

Janis Thiermann

Abrichten von Schleifscheiben für das Hochgeschwindigkeits- schleifen



Abrichten von Schleifscheiben für das Hochgeschwindigkeitsschleifen

Dressing of Grinding Wheels for High Speed Grinding

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

vorgelegt von

Janis Thiermann

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke
Assistant Professor Dr.-Ing. Barbara S. Linke

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Oktober 2016

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Janis Thiermann

Abrichten von Schleifscheiben
für das Hochgeschwindigkeitsschleifen

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 34/2016



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.

Janis Thiermann:

Abrichten von Schleifscheiben für das Hochgeschwindigkeitsschleifen

1. Auflage, 2016

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Apprimus Verlag, Aachen, 2016
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 978-3-86359-481-7

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

Vorwort

Preamble

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Herrn Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke, dem Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren, danke ich herzlich für die stetige Unterstützung meiner Tätigkeit, seine motivierende und wohlwollende Führung sowie die fachliche und persönliche Förderung.

Frau Assistant Professor Dr.-Ing. Barbara S. Linke, Leiterin des Manufacturing and Sustainable Technologies Research Laboratory an der University of California, Davis, danke ich herzlich dafür in mir das Interesse für die Schleiftechnik geweckt zu haben. Weiterhin danke ich ihr für die Durchsicht meiner Arbeit, die fachlichen Diskussionen sowie die Übernahme des Koreferats. Darüber hinaus gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Werner Karl Schomburg für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Hans-Josef Allelein für den Beisitz in der Prüfungskommission.

Ein Teil der dargestellten Ergebnisse entstand im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Kooperationsprojekts. Daher bedanke ich mich beim BMWi für die Förderung meiner Arbeit. Darüber hinaus bedanke ich mich herzlich bei meinem Projektpartner, der Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge GmbH & Co. KG, deren Mitarbeiter durch ihre Unterstützung die Entstehung dieser Dissertation ermöglichten. Insbesondere gilt mein Dank Herrn Dr.-Ing. Dirk Hessel, Herrn Rüdiger Wormuth, Herrn Christoph Müller und Herrn Florian Meyer.

Weiterer Dank gilt den Mitgliedsfirmen des Arbeitskreises Schleiftechnik (AKS) am WZL für die persönliche und finanzielle Unterstützung sowie die Anregungen und Diskussionen. Herrn Dr. rer. nat. Thomas E. Weirich vom Gemeinschaftslabor für Elektronenmikroskopie GFE der RWTH Aachen danke ich für die zahlreichen Diskussionen und die Unterstützung bei der Auswertung.

Bei allen Kollegen des Werkzeugmaschinenlabors bedanke ich mich für die großartige Unterstützung und stete Hilfsbereitschaft. Die positive und freundschaftliche Atmosphäre am Institut vermisse ich bereits jetzt. Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Freunden und (ehemaligen) Kollegen Sebastian Barth, Dr.-Ing. Richard Bocker, Moritz Jochums, Guido Kochs-Theisen, Maximilian Lachenmaier, Dr.-Ing. Patrick Mattfeld, Daniel Müller, Johannes Müller, Sebastian Müller, Dr.-Ing. Matthias Rasim, Jan Rey, Peter Ritzerfeld, Dr.-Ing. Florestan Schindler, Jens Stauder, Tanja Tebeck, Andreas Thönnessen, Frederik Vits, Dr.-Ing. Markus Weiß, Christian Wirtz und Christian Wrobel.

Ein großes Dankeschön gilt weiterhin meinen studentischen Mitarbeitern sowie Abschlussarbeitern David Braun, Marc Bredthauer, Christopher Bröckling, Lukas Kaup und Eduard Unruh, ohne die die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Für ihre liebevolle Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit, ihr Verständnis für lange Arbeitstage und kurze Wochenenden sowie ihre Geduld mit mir danke ich von ganzem Herzen meiner lieben Freundin Milena. Meine Promotion ist zu einem großen Teil Dein Verdienst.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern und meiner Schwester, die immer an mich geglaubt und mich unterstützt haben und mir so ermöglichten derjenige zu werden, der ich heute bin.

Barntrup, im Oktober 2016

Janis Thiermann

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	1
2	Stand der Forschung.....	5
2.1	Kinematik des Schleifprozesses.....	5
2.1.1	Grundlegende Kenngrößen.....	5
2.1.2	Hochgeschwindigkeitsschleifen.....	8
2.2	Aufbau von Schleifscheiben.....	10
2.2.1	Kubisches Bornitrid.....	11
2.2.2	Keramische Bindung.....	14
2.2.3	Hochgeschwindigkeitsschleifscheiben.....	15
2.3	Abrichten von Schleifscheiben.....	17
2.3.1	Einstellparameter des Abrichtprozesses.....	19
2.3.2	Wirkmechanismen beim Abrichten.....	23
2.3.3	Modellierung des Abrichtprozesses.....	25
2.4	Zwischenfazit und Problemstellung.....	28
3	Forschungshypothese, Zielsetzung und Vorgehensweise.....	31
4	Diskussion der Auswirkung hoher Umfangsgeschwindigkeiten beim Abrichten.....	35
4.1	Auswirkung hoher Umfangsgeschwindigkeiten auf das Abrichtsystem.....	35
4.1.1	Unwucht des Abrichtsystems.....	35
4.1.2	Auslegung des Abrichtwerkzeugs.....	38
4.1.3	Technologische Voraussetzungen.....	39
4.2	Auswirkung hoher Umfangsgeschwindigkeiten auf die Schleifscheibe.....	40
4.3	Auswirkung hoher Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit auf den Abrichtprozess.....	40
4.4	Fazit.....	42
5	Analyse des Abrichtprozesses an einzelnen CBN-Körnern.....	43
5.1	Versuchsmethodik.....	43
5.1.1	Versuchsaufbau.....	44
5.1.2	Versuchsdurchführung.....	46
5.2	Diskussion der geometrisch-kinematischen Eingriffsverhältnisse.....	48
5.2.1	Stoßwinkel beim Abrichten.....	48
5.2.2	Anzahl der Stöße je Überlauf.....	52
5.3	Analysemethodik.....	55
5.4	Versuchsergebnisse.....	58
5.4.1	REM-Analysen des blockigen Korntyps CBN Type I.....	58
5.4.2	REM-Analysen des splittrigen Korntyps CBN 400.....	65
5.4.3	Gegenüberstellung unterschiedlicher Parameterkombinationen.....	72

5.4.4	Quantitative Bewertung	74
5.5	Fazit	75
6	Abrichten bei hohen Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeiten	79
6.1	Versuchsmethodik.....	79
6.1.1	Entwicklung einer Hochgeschwindigkeitsabrichtspindel.....	79
6.1.2	Versuchsaufbau	81
6.1.3	Versuchsdurchführung	83
6.2	Analysemethodik.....	85
6.3	Versuchsergebnisse.....	87
6.3.1	Einfluss der Abrichtrelativgeschwindigkeit auf den Abrichtprozess	87
6.3.2	Einfluss des Abrichtgeschwindigkeitsquotienten auf den Abrichtprozess	95
6.4	Fazit	102
7	Wirkmechanismen beim Abrichten mit hoher Umfangsgeschwindigkeit...105	
7.1	Analyse der CBN-Randzone	105
7.2	Erklärungsmodell für das Splitterverhalten von CBN-Körnern.....	109
7.3	Übertragung des Modells auf eine keramisch gebundene CBN- Schleifscheibe	114
8	Modell des Abrichtprozesses bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten	117
8.1	Schleifscheibenwirkrautiefe.....	117
8.2	Schleifscheibenverschleiß.....	119
8.3	Fazit	122
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	125
10	Literaturverzeichnis.....	129
	Kurzzusammenfassung	141
	Abstract.....	142
	Lebenslauf.....	143

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula symbols and abbreviations

Großbuchstaben

A	mm ²	Diamantkorneingriffsfläche
A _{hd}	mm ²	Mittlerer Abrichtspanquerschnitt
C _k	mm ⁻³	Volumetrische Korndichte
C _{s,vol}	mm ⁻³	Volumendichte der Schleifkörner
D	µm	Diamantkorngröße
DI	-	Abrichtintensität (engl. dressing intensity)
E	keV	Gemessene Energie bei der EDX-Analyse
E ₁₋₆	-	Spaltebenen
E _{trans}	Nm	Maximale translatorische Energie der Bruchstücke
F _d	N	Abrichtkraft
F _n	N	Schleifnormalkraft
F _{n,d}	N	Abrichtnormalkraft
F _{t,d}	N	Abrichttangentialkraft
F _s	N	Schleifkraft
F _t	N	Schleiftangentialkraft
F _{zf}	N	Zentrifugalkraft
F _n [']	N/mm	Bezogene Schleifnormalkraft
F _t [']	N/mm	Bezogene Schleiftangentialkraft
G	N/mm	Energiefreisetzungsrate
G	mm/s	Auswuchtgütestufe
G _R	µm/N	Nachgiebigkeit
H	mm	Theoretische Profilhöhe
K	-	Diamantkornkonzentration
L _r	mm	Diamantabstand auf dem Abrichtrollenumfang
L _s	mm	Eingriffsabstand der Diamanten
N _{kin}	mm ⁻²	Anzahl kinematischer Schneiden pro Flächeneinheit
N _{mom}	-	Anzahl momentan im Eingriff befindlicher Schneiden
P	GPa	Druck

P_d	kW	Abrichtleistung
P_k	kW	Kühlleistung
P_{nenn}	kW	Spindelnennleistung
$P_{s,max}$	kW	Maximale Antriebsleistung der Schleifmaschine
Q	l/min	Kühlschmierstoffvolumenstrom
Q_w^i	mm ³ /mms	Bezogenes Zeitspannungsvolumen
R^2	-	Einpassgüte
R_a	μm	Arithmetischer Mittenrauwert
R_t	μm	Werkstückwirkrautiefe
R_{ts}	μm	Schleifscheibenwirkrautiefe
R_{ts0}	μm	Ausgangswirkrautiefe der Schleifscheibe
R_z	μm	Gemittelte Rautiefe
S_{br}	-	Sicherheitsfaktor
S_{stat}	-	Anzahl der Diamantkörner auf dem Abrichtrollenumfang
T	°C	Temperatur
T_μ	μm	Schnitteinsatztiefe
U	gmm	Unwuchtbetrag
U_d	-	Abrichtüberdeckungsgrad
V_w^i	mm ³ /mm	Bezogenes Zerspanungsvolumen
$V_{sd,ARKorn}$	mm ³	Abgerichtetes Schleifscheibenvolumen pro Abrichtkorn
$W_{sa,theo}$	mm	Theoretische Schleifscheibenwelligkeit in axialer Richtung

Kleinbuchstaben

a_e	mm	Zustellung
a_{ed}	μm	Abrichtzustellung pro Hub
$a_{ed,ges}$	μm	Gesamte Abrichtzustellung
a_p	mm	Schleifscheibeneingriffsbreite
a_{pd}	mm	Eingriffsbreite des Abrichtwerkzeugs

$a_{w,max}$	m/s^2	Maximal erlaubte Tischbeschleunigung der Schleifmaschine
b_d	μm	Wirkbreite des Abrichtwerkzeugs
b_s	mm	Eingriffsbreite der Schleifscheibe
b_{ws}	mm	Breite der Stege auf dem Werkstück
c	mm^3/ct	Konstante
C_{1-4}	-	Koeffizienten
C_{gw}	-	Dimensionslose Konstante der Schleifscheibe
c_s	m/s	Wellengeschwindigkeit einer Scherwelle
d_{kr}	μm	Diamantkorndurchmesser
d_r	mm	Durchmesser des Abrichtwerkzeugs
d_{req}	mm	Äquivalenter Abrichtrollendurchmesser
d_s	mm	Schleifscheibendurchmesser
$d_{s,max}$	mm	Maximaler Schleifscheibendurchmesser
e	mm	Exzentrizität
e_1, e_2	-	Experimentell ermittelte Exponenten
e_c	J/mm^3	Spezifische Schleifenergie
e_{n1-6}	-	Normalenvektoren der Spaltebenen
e_r	μm	Exzentrizität der Abrichtrolle
e_{sd}	J/kg	Spezifische Abrichtstoßenergie
e_{sp}	μm	Exzentrizität der Spindel
f	μm	Rundlauffehler der Abrichtrolle nach Montage
f_u	s^{-1}	Schwingfrequenz
f_{ad}	mm	Axialer Vorschub des Abrichtwerkzeugs je Schleifscheibenumdrehung
h_{st}	mm	Steghöhe
h_{cu}	μm	Spanungsdicke
$h_{cu,max}$	μm	Maximale Spanungsdicke
i_d	s^{-1}	Abrichtkornstoßzahl
i_s	-	Eingriffszahl
$k_{d1,1}$	N/mm^2	Spezifische Abrichtkraft
l_g	mm	Geometrische Kontaktlänge

l_{gd}	mm	Geometrische Abrichtkontaktlänge
l_{ges}	mm	Gesamtlänge der Eingriffsbahn eines Abrichtdiamantkorns
l_{kd}	mm	Kinematische Abrichtkontaktlänge
m	kg	Masse
m_d	-	Exponentialkoeffizient
n	min^{-1}	Drehzahl
n_r	min^{-1}	Drehzahl des Abrichtwerkzeugs
$n_{r,max}$	min^{-1}	Maximale Drehzahl des Abrichtwerkzeugs
n_{rd}	-	Ausrollumdrehungen
n_s	min^{-1}	Schleifscheibendrehzahl
q	-	Geschwindigkeitsverhältnis
q_d	-	Abrichtgeschwindigkeitsquotient
r_p	mm	Profilrundungsradius des Abrichtwerkzeuges
r_r	mm	Radius des Abrichtwerkzeugs
r_s	mm	Schleifscheibenradius
s_{axf}	μm	Axialer Versatz nachfolgender Abrichtdiamanten durch die axiale Vorschubgeschwindigkeit
s_{axg}	μm	Axialer Versatz nachfolgender Abrichtdiamanten durch die geometrische Anordnung
s	μm	Probendicke
s_u	μm	Schwingweg
t_d	s	Dauer eines Abrichtthubs
t_{ds}	s	Zeitpunkt an dem der Abrichtdiamant auf die Schleifscheibenoberfläche trifft
t_{ges}	s	Dauer eines Abrichtkorneingriffs
t_p	mm	Blechdicke am Umfangsteil der Schutzhaube
u_r	μm	Radiale Schleifscheibenausdehnung
u_s	μm	Radiale Ausdehnung der Ritzscheibe
v_B	%	Bezogenes Bindungsvolumen
v_{br}	m/s	Bruchgeschwindigkeit
v_c	m/s	Schnittgeschwindigkeit

V_{fad}	mm/min	Axiale Abrichtervorschubgeschwindigkeit
V_{frd}	mm/min	Radiale Abrichtervorschubgeschwindigkeit
V_K	%	Bezogenes Kornvolumen
V_P	%	Bezogenes Porenvolumen
V_r	m/s	Abrichtrollenumfangsgeschwindigkeit
V_{rel}	m/s	Abrichtrelativgeschwindigkeit
$V_{rel,x}$	m/s	x-Komponente der Abrichtrelativgeschwindigkeit
$V_{rel,y}$	m/s	y-Komponente der Abrichtrelativgeschwindigkeit
$V_{rel,x,ds}$	m/s	x-Komponente der Abrichtrelativgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Stoßes
$V_{rel,y,ds}$	m/s	y-Komponente der Abrichtrelativgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Stoßes
$V_{r,max}$	m/s	Maximale Abrichtrollenumfangsgeschwindigkeit
V_s	m/s	Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit
$V_{s,max}$	m/s	Maximale Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit
V_{sd}	m/s	Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit beim Abrichten
V_u	$\mu\text{m/s}$	Schwinggeschwindigkeit
V_w	mm/min	Werkstückvorschubgeschwindigkeit
$V_{w,max}$	mm/min	Maximal erlaubte Tischvorschubgeschwindigkeit der Schleifmaschine
x	mm	Belagstärke
x	mm	x-Position eines Abrichtrollenkorns
x_1	mm	Tangentiale Komponente der einlaufenden Bahnflanke
x_2	mm	Idealisierter Bahngrund
x_3	mm	Tangentiale Komponente der auslaufenden Bahnflanke
$x_{AR U}$	-	Anzahl der Abrichtrollenumdrehungen pro Abrichthub
y	mm	y-Position eines Abrichtrollenkorns
y_0	mm	Position der Ritzscheibe im ruhenden Zustand in y-Richtung der Anlage

y_1	mm	Position der Ritzscheibe im rotierenden Zustand in y-Richtung der Anlage
z	-	Anzahl der Schleifkörner im abgerichteten Schleifscheibenvolumen
z_m	μm	Mittlerer Kornüberstand
z_{max}	μm	Maximaler Kornüberstand

Griechische Buchstaben

α_d	$^\circ$	Stoßwinkel
α_{sp}	$^\circ$	Kleinsten Winkel zwischen einem Vektor und einer Spaltebene
α_{spm}	$^\circ$	Mittleren kleinsten Winkel zwischen einem Vektor und einer Spaltebene
$\alpha_{\text{sp,max}}$	$^\circ$	Maximalen kleinsten Winkel zwischen einem Vektor und einer Spaltebene
Δr_s	μm	Schleifscheibenradialverschleiß
Δr_s	μm	Radiale Ausdehnung
Δz_m	μm	Mittelwertdifferenz der Kornüberstände eines CBN-Korns vor und nach dem Abrichten
Δz_{max}	μm	Differenz der maximalen Kornüberstände eines CBN-Korns vor und nach dem Abrichten
ΔW	J	Formänderungsarbeit
μ	-	Schnittkraftverhältnis
σ_v	N/mm^2	Vergleichsspannung
φ	$^\circ$	Drehwinkel
ω	s^{-1}	Kreisfrequenz
ω_r	s^{-1}	Winkelgeschwindigkeit des Abrichtwerkzeugs

Abkürzungen und Indizes

AE	-	Acoustic Emission
Al_2O_3	-	Korund
BN	-	Bornitrid
CBN	-	Kubisches Bornitrid

CFK	-	Kohlefaserverstärkter Kunststoff
EDX	-	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
FEM	-	Finite-Elemente-Methode
FIB	-	Fokussierter Ionenstrahl (engl. focused ion beam)
HBN	-	Hexagonales Bornitrid
NC	-	Numerische Steuerung
REM	-	Rasterelektronenmikroskopie, -mikroskop
RMS	-	Effektivwert
SiC	-	Siliziumkarbid
STEM	-	Rastertransmissions-Elektronenmikroskopie, -mikroskop
TEM	-	Transmissionselektronenmikroskopie, -mikroskop