffen**

Shaker Verlag
Aachen 2000

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Thieme, Dirk:

Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Durchsetzfugeverbindungen an Aluminiumwerkstoffen / Dirk Thieme.

- Als Ms. gedr. - Aachen : Shaker, 2000

(Schriftenreihe Fügetechnik / Schweißtechnik ; Bd. 2000, 1)

Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 1999

ISBN 3-8265-7069-3

Copyright Shaker Verlag 2000

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

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISBN 3-8265-7069-3

ISSN 1434-7393

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen eines vom Sächsischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst geförderten Landesinnovationsstipendiums an der Professur Schweißtechnik der Technischen Universität Chemnitz.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter der Professur Schweißtechnik, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Matthes, der mit seinem großen Interesse für innovative Forschungsarbeiten sowie durch sein beispielloses Engagement die Realisierung der Dissertation ermöglichte.

Dem Freistaat Sachsen möchte ich für die finanzielle Unterstützung während meiner Zeit als Forschungsstudent an der Technischen Universität Chemnitz ebenfalls meinen besonderen Dank aussprechen.

Für die objektive Begutachtung und Durchsicht der Dissertation möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H. Herold danken.

Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. L. W. Meyer dafür danken, daß die für das Gelingen der Dissertation notwendigen praktischen Versuche in seinen Versuchslaboren durchgeführt werden konnten.

Mein Dank gilt auch jenen Personen, die mich während meiner Promotionszeit direkt oder indirekt unterstützt haben.

Treuen, im Januar 2000

Dirk Thieme

Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen, Abkürzungen, Symbole	IV
1	Einleitung	1
2	Durchsetzfügen von Aluminiumwerkstoffen	3
2.1	Aluminium – Eigenschaften und Anwendung	3
2.1.1	Eigenschaften	3
2.1.2	Anwendung	4
2.2	Durchsetzfügen	8
2.2.1	Begriffsbestimmung	8
2.2.2	Wirkprinzip der Kraftübertragung	11
2.2.3	Eigenschaften und Anwendungsbereiche von Durchsetzfüge- verbindungen	14
2.2.4	Eigenschaften kombinierter Durchsetzfügeverbindungen	17
3	Durchsetzfügen in Kombination mit Kaltpreßschweißen an Aluminium	20
3.1	Kaltpreßschweißen	20
3.1.1	Allgemeines	20
3.1.2	Theoretische Betrachtungen über den Bindemechanismus beim Kaltpreßschweißen	21
3.1.3	Schweißbare Werkstoffe	24
3.1.4	Oberflächenvorbehandlung als Voraussetzung zum Fügen	26
3.1.4.1	Mechanische Oberflächenvorbehandlungsverfahren	28
3.1.4.2	Chemische Oberflächenvorbehandlungsverfahren	28
3.2	Durchsetzfügen in Kombination mit Kaltpreßschweißen	29
3.2.1	Verfahrenstechnische Voraussetzungen	29
3.2.2	Eigenschaften von Durchsetzfüge-Kaltpreßschweiß-Verbindungen	30
3.3	Theoretische Betrachtungen zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Durchsetzfüge-Kaltpreßschweiß-Verbindungen	33
3.3.1	Kriterien der Fügbarkeit von Bauteilen aus Aluminiumblechlegierungen mit Durchsetzfüge-Kaltpreßschweiß-Verbindungen	33
3.3.2	Theoretische Betrachtungen zur Optimierung des Herstellungs- prozesses und der Verbindungsfestigkeiten von Durchsetzfüge-Kalt- preßschweiß-Verbindungen	36
3.3.2.1	Anforderungen an den Oberflächenzustand der zu fügenden Bleche	36

3.3.2.2	Anforderungen an die geometrische Ausbildung der Verbindung	38
3.3.2.3	Auswahl eines Optimierungsverfahrens	40
4	Versuchsplanung, Versuchsdurchführung, Auswert- und Prüfmethoden	43
4.1	Versuchsplanung	43
4.1.1	Methodik	43
4.1.1.1	Grundlagenuntersuchungen	43
4.1.1.2	Optimierung der Fügeparameter und der Verbindungsfestigkeiten	44
4.1.2	Versuchswerkstoffe	48
4.1.3	Probengeometrien	48
4.2	Versuchsdurchführung	50
4.3	Auswert- und Prüfmethoden	51
4.3.1	Ausbildung der Durchsetzfügeverbindungen	52
4.3.2	Charakterisierung des Oberflächenzustandes der zu fügenden Bleche	52
4.3.2.1	Oberflächenrauheit	52
4.3.2.2	Übergangswiderstand	53
4.3.2.3	Oberflächenfeingestalt	53
4.3.3	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften	53
4.3.3.1	Statische Festigkeit	53
4.3.3.2	Dynamische Festigkeit	54
4.3.3.3	Schlagartige Beanspruchung	55
5	Untersuchungen zum Einfluß verschiedener Kenngrößen auf die Herstellung von Durchsetzfüge-Kaltpreßschweiß-Verbindungen	56
5.1	Oberflächenzustand der zu fügenden Bleche	56
5.1.1	Oberflächenrauheit, Übergangswiderstand und Oberflächenfeingestalt	56
5.1.2	Geometrische Ausbildung der Verbindungen	60
5.1.3	Fügekraft	65
5.2	Mechanische Eigenschaften	68
5.2.1	Einfluß des Oberflächenzustandes der zu fügenden Bleche auf die Übertragbarkeit von Scher- und Kopfgzugkräften	68
6	Optimierung des Durchsetzfügens für die Herstellung von Durchsetzfüge-Kaltpreßschweiß-Verbindungen	72
6.1	Einfluß der Werkzeuggeometrie	72
6.1.1	Stempeldurchmesser	72
6.1.2	Matrizentiefe	75

6.1.3	Stegdickte	78
6.2	Auswahl optimaler Fügeparameter	83
7	Mechanische Eigenschaften von Durchsetzfüge-Kaltpreßschweiß-Verbindungen	85
7.1	Statische Festigkeit	85
7.2	Dynamische Festigkeit	91
7.3	Schlagartige Beanspruchung	93
8	Technologische Hinweise zum Fügen von Bauteilen und Baugruppen mit Durchsetzfüge-Kaltpreßschweiß-Verbindungen	97
8.1	Fügbarekeit mit Durchsetzfüge-Kaltpreßschweiß-Verbindungen	97
8.2	Fügeeignung des Werkstoffes	97
8.3	Fügesicherheit der Konstruktion	98
8.4	Fügemöglichkeit der Fertigung	99
9	Zusammenfassung	101
10	Literaturverzeichnis	104
11	Abbildungsverzeichnis	119
12	Tabellenverzeichnis	123
Anlage 1	Bezeichnung, mechanische Kennwerte und chemische Zusammensetzung der Versuchswerkstoffe	124
Anlage 2	Berechnungsalgorithmus des Versuchsplanes	126
Anlage 3	Herstellerkenngrößen der Durchsetzfügewerkzeuge und -verbindungen	132
Kurzfassung		133

Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole

Symbol	Einheit	Benennung
A_K	%	kaltpreßverschweißte Fläche
$A_{80/10}$	%	Bruchdehnung
a	mm	Halsdicke
B	-	Bestimmtheitsmaß
b	mm	Hinterschnitt
b_i	-	Koeffizienten der Regressionsgleichung
b_0	-	Absolutglied der Regressionsgleichung
c	-	Anzahl der Realisierungen der Zielgröße im Versuchspunkt
C	kN mm ⁻¹	Steifigkeit
D_K	mm	Gitterkonstantendifferenz
d_M	mm	Matrizendurchmesser
d_S	mm	Stempeldurchmesser
E	N mm ⁻²	Elastizitätsmodul
ET	mm	Eindringtiefe
E_i	-	Haupt- bzw. Wechselwirkung
$\varepsilon_{\dot{u}}$	%	Maß des Verformungsgrades beim Kaltpreßüberlappschweißen
FEM		Finite Elemente Methode
FG	-	Freiheitsgrad
F_D	kN	Druckkraft
F_F	kN	Fügekraft
F_{FB}	kN	Faltenbeulkraft
F_K	kN	Kopfzugkraft
F_N	kN	Normalkraft
F_O	kN	Oberkraft
F_{PR}	kN	Prüfkraft
F_S	kN	Scherzugkraft
F_U	kN	Unterkraft
F_a	kN	Kraftamplitude
F_{mk}	kN	Höchstkopfzugkraft
F_{ms}	kN	Höchstscherzugkraft
$F_{\text{prüf}}$	N	Prüfkraft
$F_{p0,2}$	kN	Streckgrenzkraft
F_x	kN	Kraft in x-Richtung

F_y	kN	Kraft in y-Richtung
F_z	kN	Kraft in z-Richtung
f	Hz	Frequenz
f_{ges}	-	Gesamtfehler
G	mm	Gitterkonstante
I_M	A	Meßstromstärke
k	-	Neigungsexponent der Wöhlerlinie
k_{fz}	-	kubisch-flächenzentriert
L_{Bruch}	mm	Längenänderung bis zum Bruch
L_M	mm	Meßlänge
L_T	mm	Abtastlänge
l	mm	Meßlänge
l_E	mm	freie Einspannlänge
MT	mm	Matrizentiefe
M_x	Nm	Moment um die x-Achse
M_y	Nm	Moment um die y-Achse
M_z	Nm	Moment um die z-Achse
N	-	Anzahl der Versuche
N	-	Schwingspielzahl
N_D	-	Grenzschwingspielzahl
N_i	-	Einzelwert der Grundgesamtheit
N_{50}	-	Mittelwert der Grundgesamtheit
n	-	Probenanzahl
$P_{\bar{U}}$	%	Überlebenswahrscheinlichkeit
R	-	Lastverhältnis
$R_{\bar{U}}$	$\mu\Omega$	Übergangswiderstand
R_m	$N\text{ mm}^{-2}$	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	$N\text{ mm}^{-2}$	Dehngrenze
R_z	μm	Rauhtiefe
r_{SA}	mm	Außenradius des stempelseitigen Bleches
r_{SI}	mm	Innenradius des stempelseitigen Bleches
r_{TN}	μm	Tastnadelradius
SQ	-	Quadratsumme
ST	mm	Stegdicke
S_v^2	-	Versuchsstreuung
ΔST	mm	Stegdickentoleranz
s_v	mm	Verformungsweg
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur

TOX	-	TOX-Fügen
t	-	Wert der t-Verteilung
t	mm	Blechdicke
t	min	Zeit
t _{Folie}	µm	Foliendicke
t _O	µm	Oxidschichtdicke
t _{SCH}	nm	Schichtdicke
t _{ges}	mm	Gesamtlechdicke
VW	-	Verbindungswertigkeit
v	%	Varianz
v _z	mm min ⁻¹	Zuggeschwindigkeit
W _B	Nm	Brucharbeit
W _V	J	Verformungsarbeit
x _i	-	kodierte Variable der Regressionsgleichung
$\bar{y}$	-	Mittelwert aller Versuche
$\hat{y}_i$	-	berechneter Wert nach der Regressionsgleichung für den i-ten Versuchspunkt
y _i	-	Wert des Versuches für den i-ten Versuchspunkt