

Daniel Trauth

Tribology of Machine Hammer Peened Tool Surfaces for Deep Drawing



Tribology of Machine Hammer Peened Tool Surfaces for Deep Drawing

Tribologie maschinell gehämmerter Werkzeugoberflächen für das Tiefziehen

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

vorgelegt von

Daniel Harald Trauth

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Friedrich Bleicher

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Februar 2016

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Daniel Harald Trauth

Tribology of Machine Hammer Peened Tool
Surfaces for Deep Drawing

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 14/2016



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.

Daniel Harald Trauth:

Tribology of Machine Hammer Peened Tool Surfaces for Deep Drawing

1. Auflage, 2016

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

ISBN 978-3-86359-452-7

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

Preamble and Acknowledgement

Vorwort und Danksagung

*"Jeder kann es besser. Seltsam nur,
dass es keiner macht!"*

BENJAMIN GRIFFEY
2009, deutscher Musiker

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke, Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren, danke ich herzlich für die fachliche und persönliche Förderung, die stetige Unterstützung meiner Arbeiten am Institut sowie für seinen motivierenden Zuspruch.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Friedrich Bleicher, Leiter des Lehrstuhls für Spanende Fertigungstechnik am Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungstechnik (IFT) der TU Wien, für die eingehende Durchsicht des Manuskripts und die Übernahme des Koreferats sowie Herrn Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe, Leiter des Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT), für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) haben einen großen Teil der zugrunde liegenden Forschungsarbeiten gefördert. Hierfür möchte ich mich bei der DFG und dem LANUV sowie dessen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bedanken. Einen herzlichen Dank möchte ich in diesem Zusammenhang den Projektpartnern aussprechen: Christian Löcker und Peter Schenk (accurapuls GmbH), Alfons Ambros und Edmund Steiger (BMW AG), Carsten Smits (LTS Fertigungstechnik OHG), Ulrich Wiehagen und Dennis Hamm (Dörries Scharmann Technologie GmbH), Dr. Lenore Staubwasser und Stefan Schubert (Outokumpu Nirosta GmbH), Prof. Dr. Erik Woldt, Karl-Uwe Bansmann und Oliver Naumann (Miele & Cie. KG), Mathias Schmeier (Raziol Zibulla & Sohn GmbH), Dr. Farwah Nahif und Marcus Lartz (eifeler-Vacotec GmbH) sowie Prof. Dr. Joachim Schulz (Fuchs Wisura GmbH).

Ebenso gilt mein Dank den Kollegen des Workshops *Machine Hammer Peening* sowie des VDI-GPL Fachausschusses 116 *Oberflächenhämmern* für inspirierende und unterstützende Diskussionen, besonders Christoph Lechner (Prof. F. Bleicher, IFT, TU Wien), Franziska Lienert (Prof. V. Schulze, wbk, KIT), Manuel Steitz (Prof. P. Groche, PtU, TU Darmstadt) und Johannes Stock (Dr.-Ing. Johannes Wied, Daimler AG).

Dr.-Ing. Patrick Mattfeld gilt mein ganz besonderer Dank für sein Vertrauen, die langjährige persönliche und fachliche Förderung sowie für die umfangreiche Unterstützung bei der

Gestaltung meiner Promotion und der Korrektur des Manuskripts. Ebenso möchte ich mich bei meinen aktiven Umformerkollegen Dr.-Ing. Oksana Ozhoga-Maslovskaja, Dr.-Ing. Fabian Schongen, Robby Mannens, Anton Shirobokov, Joachim Stanke, Rafael Hild und Herman Voigts für die zahlreichen Gespräche und Diskussionen in den letzten Jahren und die Durchsicht des Manuskripts bedanken. Insbesondere aber möchte ich mich bei meinen Bürokollegen Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. M.Sc. Michael Terhorst und Dr.-Ing. Andreas Feuerhack sowie dem staatlich geprüften Techniker Thomas Kokott für die sprachliche und fachliche Unterstützung sowie vor allem für die entstandene Freundschaft bedanken.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Projekt-, Studien-, Bachelor-, Master- und Diplomarbeitern, insbesondere Markus Gottschalk und Joachim Stanke, und vor allem meinen studentischen Mitarbeitern Frank Schweinsaupt, Lars Uhlmann und Herman Voigts. Ihr habt mich sehr entlastet. Vielen Dank!

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Werkzeugmaschinenlabors - im Besonderen Thomas Fischer, Johanna Figgener, Beatrix Göths, Mario Kittel, Brigitte Niederbach und Hartmut Niederhagen - danke ich für die umfangreiche messtechnische, metallografische und EDV-bezogene Unterstützung.

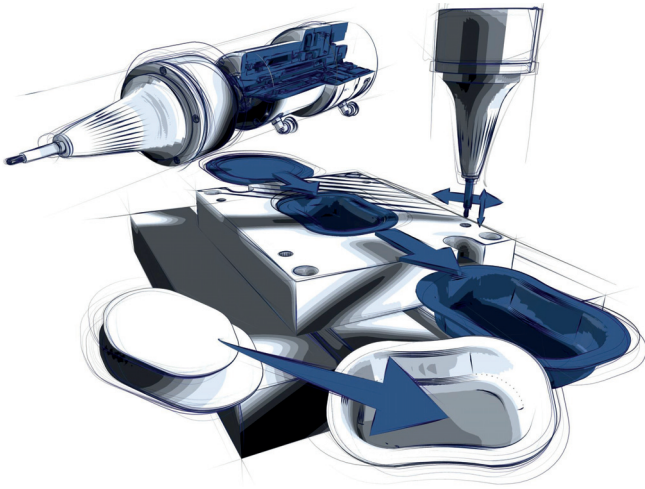
Frau Alexandra Blum und Frau Alina Kuhlen danke ich für die sprachliche Durchsicht des Manuskripts.

Meinen Eltern, Anne-Marie und Bertram Trauth, sowie meiner Familie möchte ich an dieser Stelle meinen ganz persönlichen Dank aussprechen, dass sie meine Ausbildung und meinen beruflichen Werdegang ermöglicht haben und mich stets auf dem Weg dahin begleitet und unterstützt haben.

Bei Johanna Maier möchte ich mich ganz besonders für den anhaltenden motivierenden Zuspruch, die durchgehende Unterstützung sowie für das entgegengebrachte Verständnis von ganzem Herzen bedanken!

Aachen, Mai 2016

Daniel Harald Trauth



Bildquelle: Dr.-Ing. Martin Riedel

Für Bettina[†].

Für Thea, Gertrud[†] und Hugo[†].

Table of contents

Inhaltsverzeichnis

1 Introduction	
<i>Einleitung</i>	1
2 State of the art in deep drawing tribology	
<i>Stand der Erkenntnisse zur Tribologie beim Tiefziehen</i>	7
2.1 Deep drawing basics	
<i>Grundlagen des Tiefziehens</i>	7
2.1.1 Process principle of deep drawing	
<i>Verfahrensprinzip Tiefziehen</i>	8
2.1.2 Tribology of sliding bodies	
<i>Tribologie gleitender Körper</i>	10
2.1.3 Intermediate conclusion	
<i>Zwischenfazit</i>	15
2.2 Surface structures in elastic and elasto-plastic contacts	
<i>Oberflächenstrukturen in elastischen und elasto-plastischen Kontakten</i>	15
2.2.1 Mechanisms of surface structures	
<i>Wirkmechanismen von Oberflächenstrukturen</i>	15
2.2.2 Manufacturing processes for the generation of surface structures	
<i>Fertigungsverfahren zur Herstellung von Oberflächenstrukturen</i>	17
2.2.3 Intermediate conclusion	
<i>Zwischenfazit</i>	19
2.3 Machine hammer peening	
<i>Maschinelles Oberflächenhämmern</i>	19
2.4 Ecological and scientific problem statement	
<i>Wirtschaftliche und wissenschaftliche Problemstellung</i>	22
3 Objective and research methodology	
<i>Zielsetzung und Forschungsmethodik</i>	25
4 Analysis of process and contact mechanics	
<i>Analyse der Prozess- und Kontaktmechanik</i>	29
4.1 Determination and modeling of process forces during MHP	
<i>Ermittlung und Modellierung der Prozesskräfte beim Hämmern</i>	29
4.1.1 Experimental set-up and effects of the process parameters on impact force	
<i>Experimenteller Versuchsaufbau und Auswirkungen der Prozessparameter auf die Einschlagkraft</i>	29
4.1.2 Numerical modeling of impact tests	
<i>Numerische Modellierung von Einschlagversuchen</i>	32

4.2	Determination and modeling of the surface integrity of smooth surfaces	
	<i>Ermittlung und Modellierung der Randschichteigenschaften von glatten gehämmerten Oberflächen</i>	38
4.2.1	Experimental set-up for surface smoothing	
	<i>Experimenteller Versuchsaufbau zur Oberflächeneinglättung</i>	38
4.2.2	Numerical modeling of surface smoothing	
	<i>Numerische Modellierung der Oberflächeneinglättung</i>	44
4.2.3	Effects of process parameters on surface integrity for surface smoothing	
	<i>Auswirkungen der Prozessparameter zur Oberflächenglättung auf die Oberflächenbeschaffenheit</i>	47
4.3	Description of the surface integrity of structured surfaces	
	<i>Beschreibung der Oberflächenintegrität strukturierter Werkzeugoberflächen</i>	50
4.3.1	Definition of patterns for surface structuring	
	<i>Definition von Oberflächenstrukturmuster</i>	50
4.3.2	Numerical modeling of surface structuring	
	<i>Numerische Modellierung der Oberflächenstrukturierung</i>	51
4.3.3	Effects of structuring process parameters on surface integrity	
	<i>Auswirkungen der Prozessparameter zur Strukturierung auf die Oberflächenbeschaffenheit</i>	52
4.4	Conclusion and unresolved challenges	
	<i>Fazit und ungeklärte Herausforderungen</i>	54
5	Friction characteristics of machine hammer peened surface structures	
	<i>Reibeigenschaften maschinell gehämmelter Oberflächenstrukturen</i>	57
5.1	Evaluation of friction characteristics of selected surface structures using strip drawing test	
	<i>Bewertung der Reibeigenschaften ausgewählter Strukturen mithilfe des Streifenziehversuch</i>	57
5.1.1	Experimental set-up for manufacturing structured strip drawing tools	
	<i>Experimenteller Versuchsaufbau zum Strukturieren von Streifenziehwerkzeugen</i>	58
5.1.2	Experimental set-up for strip drawing	
	<i>Experimenteller Versuchsaufbau zum Streifenziehen</i>	60
5.1.3	Results of the friction analysis	
	<i>Ergebnisse der Reibwertanalyse</i>	61
5.2	Modeling of the hydrostatic contact	
	<i>Modellierung des hydrostatischen Kontakts</i>	61
5.2.1	Set-up and verification of the FE-based fluid-structure interaction model	
	<i>Aufbau und Verifikation des FE-basierten Fluid-Struktur-Interaktions-Modells</i>	62
5.2.2	Analysis of tribological target values	
	<i>Analyse tribologischer Zielgrößen</i>	63
5.2.3	Modeling of the sliding contact	
	<i>Modellierung des Relativkontakts</i>	67

5.3	Modeling of the hydrodynamic contact	
	<i>Modellierung des hydrodynamischen Kontakts</i>	68
5.3.1	Analysis of hydrodynamics longitudinally to the sliding direction	
	<i>Analyse der Hydrodynamik entlang der Ziehbewegung</i>	68
5.3.2	Analysis of hydrodynamics transversal to the sliding direction	
	<i>Analyse der Hydrodynamik quer zu Ziehbewegung</i>	74
5.4	Conclusion and unresolved challenges	
	<i>Fazit und ungeklärte Herausforderungen</i>	79
6	Wear characteristics of hammer peened surfaces	
	<i>Verschleißigenschaften gehämmelter Oberflächen</i>	81
6.1	Evaluation of wear characteristics by means of strip drawing test	
	<i>Bewertung der Verschleißbeständigkeit mithilfe des Streifenziehversuchs</i>	81
6.1.1	Experimental set-up and execution	
	<i>Experimenteller Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung</i>	82
6.1.2	Results of the wear analysis	
	<i>Ergebnisse der Verschleißanalyse</i>	82
6.2	Investigation of coated surface structures	
	<i>Untersuchung beschichteter Oberflächenstrukturen</i>	84
6.2.1	Experimental coating characterization	
	<i>Experimentelle Beschichtungscharakterisierung</i>	84
6.2.2	Friction and wear analysis using coated surface structures	
	<i>Reib- und Verschleißanalyse mit beschichteten Oberflächenstrukturen</i>	86
6.3	Modeling of surface temperature and residual stresses for sliding contact	
	<i>Modellierung der Oberflächentemperatur und Eigenspannungen im Gleitkontakt</i>	87
6.4	Conclusion and unresolved challenges	
	<i>Fazit und ungeklärte Herausforderungen</i>	90
7	Physicochemical analysis of the wetting behavior	
	<i>Physikalisch-chemische Analyse des Benetzungsverhaltens</i>	91
7.1	Methodology and theoretical background	
	<i>Methodik und theoretischer Hintergrund</i>	91
7.2	Determination of the surface tension of selected lubricants	
	<i>Bestimmung der Oberflächenspannung ausgewählter Schmierstoffe</i>	95
7.2.1	Experimental set-up for pendant drop method	
	<i>Experimenteller Versuchsaufbau zur Methode des hängenden Tropfens</i>	96
7.2.2	Results for lubricant surface tension	
	<i>Ergebnisse bzgl. der Oberflächenspannung der Schmierstoffe</i>	97
7.3	Determination of the surface free energy of hammer peened structures	
	<i>Bestimmung der Oberflächenenergie gehämmelter Strukturen</i>	98
7.3.1	Calculation method using sessile drop method	
	<i>Berechnungsmethode unter Verwendung der Methode des liegenden Tropfens</i>	98

7.3.2	Results of the sessile drop method	
	<i>Ergebnisse der Methode des liegenden Tropfens</i>	99
7.4	Assessment of physicochemical interactions	
	<i>Bewertung der physikalisch-chemischen Wechselwirkungen</i>	101
7.4.1	Determination of the interfacial tension	
	<i>Bestimmung der Grenzflächenenergie</i>	101
7.4.2	Determination of the work of adhesion	
	<i>Bestimmung der Adhäsionsenergie</i>	102
7.4.3	Determination of spreading pressure	
	<i>Bestimmung des Spreitdrucks</i>	103
7.5	Conclusion and unresolved challenges	
	<i>Fazit und ungelöste Herausforderungen</i>	105
8	Analytic modeling of fluid dynamics	
	<i>Analytische Modellierung der Fluidmechanik</i>	107
8.1	Derivation and solution of the Reynolds equation for a machine hammer peened surface structure	
	<i>Herleitung und Lösung der Reynoldsgleichung für eine gehämmerte Oberflächenstruktur</i>	107
8.1.1	Theoretical background and approximation of a hammered surface structure	
	<i>Theoretischer Hintergrund und Annäherung einer gehämmerten Oberflächenstruktur</i>	107
8.1.2	Determination of the transversal and longitudinal velocity and pressure distribution for steady conditions	
	<i>Bestimmung des transversalen und longitudinalen Geschwindigkeits- und Druckprofils unter stationären Bedingungen</i>	109
8.1.3	Results and discussion of the influence of tribological process parameters on velocity and pressure distribution	
	<i>Ergebnisse und Diskussion des Einflusses tribologischer Einflussgrößen auf das Geschwindigkeits- und Druckprofil</i>	112
8.2	Design of tools with hammer peened surfaces	
	<i>Auslegung gehämmelter Werkzeugoberflächen</i>	116
8.2.1	Results of structures transversally arranged to the sliding direction	
	<i>Ergebnisse transversal zur Gleitrichtung angeordneter Strukturen</i>	117
8.2.2	Results of structures arranged longitudinally to the sliding direction	
	<i>Ergebnisse longitudinal zur Gleitrichtung angeordneter Strukturen</i>	117
8.2.3	Combined longitudinal and transversal structure arrangement	
	<i>Ergebnisse einer kombiniert longitudinal-transversalen Strukturanordnung</i>	118
8.2.4	Discussion	
	<i>Diskussion</i>	119
8.3	Conclusion and unresolved challenges	
	<i>Fazit und ungeklärte Herausforderungen</i>	120

9 Application of the findings and validation of the research hypothesis	
<i>Anwendung der Erkenntnisse und Validierung der Forschungshypothese</i>	121
9.1 Friction analysis of an industrial deep drawing process and visualization of friction	
<i>Reibwertanalyse eines industriellen Tiefziehprozesses und Visualisierung der Reibung</i>	121
9.2 Experimental evaluation of friction and wear of a deep drawing process with hammered tool surfaces	
<i>Experimentelle Bewertung von Reibung und Verschleiß beim Tiefziehen mit gehämmerten Werkzeugoberflächen</i>	124
9.3 Verification of the research hypothesis	
<i>Verifizierung der Forschungshypothese</i>	127
10 Summary and outlook	
<i>Zusammenfassung und Ausblick</i>	129
Bibliography	
<i>Literaturverzeichnis</i>	XXIII
A Appendix	
<i>Anhang</i>	XLI
A.1 Appendix for chapter 4	XLI
A.2 Appendix for chapter 5	XLIX
A.3 Appendix for chapter 6	LI
A.4 Appendix for chapter 7	LIII
A.5 Appendix for chapter 8	LXIV
A.6 Appendix for chapter 9	LXXXI
A.7 List of student theses used	LXXXVII
B Abstract	
<i>Kurzzusammenfassung</i>	LXXXVIII
C Curriculum vitae	
<i>Lebenslauf</i>	XC

Symbols and abbreviations

Formel- und Abkürzungsverzeichnis

Acronyms

(Cr,Al)N	Chromium aluminum nitride
A	MHP head diameter in Pareto charts
acc. to	According to
AG	Aktiengesellschaft (stock corporation)
AISI	AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE
B	Stepover distance in Pareto charts
BH	Blank holder
BMW	BAYERISCHE MOTOREN WERKE Aktiengesellschaft (BMW AG)
C	Chemical element: carbon
C	Distance of indentation in Pareto charts
C3D4T	Linear 4-node brick element with thermo-coupling (ABAQUS)
C3D8R	Linear 8-node brick element with reduced integration (ABAQUS)
C3D8T	Linear 8-node brick element with thermo-coupling (ABAQUS)
C45W	Unalloyed tool steel acc. to DIN 1.1730 or AISI 1045
CEL	Coupled Eulerian-Lagrangian method
CFD	Computational fluid dynamics
CFT95	Mineral oil and ester oil based lubricant from RAZIOL
CoF	Coefficient of friction
Cr	Chemical element: chromium
Cu	Chemical element: copper

CVD	Chemical vapor deposition
D	Indentation depth in Pareto charts
DD	Drawing die
DIN	DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG
DLC	Diamond-like carbon
DOE	Design of experiments
DSA	Drop shape analysis
DTE21	Aqueous grease from RAZIOL
E.g., e.g.	Exempli gratia
EC3D8R	Eulerian linear 8-node brick element with reduced integration (ABAQUS)
EDM	Electrical discharge machining
EDX	Energy dispersive X-ray
EN	European Standard
F747	Reference lubricant Multan F 747 by HENKEL
F ₁ , F ₂ , ...	Measuring field 1, 2, ... , 5
FC3D8	Linear 8-node brick fluid element
Fe ₃ C	Cementite
FEM	Finite element method
FF350	Polymeric blend 1 from RAZIOL
FIB	Focused ion beams
Fig.	Figure
FP630	Polymeric blend 2 from RAZIOL
FSI	Fluid structure interaction
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung (company with limited liability)
GPL	GESELLSCHAFT PRODUKTION UND LOGISTIK des VDI

HRC	Hardness type C acc. to ROCKWELL
HSM	Hole-Drilling Strain-Gauge method
IBF	INSTITUT FÜR BILDSAME FORMGEBUNG (Institute of Metal Forming)
IOT	INSTITUT FÜR OBERFLÄCHENTECHNIK (Surface Engineering Institute)
ISO	International Organization for Standardization
LBA	Laborbeöhlungsanlage (Spraying device)
LBW	Leichtbauwerkstoffe (Lightweight materials)
LTS	LTS FERTIGUNGSTECHNIK GBR
LWM	Lightweight materials
MF	Measuring field
MHP	Machine hammer peening
Mn	Chemical element: manganese
Mo	Chemical element: molybdenum
MOH	Maschinelles Oberflächenhämmern (Machine Hammer Peening)
MoS ₂	Molybdenum disulfide
MoST	Coating based on molybdenum disulfide
MTU	Motor- und Turbinen-Union Aero Engines
N	Chemical element: nitrogen
NSE	NAVIER-STOKES equation
O ₊₁	Orientated surface structure with positive overlap
OFAT	One factor at a time
OHG	Offene Handelsgesellschaft (limited partnership business entity)
P	Chemical element: phosphorus
p.	Page
Pa ₁ , Pa ₂ , ...	Evaluation paths 1 to 5 parallel to the hammering direction

Pe ₁ , Pe ₂ , ...	Evaluation paths 1 to 5 perpendicular to the hammering direction
PMMA	Polymethylmethacrylate
POM	Polyoxymethylene
PTFE	Polytetrafluoroethylene
PVC	Polyvinyl chloride
PVD	Physical vapor deposition
Pz ₁ , Pz ₂ , ...	Evaluation paths 1 to 5 into the workpiece
RE	REYNOLDS number, equation
S	Chemical element: sulfur
S355J2G2	Structural grade carbon steel acc. to DIN 1.0577 or AISI 5132
S4R	Linear 4-node shell element with reduced integration (ABAQUS)
S ₊₁	Symmetrical surface structure with positive overlap
SEM	Scanning electron microscopy
Si	Chemical element: silicon
SPD	Severe plastic deformation
T-COAT	Thin-film pearl-microstructured chromium coating (GWC COATING GMBH)
T ₊₁	Transversal surface structure with positive overlap
TiCN	Titanium carbon nitride
TiHfCrN	Titanium hafnium chromium nitride super-lattice coating
USD	United States Dollar
V	Chemical element: vanadium
VDI	VERBAND DEUTSCHER INGENIEURE (Association of German Engineers)
wEDM	Wire electrical discharge machining
X155CrMoV12	High alloyed tool steel acc. to DIN 1.2379 or AISI D2
X5CrNi18-10	Stainless steel acc. to DIN 1.4301 or AISI 304

Formula symbols

a	m^2/s	Conductibility of temperature
a_0	mm	MHP stroke using the FOURIER transformation
A_0	mm^2	Nominal contact area
A_{s0}	%	Ultimate strain
AC	–	Adhesion class according to ROCKWELL
A_{DSA}	mm^2	Wetted contact area of the drop in DSA
a_{el}	mm	Semi-axis of an ellipse
A_{fl}	mm^2	Area in contact with lubricant
A_{g}	%	Elongation before necking
$a_{\text{m,f}}$	mm	Cutting depth in finish milling
a_{mhp}	mm	Distance of indentation in hammer peening
$a_{\text{m,r}}$	mm	Cutting depth in rough milling
a_n, b_n	mm	FOURIER coefficients describing the oscillation height
a_{pl}	mm/s^2	Acceleration of the MHP plunger
A_{proj}	mm^2	Projected contact area of MHP head on workpiece
A_{s}	mm^2	Contact area at the stoppers
A_{t}	mm^2	True contact area
$A_{\text{t}1}, A_{\text{t}2}, \dots$	mm^2	Subcontact 1, 2, ... , n of the true contact area
B	T	Magnetic flux density of the MHP magnet
b	kg/s	Damping factor of the oscillating MHP system
b_{el}	mm	Semi-axis of an ellipse
C	–	HOLLOMON factor describing the material

c	kg/s ²	Spring rate of the oscillating MHP system
C_1, C_2, \dots	–	Constant of integration 1, 2, ...
C_{HS}	–	HENSEL-SPITTEL factor describing the material
c_p/m	J/(kgK)	Mean specific heat capacity
c_p/w	J/(kgK)	Effective specific heat capacity
d	mm	Diameter
D_0	mm	Blank diameter in deep drawing of axially symmetrical cups
D_{calo}	mm	Outer diameter of a calotte in calotte grinding
d_{calo}	mm	Inner diameter of spherical calotte in calotte grinding
d_{DSA}	mm	Diameter of the nozzle in DSA
$d_{HSM,t}$	mm	Tool diameter of the drill in HSM
$d_{HSM,wp}$	μm	Workpiece hole diameter in HSM
d_i	mm	Indentation diameter
$d_{i,mhp}$	mm	Indentation diameter after MHP
d_m	mm	Diameter of a ball nose cutter in milling
d_{mhp}	mm	Diameter of an MHP head
e	–	EULER number $\approx 2.71828\dots$
E_{mhp}	mm	MHP stroke energy
E_{wp}	N/mm ²	YOUNG's modulus of the workpiece
F	N	Force
f	mm	Frequency
F_{BH}	N	Blank holder force in deep drawing
$F_c, F_{c,1}, \dots$	N	Contact force with solids
F_{CH}	N	Counter force in deep drawing
F_{DF}	N	Drawing force in deep drawing

F_{fl}	N	Contact force with fluids
F_{fl}	N	Shear force of a fluid
F_{HRC}	kN	Indentation force using Rockwell hardness test
F_{HVy}	N	VICKERS test load at y N
F_i	N	Impact force of the MHP head
$F_{i,Hollomon}$	N	Impact force of the MHP head acc. to HOLLOWOMON
$F_{i,hs}$	N	Impact force of the MHP head acc. to HENSEL-SPITTEL
$F_{i,max}$	N	Maximum impact force of the MHP head
$F_{i,max}$	N	Maximum reaction force in $i = x, y, z$ direction
F_L	N	LORENTZ force
F_{LBC}	N/mm	Load bearing capacity
F_{ls}	N	Reaction force of the lower stopper
f_{mhp}	Hz	Hammering frequency
F_n, F_N	N	Normal force
F_P	N	Punch force in deep drawing
F_r, F_R	N	Friction force
f_{rf}	Hz	Resonant frequency of the measuring set-up
F_s	N	Retraction force
$F_{Scratch,max}$	kN	Maximum indentation force in Scratch testing
f_{sr}	Hz	Sampling rate to measure the MHP impact force
F_{TF}	N	Tangential force in deep drawing
F_{us}	N	Reaction force of the upper stopper
F_x	N	Perpendicular reaction force on the MHP head during impact
F_y	N	Parallel reaction force on the MHP head during impact
F_z	N	Normal reaction force on the MHP head during impact

g	m/s^2	Gravity constant
$\overline{h(x)}$	μm	Height function of hydrodynamic contacts
h, h_{mhp}	mm	MHP stroke
h_0	μm	Fluid film thickness, lubrication gap height
h_1, h_2	μm	Entrance (2) and exit height (1) of hydrodynamic contacts
$\frac{dh}{dt}$	–	Non-steady change of structure height h acc. to REYNOLDS
$\frac{dh}{dx}$	–	Change of structure height with structure length x acc. to REYNOLDS
$\frac{dh}{dz}$	–	Change of structure height with structure width x acc. to REYNOLDS
h_p	μm	Indentation depth of the MHP head into the material
HV	mN	Coating microhardness
h_{wp}	mm	Workpiece height
$i, i(t)$	A	Electrical input current to the MHP head
L	mm	Length of hydrodynamic model
L_{c1}	N	Critical load to determine the cohesive failures at the side walls
L_{c2}	N	Critical load to determine cohesive spallation at the scratch borders
L_{c3}	N	Critical load to determine adhesive failure and coating delamination
L_{ci}	N	i^{th} critical indentation load
l_{cv}	mm	Length of chevrons in surface structuring
l_d	mm	Drawing length
l_e	mm	Evaluation length
L_I	H	Inductance of the MHP inductor
l_I	m	Wire length of the MHP inductor
l_{wp}	mm	Workpiece length
m	kg	Mass of the oscillating MHP inductor plunger
m_1	–	HENSEL-SPITTEL factor describing the material's thermal influence

m_2	–	HENSEL-SPITTEL factor describing the material's hardening influence
m_3	–	HENSEL-SPITTEL factor describing the material's strain rate influence
m_4	–	HENSEL-SPITTEL factor describing the material's softening influence
m'	g/m ²	Lubricant amount per square meter
N	–	Number of FOURIER series
n	–	HOLLOMON factor describing material hardening
n_x	–	Number of valence electrons for element X (= e.g. Fe, Cr, ...)
P	kW	Peening power applied to the MHP head
$p(x)$	N/mm ²	Fluid pressure in hydrodynamic contacts
p_0	MPa	Surrounding pressure
p_1, p_{inlet}	MPa	Entrance pressure acc. to SOMMERFELD
p_2, p_{outlet}	MPa	Exit pressure acc. to SOMMERFELD
$\frac{dp}{dx}$	–	Change in pressure along structure length x acc. to REYNOLDS
p_{dyn}	MPa	Hydrodynamic fluid pressure
$\frac{dp}{dz}$	–	Change in pressure along structure width z acc. to REYNOLDS
P_{el}	kW	Electric power from the MHP control unit
p_{fl}	MPa	Fluid pressure
p_m	MPa	Averaged contact pressure between MHP head and workpiece
$p_{\text{max}}, p_{\text{min}}$	MPa	Minimum, maximum fluid pressure in hydrodynamic contacts
p_{neg}	MPa	Negative fluid pressure
p_{stat}	MPa	Hydrostatic fluid pressure
\bar{p}	MPa	Averaged fluid pressure
$p'(x)$	N/mm	Numerical derivatives of $\frac{dp}{dx}$
$p(x, z)$	N/mm ²	Drop contour using LAPLACE fitting
R	Ω	Electrical resistance of the MHP inductor