

Beitrag zur Ermittlung der Beanspruchbarkeit von Schrauben aus Aluminium-Legierungen

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Uwe Arz

aus Agnetheln

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. C. Berger
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. H. Hanselka
Tag der Einreichung: 01.07.2003
Tag der mündlichen Prüfung: 25.11.2003

Darmstadt 2003

Berichte aus der Werkstofftechnik
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Christina Berger

Band 2/2004

Uwe Arz

**Beitrag zur Ermittlung der Beanspruchbarkeit
von Schrauben aus Aluminium-Legierungen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2004

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2003

Copyright Shaker Verlag 2004

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2729-6

ISSN 1617-3805

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde der Technischen Universität Darmstadt. Grundlegende Teilergebnisse dieser Arbeit wurden während dieser Zeit auszugsweise vorveröffentlicht.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern und meiner Frau für die stetige und notwendige Unterstützung.

Der Leiterin des Fachgebiets und Instituts für Werkstoffkunde und der Staatlichen Materialprüfungsanstalt Darmstadt, Frau Prof. Dr. – Ing. C. Berger möchte ich für die Betreuung und die Förderung der Arbeit sowie für die Übernahme der Berichterstattung danken.

Herrn Prof. Dr. – Ing. H. Hanselka danke ich für die Übernahme der Mitberichterstattung.

Herrn Dr. B. Kaiser und Herrn Dr. R. Landgrebe möchte ich für die vielfältigen Fragestellungen und Anregungen in den Abteilungen Bauteilfestigkeit und Metalle sowie für das angenehme Arbeitsumfeld danken.

Herrn U. Kremer danke ich für die freundschaftliche Zusammenarbeit und für die zahlreichen konstruktiven Diskussionen.

Herrn W. Schüttler, Herrn M. Lyschik, Herrn W. Klinger, Frau N. Uhl, Herrn H. Jarczyk und Herrn M. Faulstich möchte ich für die angenehme und hilfreiche Unterstützung sowie für die Durchführung der mechanisch technologischen Prüfungen danken.

Die Arbeit enthält Forschungsergebnisse, die durch Mittel der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) und des Deutschen Schraubenverbands e. V. (DSV) gefördert wurde.

Dem Arbeitskreis „Gemeinschaftsforschung“ des Deutschen Schraubenverbands möchte ich an dieser Stelle für die regen und aufschlussreichen Diskussionen danken.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Weiterstadt, im April 2003

A handwritten signature in black ink, consisting of the name 'Uwe Arz' written in a cursive style. The signature is positioned to the right of the text 'Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.'

Für
Jan Laurin,
Nick Marlon und
Lara Sofie

Inhaltsverzeichnis

Formelverzeichnis	v
1. Einleitung / Intension	1
2. Stand der Technik	5
2.1 Aluminium und Aluminiumlegierungen	5
Lösungsglühen	9
Abkühlen	10
Auslagern	10
2.2 Schrauben und Schraubenverbindungen	15
3. Eigene Untersuchung	22
3.1 Untersuchte Verbindungselemente	22
3.2 Statische Zugbeanspruchung	25
Einleitung	25
Versuchsführung	26
3.2.1 Zugversuche an abgedrehten Schrauben	27
3.2.2 Zugversuche an Schrauben	28
3.2.3 Schrägzugversuche an ganzen Schrauben	29
Ergebnis der Untersuchung	30
Einfluss der freien belasteten Gewinde auf die Zugfestigkeit	34
Fazit	36
3.3 Arbeitsvermögen von Schrauben	37
Einleitung	37
3.3.1 Schlagzugversuche	38
Ergebnis der Untersuchung	39
3.3.2 Zugversuche	44
Fazit	48
3.4 Flächenpressung	49
Einleitung	49
Durchführung der Versuche	51
Ergebnisse	54
Druckversuche bei RT	54
Druckversuche bei mäßig erhöhten Temperaturen:	55
Auswirkungen von Fasen auf die Flächenpressung	58
Fazit	59

3.5	Torsionsbeanspruchung	60
	Einleitung	60
	Torsionsversuch an abgedrehten und an ganzen Schrauben	61
3.5.1	Einfluss der freien belasteten Gewindegänge auf das Bruchdrehmoment	62
3.5.2	Ermittlung des effektiven Querschnitts	64
3.5.3	Bestimmung der Zugfestigkeit aus einem Torsionsversuch	69
	Fazit	72
3.6	Untersuchung des Relaxationsverhaltens	73
	Einleitung	73
	Versuche	77
	Ergebnis der Untersuchung	81
	Fazit	87
3.7	Schwingfestigkeit	88
	Einleitung	88
	Ergebnisse der Untersuchung	90
3.7.1	Einfluss der Mittelspannung	94
3.7.2	Einfluss der Mutternachgiebigkeit	95
3.7.3	Einfluss der Prüffrequenz	97
3.7.4	Einfluss einer Auslagerungstemperatur	100
3.7.5	Einfluss von leichten Gusschrägen	103
3.7.6	Bruchhäufigkeitsverteilung	104
	Fazit	108
3.8	Scherfestigkeit	109
	Einleitung	109
	Versuchsdurchführung / Ergebnis	110
	Fazit	112
3.9	Ermittlung der Mindesteinschraubtiefe	113
	Einleitung	113
	Mindesteinschraubtiefe	115
	Ergebnis	116
	Berechnung der Mindesteinschraubtiefe	117
	Fazit	119

3.10	Einfluss der Auslagerungstemperatur auf die mechanischen Eigenschaften	120
	Einleitung	120
3.10.1	Einfluss der Auslagerungstemperatur auf die Zugfestigkeit	121
3.10.2	Einfluss der Auslagerungstemperatur auf die Torsionsfestigkeit	123
	Fazit	124
4.	Begleitende Untersuchung	125
4.1	Schrauben	125
	Härteprüfung	125
	Metallografische Untersuchung	126
	Ermittlung der Abmaße	126
	Reibungszahlen	128
4.2	Gegenlagen	129
	Mechanische Eigenschaften	129
	Ermittlung der Abmaße	131
5.	Zusammenfassung	133
6.	Ausblick	135
7.	Literatur	136
	Literatur zu	136
	Kapitel 1	136
	Kapitel 2	137
	Kapitel 3	139
	Kapitel 4	143
Anhang		145
	Abmaße / ABM	145
	1. Ergebnisse der Abmaße an Schrauben	145
	2. Ergebnisse der Abmaße an Buchsen	145
	Schwingfestigkeitsuntersuchung / DFU	146
	Funkenemissionsspektralanalyse / FES	147
	Metallografie / MET	151
	Mikrohärteverlauf / MHV	159
	Relaxationsuntersuchung / REL	162
	Scherversuche / SEV	168
	1. Ergebnisse der Scherversuche an Schrauben	168
	2. Ergebnisse der Scherversuche an Gegenlagen	168

Schlagzugversuche / SZV	169
1. Ergebnisse der Schlagzugversuche an Aluminium - Schrauben	169
2. Ergebnisse der Schlagzugversuche an Schrauben aus Eisenlegierungen	170
Torsionsversuche / TOV	170
1. Ergebnisse der Torsionsversuche an abgedrehten Schrauben	170
2. Ergebnisse der Torsionsversuche an Schrauben	171
Zugfestigkeitsuntersuchung / ZUV	172
1. Ergebnisse der Zugversuche an abgedrehten Schrauben	172
2. Ergebnisse der Zugversuche an Schrauben	174
3. Ergebnisse der Zugversuche an Gegenlagen	176
4. Ergebnisse der Zugversuche an Schrauben aus Eisenlegierungen (zu Kap. 3.3)	178

Formelverzeichnis

Zeichen	Begriff	Dimension
A, A_5	Bruchdehnung	%
A_0	Schaftquerschnitt bei abgedrehten Schrauben	mm^2
A_S	Spannungsquerschnitt allgemein	mm^2
$A_{S,n}$	Nennspannungsquerschnitt	mm^2
A_{d3}	Kernquerschnitt des Bolzens	mm^2
A_P	Projizierte Fläche	mm^2
D	Außendurchmesser der Mutter	mm
D_1	Kerndurchmesser der Mutter	mm
D_2	Flankendurchmesser der Mutter	mm
E	E-Modul	N/mm^2
F	Kraft allgemein	N
F	Prüffrequenz	Hz
$F_{0,2}$	Kraft an der 0,2 % Dehngrenze	N
F_B	Betriebskraft	N
F_{SA}	Schraubenzusatzkraft	N
F_{KR}	Restklemmkraft	N
F_M	Montagevorspannkraft	N
F_v	Vorspannkraft	N
$\Delta F_{v,th}$	thermisch bedingte Schraubenkraftänderung	N
F_{max}	Maximalkraft	N
H	Höhe des Profildreiecks	mm
H_1	Flankenüberdeckung	mm
HB	Härte Brinell	---
I	Flächenträgheitsmoment	mm^4
M_A	Anzugsmoment	Nm
M_B	Bruchdrehmoment	Nm
$M_{B,S}$	Bruchdrehmoment der Schraube	Nm
M_G	Gewindereibmoment	Nm
M_K	Kopfreibmoment	Nm
M_{GST}	Nutzdrehmoment	Nm

M_T	Torsionsmoment	Nm
N_G	Grenzwahrszahl	---
P	Steigung	mm
R	Radius	mm
R_m	Zugfestigkeit	N/mm ²
$R_{m,K}$	Zugfestigkeit des Kerbstabs	N/mm ²
$R_{m,S}$	Zugfestigkeit der Schraube auf den effektiven Querschnitt bezogen	N/mm ²
$R_{m,n}$	Zugfestigkeit der Ganzschraube auf den Nennquerschnitt bezogen	N/mm ²
$R_{p0,2}$	0,2 % Dehngrenze	N/mm ²
$R_{P0,2-n}$	0,2 % Dehngrenze der Schraube auf den Nennquerschnitt bezogen	N/mm ²
R_S	Festigkeitsverhältnis	---
RT	Raumtemperatur	ca. 21 °C
SG	schlussgewalzt	---
SW	schlusswärmebehandelt	---
SW	Schlüsselweite	mm
T	Zeit	s
ΔT	Zeitinkrement	s
TTF	Torque Tension Fluid (Schmiermittel)	---
W	Arbeit allgemein	J
W_S	Arbeitsvermögen (im kontinuierlichen Versuch ermittelt)	J
W_Z	Schlagzugarbeit	J
W_P	polares Widerstandsmoment	mm ³
X	Festigkeitsverhältnis allgemein	---
X_T	Torsionsfestigkeitsverhältnis	---
Z	Brucheinschnürung	%
c	Federsteifigkeit	N/mm
d	Nenn Durchmesser der Schraube	mm
d_a	Außendurchmesser Hülsen / Mutterkörper	mm
d_0	Schaftdurchmesser bei abgedrehten Schrauben	mm
d_2	Flankendurchmesser der Schraube	mm
d_3	Kerndurchmesser der Schraube	mm
d_h	Bohrungsdurchmesser der verspannten Teile	mm
d_s	Spannungsdurchmesser	mm

d_w	Auflagedurchmesser der ebenen Kopfauf­fläche der Schraube	mm
d_x	gesuchter Torsions-Durchmesser	mm
f	Frequenz	Hz
f_S	Schraubenlänge	mm
f_P	Verkürzung der verspannten Platten	mm
h	Höhe allgemein	mm
h	Schrittweite	---
h_3	Gewindetiefe	mm
l_a	Länge des verspannten ausgelagerten Bauteils	mm
l_{a0}	Länge des entspannten ausgelagerten Bauteils	mm
l_{Gew}	freie belastete Gewindelänge	mm
l_K	Klemmlänge	mm
l_{pl}	plastische Längung	mm
l_0	Ausgangslänge der Schraube	mm
l_u	Bruchlänge der Schraube	mm
l_V	Länge des verspannten Bauteils	mm
Δl	Bruchverlängerung	mm
m_{kr}	kritische Einschraubtiefe	mm
n	Stichprobenumfang	---
n	Anzahl Gewindegänge	---
n	Anzahl Stützstellen	---
p_G	Grenzflächen­pression	N/mm ²
$p_{0,02}$	Pressung bei 0,02 mm plastischer Eindrücktiefen	N/mm ²
$p_{0,1}$	Pressung bei 0,1 mm plastischer Eindrücktiefen	N/mm ²
$p_{0,2}$	Pressung bei 0,2 mm plastischer Eindrücktiefen	N/mm ²
s	Standardabweichung	[]
t	Tiefe allgemein	mm
t	Zeit	s
v	Geschwindigkeit	m/s
v_Z	Ziehgeschwindigkeit	m/s
ϑ	Temperatur	°C
$\Delta\vartheta$	Temperaturinkrement	°C
ϕ	Kraftverhältnis	---
α_K	Formzahl	---

α_K^*	Formzahl für kraftgebundene Flanken	---
α_T	thermischer oder linearer Wärmeausdehnungskoeffizient allgemein	K^{-1}
α_{St}	Wärmeausdehnungskoeffizient für Stahl	K^{-1}
α_{Alu}	Wärmeausdehnungskoeffizient für Aluminium	K^{-1}
α_{Mg}	Wärmeausdehnungskoeffizient für Magnesium	K^{-1}
γ_K	Kerfbzugverhältnis	---
δ	Nachgiebigkeit allgemein	mm/N
δ_P	Nachgiebigkeit der Platte	mm/N
δ_S	Nachgiebigkeit der Schraube	mm/N
ε	Dehnung	---
$\dot{\varepsilon}$	Dehngeschwindigkeit	s^{-1}
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
μ_{ges}	Gesamtreibungszahl	---
μ_G	Gewindereibungszahl	---
μ_K	Kopfreibungszahl	---
ρ	Dichte	g/cm^3
σ_a	Spannungsamplitude	N/mm ²
σ_{A50}	Schwingfestigkeit bei 50% Ausfallwahrscheinlichkeit	N/mm ²
$\sigma_{A50^{10 Mio}}$	Schwingfestigkeit bei 50% Ausfallwahrscheinlichkeit und einer Grenzschwingspielzahl von 10^7	N/mm ²
σ_m	Mittelspannung	N/mm ²
σ_v	Vergleichsspannung	N/mm ²
σ_X	Normalspannung	N/mm ²
τ_B	Scherfestigkeit	N/mm ²
τ_{B3}	Scherfestigkeit der Schraube (auf den Kernquerschnitt bezogen)	N/mm ²
τ_T	Torsionsfestigkeit	N/mm ²
$\tau_{T,S}$	Torsionsfestigkeit der Schraube	N/mm ²
ω	Kreisfrequenz	s^{-1}