

Markus Krömer

Entstehung von Spanaufschweißungen beim Trockenwälzfräsen



Entstehung von Spanaufschweißungen beim Trockenwälzfräsen

Formation of Chip Weldings in Dry Gear Hobbing

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Markus Krömer

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: 12. April 2019

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Markus Krömer

Entstehung von Spanaufschweißungen beim Trockenwälzfräsen

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 46/2019



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.

Markus Krömer:

Entstehung von Spanaufschweißungen beim Trockenwälzfräsen

1. Auflage, 2019

Apprimus Verlag, Aachen, 2019

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

ISBN 978-3-86359-800-6

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2019)

Kurzzusammenfassung

Das Wälzfräsen ist ein hochproduktives Fertigungsverfahren zur Herstellung außenverzahnter Zylinderräder. Seit der Einführung des Trockenwälzfräsens hat es in vielen Anwendungen die Nassbearbeitung verdrängt und ist Stand der Technik. Obwohl das Verfahren etabliert ist, kommt es in der Praxis immer wieder zu Beanstandungen der Bauteilqualität. Die Fehlerhaftigkeit der Bauteile wird dabei mit der Ausbildung von Oberflächendefekten, insbesondere Spanaufschweißungen, begründet. Trotz langjähriger Erfahrungen und intensiver Forschungsaktivitäten im Bereich des Trockenwälzfräsens liegen bislang keine verlässlichen wissenschaftlich fundierten Erkenntnisse zur Ausbildung von Spanaufschweißungen vor. Ziel dieser Arbeit ist somit die Analyse der Entstehung von Spanaufschweißungen beim Trockenwälzfräsen.

Im ersten Schritt werden dazu empirische Versuche im seriennahen Wälzfräsprozess durchgeführt und die auftretenden Spanaufschweißungen dokumentiert und klassifiziert. Anschließend erfolgt im Rahmen von umfangreichen wissenschaftlichen Versuchen im Schlagzahnprozess eine genauere Analyse der Entstehungsmechanismen von Spanaufschweißungen.

Im zweiten Schritt wird ein analytisch-numerisches Modell der Spanbildung von Mehrflankenspänen, wie sie beim Wälzfräsen auftreten, entwickelt. Das Modell erlaubt es, auf Basis einer geometrischen Durchdringungsrechnung und weniger empirischer Faktoren, die Spanbildung beim Wälzfräsen zu simulieren. Mithilfe des entwickelten Modells kann die Spanbildung hinsichtlich der Entstehung von Spanaufschweißungen detailliert analysiert werden.

Anhand der Ergebnisse der Arbeit kann die Entstehung von Spanaufschweißungen besser erklärt werden. Durch den Wissensgewinn lassen sich Spanaufschweißungen beim Trockenwälzfräsen reduzieren und letztlich Ausschuss vermeiden. Zudem wurde durch das entwickelte Spanbildungsmodell die Möglichkeit umfangreicher Analysen von Wälzfräsprozessen geschaffen.

Abstract

Gear hobbing is a high productive machining process for the manufacturing of external cylindrical gears. Since the introduction of dry hobbing, it has replaced wet machining in many applications and is the state of the art. Although the process is well established, in practice there are frequent complaints about workpiece quality. Defects in the components are caused by the formation of surface defects, in particular chip weldings. Despite many years of experience and intensive research activities in the field of dry hobbing, there are no reliable scientifically based findings on the formation of chip welds. The objective of this thesis is therefore the analysis of the formation of chip weldings during dry hobbing.

In the first step, empirical tests will be carried out in a near-series hobbing process and the chip weldings that occur will be documented and classified. Subsequently, a more precise analysis of the formation mechanisms of chip weldings is carried out in comprehensive scientific tests in the fly cutting process.

In the second step, an analytic-numerical model of the chip formation of multi-flank chips, as they occur during gear hobbing, is developed. The model allows the simulation of chip formation during gear hobbing based on a geometric penetration calculation and few empirical factors. With the help of the developed model, the chip formation can be analyzed in detail regarding the formation of chip weldings.

The results of the work can be used to explain the formation of chip welds better. As a result of the knowledge gained, chip weldings during dry hobbing can be reduced and ultimately waste can be avoided. In addition, the developed chip formation model makes it possible to carry out extensive analyses of gear hobbing processes.

Inhaltsverzeichnis

Content

Kurzzusammenfassung	V
Abstract	VI
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik in Forschung und Industrie	5
2.1 Spanende Fertigungsverfahren zur Herstellung von Stirnrädern	6
2.2 Wälzfräsen von Verzahnungen	8
2.2.1 Verfahrenskinematik	8
2.2.2 Trockenwälzfräsen	13
2.2.3 Das Werkzeugsystem beim Wälzfräsen	15
2.3 Simulation der Zahnradfertigung mit geometrisch bestimmter Schneide	20
2.3.1 Fertigungssimulation für das Wälzfräsen SPARTapro	21
2.3.2 Weitere geometrische Durchdringungsrechnungen	22
2.3.3 Zerspansimulation auf Basis der Methode Finiter Elemente	23
2.4 Oberflächendefekte beim Wälzfräsen	25
2.5 Fazit und Ableitung des Forschungsbedarfs	30
3 Zielsetzung, Aufgabenstellung und Vorgehensweise	33
4 Relevanz von Spanaufschweißungen bei Verzahnungen	35
4.1 Einfluss auf die Einsatzhärte tiefe	37
4.2 Einfluss auf nachfolgende Fertigungsschritte	39
4.3 Fazit zum Einfluss der Spanaufschweißungen	40
5 Entstehung von Spanaufschweißungen im Wälzfräsprozess	41
5.1 Auswahl eines Versuchsprozesses	41
5.2 Auftreten von Spanaufschweißungen im Wälzfräsversuch	43
5.2.1 Charakterisierung des Werkzeugs	43
5.2.2 Vorgehensweise und Versuchsplan in den Wälzfräsversuchen	44
5.2.3 Übersicht über die Versuchsergebnisse	45
5.2.4 Einfluss der Werkzeugstandzeit	48
5.2.5 Einfluss der Spanungsdicke	52
5.2.6 Einfluss der Schnittgeschwindigkeit	53
5.2.7 Einfluss der Prozessführung	53
5.3 Fazit zum Auftreten von Spanaufschweißungen im Wälzfräsen	57
6 Untersuchung von Spanaufschweißungen im Analogieversuch	59
6.1 Definition eines geeigneten Analogieversuchs	59
6.1.1 Entstehung von Spanaufschweißungen auf den Zahnflanken	62
6.1.2 Entstehung von Spanaufschweißungen im Zahnfuß	75
6.1.3 Einfluss der Werkzeugmaschine	76

6.2	Fazit der Ursachenanalyse.....	79
7	Entwicklung eines Modells zur Analyse von Spanaufschweißungen.....	81
7.1	Simulation der Spanungsgeometrien in einer Durchdringungsrechnung	81
7.1.1	Simulation des Spanflusses	84
7.1.2	Simulation der Spanverformung	86
7.2	Modell der Spanbildung auf Basis von SPARTAPRO.....	89
7.3	Zwischenfazit der Modellbildung	95
7.4	Anwendung des Spanbildungsmodells auf den Beispielprozess.....	96
8	Strategien zur Vermeidung von Spanaufschweißungen	99
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	105
10	Literaturverzeichnis.....	111

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

Lateinische Formelzeichen

b_2	mm	Breite der Verzahnung
C	$1/m^3$	Teilchenzahldichte
D	m^2/s	Diffusionskoeffizient
d_{a0}	mm	Außendurchmesser des Werkzeugs
f_a	mm	Axialer Vorschub
f_r	mm	Radialer Vorschub
f_t	mm	Tangentialvorschub
$h_{cu,max}$	mm	Maximale Spannungsdicke
h_{max}	mm	Maximale Höhe
HV	-	Härte nach Vickers
HV0,1	-	Härte nach Vickers mit einer Prüfkraft von 0,1 Kilopond
J	$1/(m^2 \cdot s)$	Diffusionsstromdichte
K	-	K-Faktor für die Schneidkantenlage
k_c	$(N \cdot mm)/mm^3$	Umgewandelte spezifische Energie in der Zerspanung
k_{el}	$(N \cdot mm)/mm^3$	Spezifische Energie bedingt durch Eigenspannungen
k_f	MPa	Fließspannung
k_Y	$(N \cdot mm)/mm^3$	Spezifische Reibungsenergie
k_M	$(N \cdot mm)/mm^3$	Spezifische Energie durch Stoffumlenkung
k_T	$(N \cdot mm)/mm^3$	Spezifische Trennungsenergie
k_ϕ	$(N \cdot mm)/mm^3$	Spezifische Umformenergie
K_{ges}	€	Gesamtkosten
K_{WA}	€	Wiederaufbereitungskosten
K_{WZG}	€	Werkzeugkosten
l_{AZ}	mm	Arbeitsbereich
l	mm	Länge der Messstrecke
m_n	mm	Normalmodul
n_{i0}	-	Werkzeuggangzahl
p_x	mm	Axiale Steigung des Werkzeugs

q	-	Symmetriefaktor nach Stuckenberg [STUC14]
r	μm	Schneidkantenradius
R_a	μm	Arithmetischer Mittenrauwert
R_z	μm	Gemittelte Rautiefe
s	mm	Aufmaß
t_t	s	Taktzeit
v_c	m/min	Schnittgeschwindigkeit
x	m	Weglänge
z_2	-	Zähnezahl des Zahnrades

Griechische Formelzeichen

α	Grad	Eingriffswinkel
α_n	Grad	Normaleingriffswinkel
α_{n0}	Grad	Profilwinkel des Werkzeug-Bezugsprofils
α_{n2}	Grad	Normaleingriffswinkel der Verzahnung
β	Grad	Schrägungswinkel
β_2	Grad	Schrägungswinkel der Verzahnung
γ	Grad	Spanwinkel
γ_0	Grad	Steigungswinkel der Schnecke
δ_x	μm	Höhe der Vorschubmarkierungen
δ_y	μm	Höhe der Hüllschnittabweichungen
λ_h	-	Spanstauchungsfaktor in der Höhe
λ_w	-	Spanstauchungsfaktor in der Länge
μ	-	Reibwert
ρ	g/cm^3	Dichte
ρ	Grad	Reibwinkel
Σ	Grad	Achskreuzwinkel
σ_c	-	Spankrümmungsfaktor
σ_{Hlim}	MPa	Dauerfestigkeit für Flankenpressung
τ_ϕ	MPa	Scherspannung
ϕ	Grad	Scherwinkel

ω	min^{-1}	Rotationsgeschwindigkeit
ω_0	min^{-1}	Rotationsgeschwindigkeit des Werkzeugs
ω_2	min^{-1}	Rotationsgeschwindigkeit des Werkstücks

Abkürzungen

A	Auslaufende Flanke
(Al,Cr)N	Aluminiumchromnitrid
CAD	Computer Aided Design
CDC	Control Data Corporation
CPU	Central Processor Unit
CVD	Chemical Vapor Deposition
E	Einlaufende Flanke
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
HM	Hartmetall
HSS	High-Speed Steel (Schnellarbeitsstahl)
KSS	Kühlschmierstoff
MIPS	Millionen Interrupts per Second
NC	Numerical Control
PM-HSS	Pulvermetallurgisch hergestellter Schnellarbeitsstahl
PVD	Physical Vapor Deposition
TiN	Titannitrid
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
V-Kreis	V-Kreis von Verzahnungen
WC	Wolframcarbid
WS	Wälzstellung
WST	Werkstück
WZG	Werkzeug

1 Einleitung

Introduction

Aufgrund seiner hohen Wirtschaftlichkeit ist das Wälzfräsen das dominierende spanende Weichbearbeitungsverfahren zur Herstellung von außenverzahnten Stirnrädern. Seit der Einführung des TrockenwälzfräSENS in den frühen 1990er Jahren wurde im Bereich der automobilen Verzahnungsfertigung die Nassbearbeitung weitgehend verdrängt. Heutzutage ist das Trockenwälzfräsen Stand der Technik [OPH94].

Da beim Trockenwälzfräsen das Reinigen der gefräSTen Bauteile entfällt, verkürzen sich die Prozesskette und die Durchlaufzeit gegenüber der Nassbearbeitung. Gleichzeitig ist aufgrund eines geringeren Thermoschocks eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit möglich. Durch den Verzicht auf Kühlschmierstoff (KSS) werden neben den Kosten zur Anschaffung des Schmierstoffs außerdem die Folgekosten, wie die Entsorgung, die Wartung der Aufbereitungsanlage sowie Lohnkosten für deren Bedienpersonal eliminiert. Vor allem die Entsorgungskosten sind durch die mögliche Toxizität von Kühlschmierstoff hoch. Im Hinblick auf eine umweltfreundliche Fertigung ist die Vermeidung von KSS positiv zu sehen. [KNÖP96 S.13]

Obwohl das Trockenwälzfräsen etabliert ist und jahrelange Erfahrungen seitens der Maschinenhersteller und Anwender vorhanden sind, kann es in der industriellen Praxis zu Beanstandungen der Bauteilqualität kommen. Dies ist vor allem auf fehlerhafte Flankenoberflächen zurückzuführen. Derartige Defekte werden Oberflächendefekte genannt. Aufgrund der problematischen Detektierbarkeit mit ökonomisch einsetzbaren Messmitteln in der industriellen Anwendung und den oftmals hohen Folgekosten bei einer Nichterkennung eines geschädigten Bauteils sind Oberflächendefekte nicht akzeptabel [STUC14 S.23].

Zum Wälzfräsen existieren zahlreiche Arbeiten zur Prozess- und Werkzeugauslegung. Diese Arbeiten haben zumeist das Ziel, das Verschleißverhalten der Werkzeuge positiv zu beeinflussen. Dahingegen ist das Auftreten von Oberflächendefekten bisher lediglich durch Stuckenberg ausführlich behandelt worden [STUC14]. In der Arbeit wurden drei Defektarten klassifiziert und es wurden Ursachen für die Oberflächendefekte Kratzer sowie Verschmierungen erforscht. Die dritte Defektart, die Spanaufschweißungen, wurde nicht behandelt.

Kratzer und Verschmierungen stellen vorwiegend eine optische Beeinträchtigung der Zahnflanke dar. Dies kann bei einer Prozessabnahme durch einen Kunden beim Werkzeugmaschinenhersteller zu Beanstandungen führen. Insbesondere Spanaufschweißungen auf vorgefräSTen Verzahnungen können zu einer Beeinträchtigung von nachfolgenden Prozessschritten wie dem Verzahnungshonen führen. Der Grund sind lokale Spannungsdickenüberhöhungen, die zu einer Zerstörung des Honwerkzeugs führen können [VUCE08 S.15]. Zum anderen besteht die Gefahr, dass durch das unerwünschte Aufmaß in der Zahnücke die Einhärtetiefe nach der Wärmebehandlung