Tribomechanik beschichteter Zerspanwerkzeuge

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

vorgelegt von

Susanne Eva Cordes

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. h. c. Dr.-Ing. h. c. Fritz Klocke
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Konstantinos-Dionysios Bouzakis

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Oktober 2012

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Susanne Eva Cordes

Tribomechanik beschichteter Zerspanwerkzeuge

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. F. Klocke
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. G. Schuh
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 28/2012

WZL RWTH AACHEN

Fraunhofer IPT

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

Susanne Eva Cordes:

Tribomechanik beschichteter Zerspanwerkzeuge

1. Auflage, 2012

Apprimus Verlag, Aachen, 2012
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 978-3-86359-122-9

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2012)

Vorwort

Preamble

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. h. c. Dr.-Ing. h. c. Fritz Klocke, Inhaber des Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren, danke ich für die ausgezeichnete Zusammenarbeit, seine stetige Diskussionsbereitschaft und die wohlwollende Förderung meiner Arbeit. Seine fachliche und persönliche Unterstützung hat ein motivierendes Arbeitsumfeld geschafften, in dem ich sehr gerne gearbeitet habe.

Ebenso danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Konstantinos-Dionysios Bouzakis für die eingehende Durchsicht des Manuskriptes und die Übernahme des Koreferates. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes spreche ich Frau Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin meinen Dank aus.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG danke ich für Ihre Förderung im Rahmen des vierjährigen Forschungsprojektes „Nanokristalline γ-Al_2O_3-Schichten“. Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Joachim Mayer und Frau Merle Müller, M. Sc. vom Gemeinschaftslabor für Elektronenmikroskope danke ich für ihre elektronenmikroskopischen Aufnahmen und EDX-Analysen. Herrn Professor Jochen M. Schneider, Ph. D. und Frau Dipl.-Ing. Farwah Nahif vom Lehrstuhl für Werkstoffchemie danke ich für die Durchführung von XRD-Messungen.

Für seine Unterstützung bei der Durchführung der Zerspan- und Modellversuche spreche ich Wilhelm-Leo Weiss meinen Dank aus. Für seine Hilfe im Bereich der FEM-Berechnungen danke ich Dr.-Ing. Mustapha Abouridouane. Brigitte Niederbach und Maike Schröder danke ich für die metallografischen Arbeiten. Für die Durchsicht des Manuskriptes danke ich meinem Vater.

Der größte Dank gilt meinen Eltern.

Aachen, im Juli 2012 *Susanne E. Cordes*

Für meine Eltern.

Inhaltsverzeichnis

Content

Inhaltsverzeichnis I

1 Einleitung 1

2 Stand der Technik 5

2.1 Hartmetallschneidstoffe und deren Beschichtung 5
2.1.1 Hartmetall als Schneidstoff 5
2.1.2 CVD-Beschichtungsverfahren 8
2.1.3 PVD-Beschichtungsverfahren 9
2.1.4 Schichtsysteme für Zerspanwerkzeuge 10
2.2 Tribomechanik 12
2.2.1 Tribologie 12
2.2.2 Tribosystem beim Zerspanen mit beschichteten Werkzeugen 14
2.2.3 Thermomechanische Beanspruchung im Zerspanprozess 15
2.2.4 Verschleiß 20
2.2.5 Reibungsmodelle 22
2.2.6 Methoden zur Bestimmung von Reibparametern 24
2.3 Modellierung von Zerspanprozessen 26

3 Aufgabenstellung und Zielsetzung 33

4 Grundlagen der Untersuchungen 37

4.1 Werkstoffe 37
4.2 Schneidstoffe und Beschichtungen der Zerspanwerkzeuge 42
4.3 Messtechnik 44

5 Bestimmung der Eigenschaften der Schichtsysteme in Modelluntersuchungen 45

5.1 Schichtaufbau und -dicken 45
5.2 Oberflächen- und Schneidkantencharakterisierung 48
5.3 Haftfestigkeit 50
5.4 Abrasivbeständigkeit 51
5.5 Adhäsionsneigung 53
5.6 Thermische Stabilität und Diffusionsbeständigkeit 57

6 Tribologische Modellversuche 65

6.1 Reibmodellversuch 66
6.2 Versuchsergebnisse 68
6.2.1 Einfluss des Werkstoffs 68
6.2.2 Einfluss der Kinematik 70
6.2.3 Einfluss der Werkzeugbeschichtung 71
6.2.4 Einfluss der Kühlschmierung 73
6.2.5 Thermomechanische Betrachtung des Modellversuchs 74

6.3 Reib-Umform-Zerspanmodellversuch 76
6.4 Zwischenfazit zu den tribologischen Untersuchungen 78

7 Zerspanuntersuchungen....79

7.1 Zerspankräfte und -temperaturen 79
7.2 Verschleißverhalten 83
7.3 Spanformen, Spanbildung und -ablauf....86

8 FEM-Modell des Zerspanprozesses 87

8.1 Modellbildung....88
8.1.1 Zweidimensionales Modell 88
8.1.2 Dreidimensionales Modell 89
8.1.3 Thermomechanische Materialmodelle der Werkstückwerkstoffe 91
8.1.4 Thermomechanische Materialmodelle der Substrate und Beschichtungen....94
8.1.5 Mechanische und thermische Kontaktbedingungen....95

9 Ergebnisse aus den FEM-Berechnungen 97

9.1 Ergebnisse aus der zweidimensionalen Modellierung 97
9.2 Ergebnisse aus der dreidimensionalen Modellierung....99
9.2.1 Einfluss der thermischen und mechanischen Kontaktbedingungen .99
9.2.2 Einfluss der thermophysikalischen Schichteigenschaften 102
9.2.3 Einfluss auf Spanbildung und Spanart 107
9.3 Zwischenfazit zu den FEM-Berechnungen 108

10 Zusammenfassung und Ausblick....109

10.1 Zusammenfassung 109
10.2 Ausblick 110

11 Literaturverzeichnis....113

Formelzeichen und Abkürzungen

Symbols and Abbrevations

Großbuchstaben

A	mm^2	Spanungsquerschnitt
A_{reib}	mm^2	Reibfläche
BEM	-	Randelementemethode
CAD	-	engl.: Computer-aided design, rechnerunterstützte Konstruktion
CVD	-	Chemical Vapour Deposition
DEM	-	Diskrete Elemente Methode
DLC	-	engl.: Diamond-like-carbon, diamantartiger Kohlenstoff
E	$N \cdot mm^{-2}$	Elastizitätsmodul
EDX	-	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
F_c	N	Schnittkraft
FDM	-	Finite Differenzen Methode
FEM	-	Finite Elemente Methode
F_f	N	Vorschubkraft
F_n	N	Normalkraft
F_p	N	Passivkraft
F_r	N	Reibkraft
G	$N \cdot mm^{-2}$	Schubmodul
HB	-	Härte nach Brinell
HM	-	Hartmetall
HV	-	Härte nach Vickers
K_{Ic}	$M \cdot Pa \cdot m^{0,5}$	Bruchzähigkeit
KSS	-	Kühlschmierstoff
NC	-	engl.: Numerical Control, numerische Steuerung
PVD	-	Physical Vapour Deposition
Ra	µm	Mittenrauwert
REM	-	Rasterelektronenmikroskop

REM	-	Rasterelektronenmikroskop
R_m	$N \cdot mm^{-2}$	Zugfestigkeit
Rz	µm	Gemittelte Rautiefe
T	°C	Temperatur
$T_{homolog}$	°C	Homologe Temperatur
T_{sp}	°C	Spanflächentemperatur
T_{WZ}	°C	Werkzeugtemperatur
VB	µm	Verschleißmarkenbreite
VB_{max}	µm	Maximale Verschleißmarkenbreite
W	mm^3	Verschleißbetrag
XRD	-	engl.: X-Ray Diffraction, Röntgenbeugung

Kleinbuchstaben

a_e	mm	Eingriffsbreite
a_k	$J \cdot cm^{-2}$	Kerbschlagzähigkeit
a_p	mm	Schnitttiefe
c_p	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität
f	mm	Vorschub
g	-	gasförmig
h	mm	Spanungsdicke
h_{ch}	mm	Spandicke
k_f	$N \cdot mm^{-2}$	Formänderungsfestigkeit
l_c	mm	Kontaktlänge
l_h	mm	Haftlänge
m	-	Scherreibungsfaktor
r_β	µm	Schneidkantenradius
s	-	fest
t_B	min	Beanspruchungsdauer
t_c	min	Schnittzeit
t_h	h	Haltedauer
v	$m \cdot min^{-1}$	Geschwindigkeit
v_c	$m \cdot min^{-1}$	Schnittgeschwindigkeit

v_{reib}	$m \cdot min^{-1}$	Reibgeschwindigkeit

Griechische Buchstaben

α	°	Freiwinkel
α	K^{-1}	Ausdehnungskoeffizient
α	$m^2 \cdot s^{-1}$	Temperaturleitfähigkeit
β	°	Keilwinkel
γ	°	Spanwinkel
γ-Al_2O_3	-	Gamma-Phase des Aluminiumoxides
ε	-	Dehnung
ε	-	Emissionsgrad
θ	°	BRAGG-Winkel
θ	°	Kontaktwinkel
ϑ	°C	Temperatur
$\vartheta_{Schneide}$	°C	Temperatur in der Werkzeugschneide
κ	°	Einstellwinkel
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
μ	-	COULOMBs Reibungskoeffizient
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	Dichte
σ_l	$J \cdot m^{-2}$	Oberflächenspannung einer Flüssigkeit
σ_{ls}	$J \cdot m^{-2}$	Grenzflächenenergie zwischen einer Flüssigkeit und einem Festkörper
σ_n	$N \cdot mm^{-2}$	Normalspannung
σ_s	$J \cdot m^{-2}$	Freie Oberflächenenergie eines Festkörpers
σ_t	$N \cdot mm^{-2}$	Biegebruchfestigkeit
τ	$N \cdot mm^{-2}$	Scherspannung
ϕ	°	Scherwinkel