

Dry Metal Forming Open Access Journal

Fast Manuscript Track

Edited by Frank Vollertsen
Available online at <https://elib.suub.uni-bremen.de/>



www.drymetalforming.de

Dry Met. Forming OAJ FMT 5 (2019) 031–038
Received Nov 15, 2019; published Nov 26, 2019

Strukturierte und DUPLEX behandelte Werkzeuge für die Trockenbearbeitung beim Rundkneten

Henning Hasselbruch*¹, Marius Herrmann^{2,4}, Julian Heidhoff^{1,4}, Hans-Werner Zoch^{1,4}, Bernd Kuhfuß^{2,3,4}, Oltmann Riemer¹, Andreas Mehner¹

¹Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien - IWT, Badgasteiner Str. 3, 28359 Bremen, Deutschland

²Bremer Institut für Strukturmechanik und Produktionsanlagen, Badgasteiner Str. 1, 28359 Bremen, Deutschland

³MAPEX Center for Materials and Processes

⁴Universität Bremen Bibliothekstraße 1, 28359 Bremen, Deutschland

Abstract

Rundkneten ist ein inkrementelles Massivumformverfahren zur Herstellung von Leichtbaukomponenten aus zylindrischen Halbzeugen. Das konventionelle Rundkneten setzt derzeit große Mengen von Schmiermitteln voraus, um sowohl den Werkzeugverschleiß zu minimieren als auch die gewünschte Bauteilqualität einzustellen. Es besteht Interesse den Rundknetprozess in einer trockenen Prozessführung zu realisieren und somit die Prozesskette bei der Weiterverarbeitung der Werkstücke um kostspielige Reinigungsprozesse zu verkürzen. Für eine trockene Prozessführung werden Makrostrukturen durch Fräsen mit Kugelkopffräsern in die Reduzierzonen der Werkzeuge eingebracht, um tribologische Bedingungen einzustellen, die auch bei trockener Prozessführung zu einem stabilen Prozess und qualitativ hochwertigen Werkstücken führen. Um diese Strukturen zu schützen sowie den Werkzeugverschleiß und die Entstehung von Abriebpartikeln zu minimieren, werden Wolfram dotierte, wasserstoffhaltige amorphe Kohlenstoffschichten (a-C:H(:W)) auf die gesamte Umformzone durch reaktives Magnetronspütern appliziert. Werkstücke, die mit beschichteten Werkzeugen beim Trockenrundkneten hergestellt wurden, weisen zudem vergleichbare oder bessere Werkstückoberflächen auf als unter der konventionellen, geschmierten Prozessführung. Allerdings muss die Schichthaftung auf den Werkzeugoberflächen weiter gesteigert werden, da die Beschichtungen kritisch auf lokale Überbeanspruchungen reagiert. Um einer frühzeitigen Schichtermüdung beim Trockenrundkneten von Stahl effektiv zu begegnen, werden die Werkzeuge nach dem Vergüten zusätzlich plasmanitriert. Im Rahmen dieser Arbeit wird zunächst geprüft, ob eine Übertragbarkeit von plasmanitrierten und anschließend a-C:H(:W) beschichteten Laborproben auf die komplexe Rundknetwerkzeuggeometrie gegeben ist. Zudem werden zwei sogenannte DUPLEX behandelte Werkzeuge gegen Stahl in der trockenen Anwendung getestet und mit den Werkzeugverschleißresultaten der vergüteten Werkzeuge verglichen.

Keywords: Inkrementelle Umformtechnik, Werkzeug- und Formenbau, wolframditierte amorphe Kohlenstoffschichten, a-C:H:W/a-C:H-Schichtsystem, reaktives Magnetronspütern, Plasmanitrieren, DUPLEX-Behandlung

1 Einleitung

Rundkneten im Vorschubverfahren ist ein inkrementelles Massivumformverfahren zur Herstellung von Maschinenkomponenten wie Lenkspindeln oder Antriebswellen und gehört nach der DIN 8583 zu den Freiformschmiedeverfahren [1]. Die vorzugsweise aus rohrförmigen Halbzeugen umgeformten Bauteile weisen im Vergleich zu spanend gefertigten Komponenten vorteilhafte Eigenschaften, wie hohe Kaltverfestigung und einen günstigen und insbesondere ununterbrochenen Faserverlauf auf [2]. Weiterhin führt die Nutzung rohrförmiger

Halbzeuge zu einer angepassten Bauteilwandstärke entlang der Bauteillänge, wodurch eine optimierte Werkstoffausnutzung und somit eine Gewichtseinsparung erreicht wird. Durch das damit einhergehende hohe Leichtbaupotenzial und die spanlose Fertigung zählt das Rundknetverfahren zu den nachhaltigen Fertigungstechnologien [3].

Allerdings werden beim konventionellen Rundkneten große Mengen an Kühlschmierstoffen (KSS) benötigt. Der Kühlschmierstoff dient dem Schutz der Werkzeug- und Werkstückoberflächen vor adhäsivem und abrasivem Verschleiß. Kühlschmierstoffe gewährleisten

durch die Separation der aktiv wirksamen Werkzeug- und Werkstückoberflächen eine gute Oberflächengüte und Formtreue der so hergestellten Werkstücke, welche beim konventionellen Rundkneten in sehr engen Toleranzen liegen [4]. Weiterhin tragen die eingebrachten Kühlschmierstoffe Abriebpartikel aus der Umformzone heraus und sorgen, neben der Verminderung der Reibung zwischen den Werkstück- und Werkzeugaktivflächen, zudem für die Schmierung und Kühlung aller bewegten Komponenten im Knetwerk.

Die durch den KSS-Einsatz herabgesetzte Reibung führt zu einer unerwünschten Erhöhung der axialen Prozesskräfte, der sogenannten Rückweiskraft, welche dem Werkstückvorschub entgegenwirkt. Die Folge einer zu niedrigen Reibung in der Reduzierzone ist ein Überschreiten der Rückweiskraft von der werkstoff- und formabhängigen Festigkeitsgrenze, was zu einem Ausknicken des Werkstücks führen würde. Um die tribologischen Bedingungen und somit auch die axialen Prozesskräfte zu kontrollieren, erhalten die konventionellen Rundknetwerkzeuge in der Reduzierzone eine thermisch aufgespritzte, raue Wolframkarbid-Kobalt-Schicht. Diese erhöht die Reibung, wodurch ein stabiler Rundknetprozess gewährleistet wird [5].

Aus ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten ist es von Interesse, Rundknetverfahren auf den Einsatz von Kühlschmierstoffen, welche in der Regel zudem mineralölbasiert sind, zu verzichten. Gleichzeitig würde eine trockene Prozessführung die Werkstückprozesskette verkürzen, da nachgestellte, aufwändige Reinigungsprozesse entfallen könnten. Allerdings müssen die oben genannten primären KSS-Funktionen durch neuartige Lösungsansätze am Werkzeug realisiert werden, um die veränderten Kontaktbedingungen – Verschleiß, Reibung und Partikelabrieb – zu beherrschen. Eine herkömmliche raue Wolframkarbid-Kobalt-Schicht zur Steuerung der effektiven Reibbedingungen kann nicht mehr eingesetzt werden, da die Spülwirkung des Schmiermittels entfällt und sich die Schicht nach dem Umformen des ersten Werkstücks bereits mit Abriebpartikeln zusetzt [6]. Für eine trockene Prozessführung müssen daher die tribologischen Bedingungen durch sogenannte „funktionalisierte Werkzeugoberflächen“ realisiert werden. Hierzu werden zwei Maßnahmen kombiniert. Zum einen werden die Werkzeugoberflächen durch Fräsen strukturiert. In der Reduzierzone wird eine definierte geometrische Makrostrukturierung zur Kontrolle der effektiven Reibung und somit der axialen Prozesskräfte genutzt [7]. In der Kalibrierzone wird eine Mikrostrukturierung zur Minimierung des adhäsiven Verschleißes eingesetzt. Alle Aktivflächen der Rundknetwerkzeuge werden außerdem mit einer reibungsarmen Hartstoffbeschichtung beschichtet, die sowohl die Makro- und Mikrostrukturierungen als auch alle weiteren Oberflächen gegen adhäsiven und abrasiven Werkzeugverschleiß schützt [8, 9]. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich mit der Applikation von Wolfram dotierten wasserstoffhaltigen amorphen Kohlenstoffschichten darüber hinaus die Entstehung von Abriebpartikeln deutlich reduzieren lässt [10].

Eine Hürde für ein langzeitstabiles Trockenrundkneten stellt jedoch die Schichthaftung dar. Die abgeschie-

denen Beschichtungen reagieren besonders beim Umformen von Stahlwerkstücken kritisch auf lokale Überbeanspruchungen an Mikrokontakten wie Rauspitzen oder den fräsbedingten Texturen. Hier kann es zu lokalen Spannungserhöhungen kommen, die zu frühzeitigen lokalen Schichtdelaminationen führen können. Infolge der Schichtdelaminationen kommt es an diesen Stellen zu lokalen Adhäsionserscheinungen, die wiederum zu weiterer Schichtschädigung führen [11]. Zwei mögliche Mechanismen, die zu einer sukzessiven Schichtermüdung führen können sind in Bild 1 skizziert.

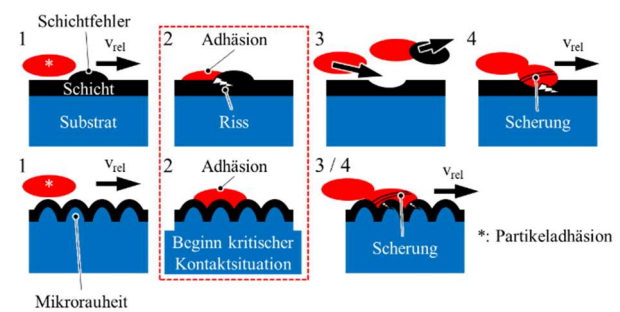


Bild 1: Mögliche Mechanismen der Schichtermüdung durch Schichtfehler oder vorhandene Mikrorauheit

Neben der Anpassung der Beschichtungsparameter zur Steigerung der Haftfestigkeit besteht ebenfalls die Möglichkeit werkzeugseitig die Oberflächenhärte und somit die Stützwirkung der hierauf applizierten Hartstoffbeschichtung zu steigern [8, 12]. Mit Hilfe eines nach dem Vergüten des Kaltarbeitsstahls X153CrMoV12 (WKN. 1.2379) nachgestellten Plasmanitrierprozesses soll die Schichthaftung verbessert und somit die Verschleißbeständigkeit der eingesetzten Werkzeuge gegen Stahl vor dem Hintergrund der langfristigen Einsatzbefähigung gesteigert werden. Diese sogenannte DUPLEX-Behandlung, dem Plasmanitrieren und der anschließenden PVD-Schichtabscheidung, soll im Rahmen dieser Arbeit anhand von zwei unterschiedlich DUPLEX behandelten Rundknetwerkzeugen getestet und mit den vergüteten Werkzeugzuständen verglichen werden. Hierzu muss zunächst untersucht werden, ob sich der Plasmanitrierprozess der zuvor getesteten Laborproben auf die komplexe Geometrie der Rundknetwerkzeuge übertragen lässt. Im Rahmen einer trockenen Anwendungsprüfung werden Verschleißanalysen der Werkzeuge am Rasterelektronenmikroskop (REM) nach unterschiedlichen Werkstückdurchsätzen und Vorschubgeschwindigkeiten durchgeführt, um die Ermüdungsbeständigkeit der Schichten und somit das Potenzial zu einer längeren Werkzeugstandzeit zu dokumentieren. Mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) werden beginnende Schädigungen oder bereits erfolgte Schichtdelaminationen näher untersucht.

2 Experimentelles Vorgehen

Im Folgenden wird zunächst die Herstellung der funktionalisierten Werkzeuge beschrieben, siehe Bild 2. Die Konstruktion der Werkzeuge wurde am Bremer Institut für Strukturmechanik und Produktionsanlagen (bime) durchgeführt. Die mechanische Bearbeitung

wurde am Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (IWT) in der Abteilung Labor für Mikrozerpannung (LFM) umgesetzt. Die DUPLEX-Behandlung wurde von der Abteilung Oberflächentechnik (OFT) des Leibniz-IWT realisiert. Der derart eigen gefertigte Werkzeugsatz konnte anschließend am bime durch trockene Rundknetversuche bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten getestet werden. Zwischen den verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten fanden jeweils REM/EDX Verschleißanalysen am Leibniz-IWT statt.

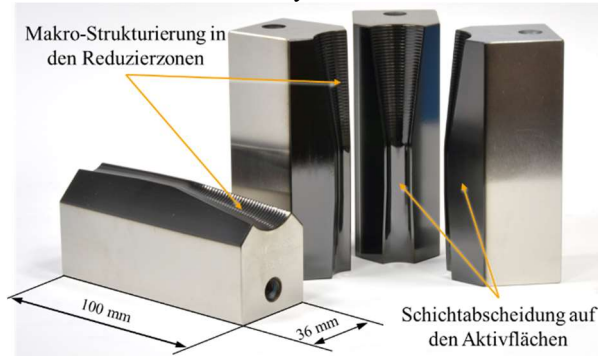


Bild 2: Nitrierte und a-C:H:W/a-C:H beschichtete Werkzeuge mit gefräster gradierter Makrostrukturierung in der Reduzierzone

2.1 Werkzeugherstellung

Der erste Schritt der Fertigung des Rundknetwerkzeugsatzes, bestehend aus vier einzelnen Rundknetwerkzeugen, ist das Zuschneiden und Planschleifen des Rohmaterials X153CrMoV12 (WKN: 1.2379). Die anschließende endkonturnahe Weichbearbeitung der plangeschliffenen Grünlinge erfolgt durch dreiaxsiges Fräsen. Der Durchmesser des eingesetzten Kugelkopffräser betrug hierbei 12 mm. Die finale Endkontur wird mit der Werkzeuggeometrie, bestehend aus Reduzier- und Kalibrierzone sowie der Auslaufzone und den Dachflächen (konische Werkzeugflanken), versehen. Die geometrischen Merkmale der Rundknetwerkzeuge sind dabei folgende: Werkzeugwinkel $\alpha = 10^\circ$, nominaler Durchmesser $d_{\text{nom}} = 15 \text{ mm}$. Die Länge der Kalibrierzone ist mit $l_{\text{cal}} = 20 \text{ mm}$ für alle Rundknetwerkzeuge identisch.

Die Hartfeinbearbeitung erfolgte nach dem Vergüten bzw. Plasmanitrieren durch eine dreiaxsiges Feinfräsbearbeitung mit hartstoffbeschichteten Wolframkarbid-Mikrokugelkopffräsern, die einen Durchmesser von 2 mm aufweisen. Zunächst wurden die seitlichen Führungsflächen plan geschliffen. Im Zuge der finalen Feinfräsbearbeitung wurde die Reduzierzone mit einer gradierten Sinusstruktur versehen. Die Wellenlänge wurde mit $\lambda = 1,3 \text{ mm}$ konstant gehalten, während die maximale Amplitude $A_{\text{max}} = 50 \mu\text{m}$ bis in die Kalibrierzone kontinuierlich abnimmt. Ausgehend von der Kalibrierzone besteht ab der achten Amplitude Erstkontakt in der Reduzierzone zwischen den Werkstück- und Werkzeugoberflächen [13].

Die Spindeldrehzahl für das Mikrofräsen betrug 40.000 min^{-1} und die Vorschubgeschwindigkeit lag bei 1.500 mm/min . Zum Schruppen betragen Schnittbreite und -tiefe $20 \mu\text{m}$ und beim Schlichten lagen diese jeweils bei $5 \mu\text{m}$. Für alle Fräsoperationen wurde die Wegerzeugung der Fräswerkzeuge mittels CAD/CAM-Programmierung erstellt [14].

2.2 DUPLEX-Behandlung

Nach der Erstellung der Werkzeuggeometrie durch die Feinfräsbearbeitung wurden alle vier aufgebrauchten Makrostrukturierungen der Rundknetwerkzeuge in der Reduzierzone zunächst poliert. Die mittlere Oberflächenrauheit in diesem Bereichen lag nach dem Polieren unterhalb einer Flächenrauheit von $Sa = 0,06 \mu\text{m}$. Die Kalibrierzonen hingegen wurden nicht poliert und weisen somit die bei der Hartfeinbearbeitung entstandene Bearbeitungstextur auf. Die Werkzeuge WZ 3 und WZ 4 wurden nach dem Vergüten und der Hartfeinbearbeitung zusätzlich plasmanitriert. Tabelle 1 zeigt die Übersicht der vier gefrästen, vergüteten bzw. plasmanitrierten Parameter der für die trockene Anwendungsprüfung vorgesehenen Rundknetwerkzeuge. Dabei bilden die vier Rundknetwerkzeuge WZ 1 bis WZ 4 einen vollständigen Werkzeugsatz.

Tabelle 1: Wärmebehandlung und Plasmanitrierparameter der anwendungsgeprüften Rundknetwerkzeuge [12]

Werkzeug	Nitrierung				Beschichtung
	Temperatur	Dauer	N ₂ -Fluss	H ₂ -Fluss	
WZ 1	vergütet (1080 °C + 3x 500 °C) nicht nitriert				a-C:H(:W)
WZ 2	vergütet (1080 °C + 3x 500 °C) nicht nitriert				a-C:H(:W)
WZ 3	480°C	25 h	6 l/h	43 l/h	a-C:H(:W)
WZ 4	480°C	25 h	25 l/h	25 l/h	a-C:H(:W)

Das Austenitisieren aller Werkzeuge erfolgte zunächst bei einer Temperatur von 1080 °C bei etwa einer Stunde Haltedauer. Hiernach wurde in Öl abgeschreckt und anschließend dreimal bei etwa 500 °C angelassen und jeweils an Luft abgekühlt. Die Oberflächenhärte in diesem vergüteten Zustand lag somit bei allen Werkzeugen bei $62 \pm 2 \text{ HRC}$. Nach dem Polieren der Reduzierzonen wurde das Plasmanitrieren an den Werkzeugen WZ 3 und WZ 4 bei einer konstanten Temperatur unterhalb der Anlasstemperatur von 480 °C , und einer konstanten Plasmanitrierdauer von jeweils 25 Stunden durchgeführt. Beide Varianten unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Verhältnisse der H₂- und N₂-Durchflussmengen. Während WZ 3 mit einer H₂:N₂-Verhältnis von etwa 1:7 nitriert wurde, liegt das Verhältnis von WZ 4 bei einem Verhältnis von 1:1.

Vorangegangene Untersuchungen an Scheibenproben haben ergeben, dass sich bei den in Tabelle 1 genannten Gasdurchflüssen von 6 l/h H₂ und 43 l/h N₂ bei einem Verhältnis von etwa 1:7 keine Verbindungsschicht ausbildet. Bei Gasdurchflüssen von 25 l/h H₂ und 25 l/h N₂ und somit bei einem Verhältnis von exakt 1:1 bildet sich eine spröde und harte Verbindungsschicht an der Oberfläche aus, siehe Bild 3 [15]. Im Folgenden werden die Bezeichnungen der Plasmanitrier- bzw. DUPLEX-Varianten ohne und mit Verbindungsschichten jeweils über die Gasdurchfluss-Verhältnisse 1:7 bzw. 1:1 H₂:N₂ beschrieben.

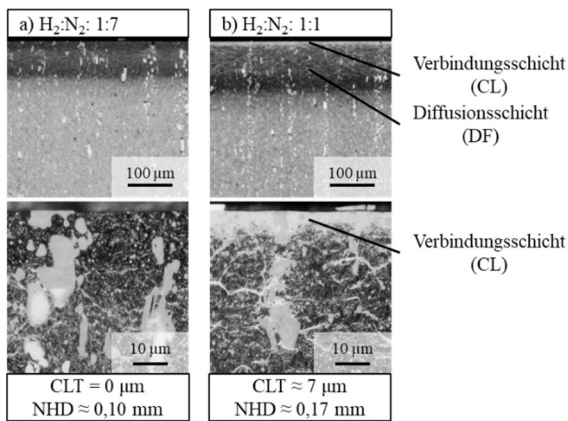


Bild 3: Metallographische Übersichts- und Detailaufnahmen der plasmanitrierten Scheibenproben bei einem H₂:N₂-Verhältnis von a) 1:7 ohne Verbindungsschicht von WZ 3 und b) 1:1 mit Verbindungsschicht von WZ 4 bei unterschiedlichen Vergrößerungen [15]

Die DUPLEX-Behandlung der Werkzeuge ist mit der Schichtabscheidung abgeschlossen. Die Abscheidung des Cr/CrN_x/(Cr, W)_y/a-C:H/W/a-C:H-Multilagenschichtsystems, in Tabelle 1 als a-C:H(:W) bezeichnet, erfolgte in einer reaktiven Magnetronspalter-Anlage der Fa. CemeCon des Typs CC800/9 SinOx. Die detaillierte Prozessführung der eingesetzten Beschichtung wurde von Hasselbruch et al. näher beschrieben [8]. In einem einzigen Beschichtungsprozess wurde der vollständige Werkzeugsatz beschichtet, um zu gewährleisten, dass es nicht zu prozessbedingten Unterschieden in der Schichthaftung bzw. der Ermüdungsbeständigkeit auf dem Kaltarbeitsstahl kommt. Während des Beschichtungsprozesses wurden alle Rundknetwerkzeuge auf gleicher Höhe chargiert, um den Einfluss der Probenpositionierung relativ zu den Sputter-Targets zu minimieren.

In Bild 4 sind das applizierte Schichtsystem als BSE-Bruchbild (engl.: backscattered electrons), welches mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) aufgenommen wurde, sowie die dazugehörigen primären mechanischen Schichteigenschaften dargestellt.

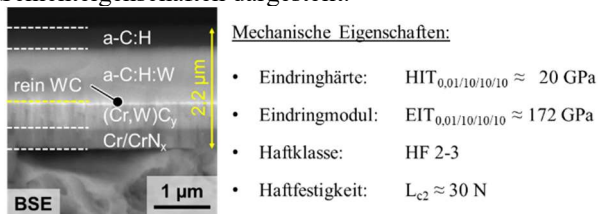


Bild 4: BSE-Bruchbild des auf den veredelten Rundknetwerkzeugen applizierten Cr/CrN_x/(Cr, W)_y/a-C:H:W/a-C:H-Multilagenschichtsystems [8]

Die Eindringhärte HIT liegt bei etwa 20 GPa und wurde mittels Universal-Mikrohärteprüfung bei einer Last von 10 mN bestimmt. Die Haftklasse, welche mittels Rockwell-Eindringprüfung bestimmt wurde, ist mit HF 2-3 gut bis befriedigend. Die kritische Last L_{c2}, bei der die ersten adhäsiven Schichtdelaminationen am Rand der aufgetragenen Ritzspur entstehen, liegen bei 30 N [8].

Ebenfalls wurden in vorangegangenen Voruntersuchungen an den in Bild 3 dargestellten DUPLEX behandelten Proben Ritzversuche zur Bestimmung der Substrathaftung durchgeführt. Hierin wurde nach dem Plasmanitrieren die Hälfte der Proben vor dem Beschichtungsprozess erneut poliert, um den Einfluss der vom Plasmanitrierprozess bedingten Mikro-Topographie zu untersuchen. Die andere Hälfte Proben wurde lediglich gereinigt, so dass die resultierende Mikro-Topographie unbeeinflusst geblieben ist.

Bild 5 zeigt die Resultate der kritischen Last L_{c2} nach den Ritzversuchen der aus Tabelle 1 verwendeten Gasdurchfluss-Verhältnisse H₂:N₂ von 1:7 und 1:1 nach 25 Stunden Plasmanitrierdauer [15].

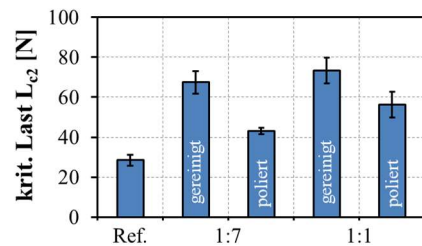


Bild 5: Im Ritztest ermittelte Schichthaftung L_{c2} nach DIN EN 1071-13 an einer vergüteten Referenz sowie die in Tabelle 1 korrespondierenden DUPLEX-Varianten WZ 1 und WZ 2 in Abhängigkeit von der Topographie: gereinigt gegenüber poliert [15]

Der Vergleich von L_{c2} zur vergüteten Referenz (Ref.) zeigt, dass eine Haftungssteigerung um den Faktor 2,3 bis 2,5 in Abhängigkeit von der Oberflächentopographie möglich ist. Dabei ist die Haftungssteigerung noch einmal deutlich ausgeprägter, sofern die Oberflächen nach dem Plasmanitrieren nicht erneut poliert werden. Dies hat große wirtschaftliche Vorteile mit Bezug zur Anwendungsprüfung, da derart DUPLEX behandelte Werkzeuge nach dem Plasmanitrieren für die Anwendungsprüfung nicht erneut in der Reduzierzone poliert werden müssen und somit nach einer erfolgten Reinigung direkt beschichtet werden können.

2.3 Rundkneten

Im Rahmen der Anwendungsversuche wurden die vergüteten sowie die beiden beschriebenen DUPLEX behandelten Rundknetwerkzeuge bei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten auf ihre Einsatztauglichkeit geprüft. Die Oberflächentopographie wurde aufgrund der guten Haftungsergebnisse nach dem Plasmanitrieren nicht mehr verändert, vergleiche Bild 5. Die Werkzeuge wurden vor dem Beschichtungsprozess lediglich mittels Ultraschall gereinigt. Bei allen Versuchen wurde entlang der gesamten Umformzone kein Schmierstoff eingesetzt. Als Werkstückwerkstoff wurde der Baustahl S235 (WKN. 1.0038) vor dem Hintergrund der hohen Kaltverfestigung verwendet. Die verwendeten Stahlrohre weisen einen Ausgangsdurchmesser von d₀ = 20 mm und wurden auf einen finalen Durchmesser von d₁ = 15 mm reduziert. Die Ausgangswandstärke betrug bei den getesteten Rohren s₀ = 2 mm. Bei diesen Wandstärken und Umformformgraden haben hierzu durchgeführte FEM-Simulationen ergeben, dass die mittleren Flächenpressungen pro Schlag bei etwa 1.200 MPa liegen [16].

Im Rahmen dieser trockenen Anwendungsversuche wurden vier verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten getestet, $v_f = 500$ mm/min, 1000 mm/min, 1500 mm/min und 2000 mm/min. Mit steigender Vorschubgeschwindigkeit reduziert sich die Zahl der für die Umformung benötigten Schlagbeanspruchungen auf die applizierten Schichten. Gleichzeitig erhöht sich jedoch die Schubbeanspruchung aufgrund der erhöhten Relativbewegung. Insgesamt wurden derart 55 Rohre umgeformt. Alle anderen Prozessparameter, wie die Einstellung der Umlaufschmierung, die Werkstückeinspannung, die Schlagfrequenz $f_{st} = 35,57$ Hz und der Werkzeughub $h_T = 1$ mm, wurden für die Vergleichbarkeit konstant gehalten.

Vor jedem trockenen Versuch wurde das Knetwerk gestoppt, um die Rundknetwerkzeuge und auch die Werkstücke mit Ethanol zu reinigen. Diese Schritte erfolgten vor dem Hintergrund der Sicherstellung damit keine Öl- bzw. Schmierstoffe aus den anderen geschmierten Bereichen des Rundknetwerks in die Umformzone während der Anwendungstests gelangen konnten. Mit diesem Vorgehen soll die Restölfilmstärke unterhalb von 100 nm beschränkt werden, um die Bedingungen für das Trockenumformen zu schaffen [17].

2.4 Werkzeugprüfung

Neben den einsatzgeprüften und DUPLEX behandelten Werkzeugen wurden zusätzlich zwei vergütete und ausgerangte Rundknetwerkzeuge mit identischer gradiertem Makrostrukturierung aus Kapitel 2.1 entschichtet gleichermaßen in Kapitel 2.2 beschriebenen Plasmanitrierprozessen behandelt. Diese plasmanitrierten Werkzeuge wurden hiernach in der Mitte der Umformzone entlang der Umformrichtung mittels Drahterodieren aufgetrennt. Hieran wurden metallographische Untersuchungen durchgeführt, um zu prüfen, inwieweit sich vergleichbare Randschichtgefüge, verglichen mit den Scheibenproben in Bild 3, einstellen lassen. Hierzu wurden ebenfalls Übersichts- und Detailaufnahmen in den Bereichen des Erstkontaktes der entsprechenden achten Amplitude in der Reduzierzone sowie mittig im Kalibrierbereich aufgenommen.

Die für die Einsatzprüfung vorgesehenen Werkzeuge wurden in unterschiedlichen Intervallen dem Rundknetwerk entnommen und mittels REM/EDX Verschleißanalysen im Detail untersucht. Tabelle 2 zeigt das durchgeführte Verschleißanalyseprogramm nach den jeweiligen Anwendungstests.

Tabelle 2: Durchgeführtes Verschleißanalyseprogramm in Abhängigkeit der untersuchten Vorschubgeschwindigkeiten

getestete Werkzeuge	untersuchte Vorschubgeschwindigkeit	Verschleißanalyse
WZ 1, WZ 3, WZ 4	500 mm/min	REM/EDX
WZ 1, WZ 3, WZ 4	500 + 1.000 mm/min	REM/EDX
WZ 1, WZ 3, WZ 4	500 + 1.500 mm/min	REM/EDX
WZ 1, WZ 3, WZ 4	500 + 2.000 mm/min	REM/EDX

Anhand von BSE-Aufnahmen und EDX-Analysen konnten verschiedene Bereiche von Interesse näher untersucht werden. Diese sind in der Reduzierzone im Bereich des Erstkontaktes sowie in der Kalibrierzone. Nach den Umformversuchen lag der Fokus der Verschleißanalysen auf dem Vorhandensein und der Menge der

Schichtschädigungen wie beispielsweise Delaminationen oder Adhäsionserscheinungen.

3 Ergebnisse

Bild 6 zeigt die metallographischen Schlibfbilder an den ausgerangten Rundknetwerkzeugen, die nach dem Entschichten die jeweils gleichen Plasmanitrierprozesse durchlaufen haben wie die für die Einsatzprüfung vorgesehenen Werkzeuge WZ 3 und WZ 4.

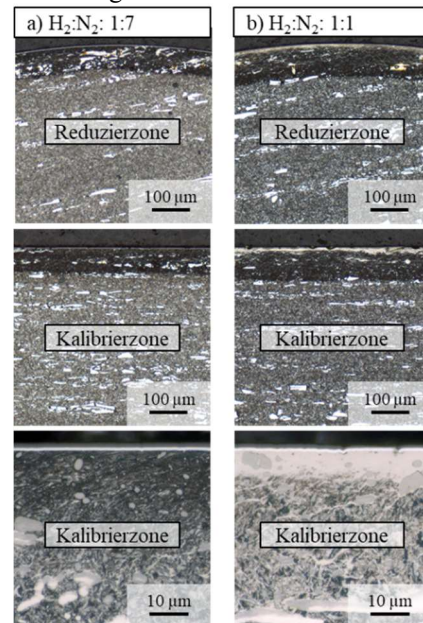


Bild 6: Metallographische Schlibfbilder korrespondierend mit den Werkzeugen: a) WZ 3 mit einem $H_2:N_2$ -Verhältnis von 1:7 und b) WZ 4 mit einem $H_2:N_2$ -Verhältnis von 1:1 an verschiedenen Positionen und mit unterschiedlichen Vergrößerungen

Der Vergleich der Schlibfbilder der zuvor untersuchten Scheibenproben in Bild 3 zeigt, dass die Diffusionszonen sowohl in der Reduzierzone als auch in der Kalibrierzone eine ähnliche Tiefe unabhängig von den eingestellten Gasdurchfluss-Verhältnissen aufweisen. Metallographisch ist somit eine Übertragbarkeit von der Laborprobe auf die komplexe Werkzeuggeometrie nachgewiesen. Lediglich die Dicke der Verbindungsschicht an WZ 4 in Bild 6 erscheint mit 10-12 µm etwas stärker ausgeprägt zu sein. Ebenfalls hervorzuheben ist die konstante Ausbildung der Tiefen der Diffusionszonen im Vergleich von Reduzierzone und Kalibrierzone. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Werkzeuge problemlos für die Anwendungsprüfung DUPLEX behandelt werden können.

Bild 7 zeigt die resultierenden Härtetiefenverläufe $HV_{0,5}$ zwischen der in Bild 3 a gezeigten Scheibenprobe im Vergleich zu den in Bild 6 a dargestellten Reduzier- und Kalibrierzonen bei einem $H_2:N_2$ -Durchfluss-Verhältnis von 1:7, was mit dem Werkzeug WZ 3 korrespondiert.

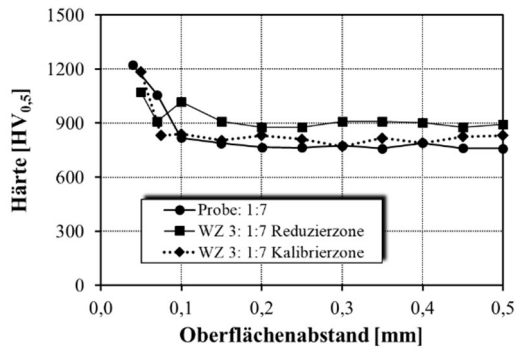


Bild 7: Vergleich der Härtetiefenverläufe in HV_{0,5} zwischen der in Bild 2 a plasmanitrierten Scheibenprobe mit den Plasmanitrierzuständen in den Reduzier- und Kalibrierzonen aus Bild 5 a bei einem H₂:N₂-Verhältnis von 1:7 korrespondierend zu WZ 3

Die Gegenüberstellung der Härtetiefenverläufe zeigt, dass eine Vergleichbarkeit von der Scheibenprobe zu dem Rundnetzwerkzeug WZ 3 weitgehend gegeben ist. Die randnahe Härte liegt bei etwa 1.200 HV_{0,5}. Die Verläufe zwischen Probe und Kalibrierzone passen gut zusammen. Lediglich die Härte der Reduzierzone liegt mit ca. 1.000 bis 1.100 HV_{0,5} etwas darunter.

Bild 8 zeigt die resultierenden Härtetiefenverläufe HV_{0,5} zwischen der in Bild 3 b gezeigten Scheibenprobe im Vergleich zu den in Bild 6 b dargestellten Reduzier- und Kalibrierzonen bei einem H₂:N₂-Durchfluss-Verhältnis von 1:1, was mit dem Werkzeug WZ 4 gut übereinstimmt.

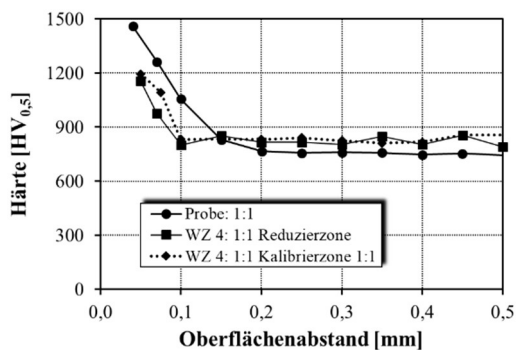


Bild 8: Vergleich der Härtetiefenverläufe in HV_{0,5} zwischen der in Bild 2 b plasmanitrierten Scheibenprobe mit den Plasmanitrierzuständen in den Reduzier- und Kalibrierzonen aus Bild 5 b bei einem H₂:N₂-Verhältnis von 1:1 korrespondierend zu WZ 4

Die Härtetiefenverläufe zwischen Reduzierzone und Kalibrierzone überdecken sich sehr gut. Hier ist jedoch auffällig, dass die randnahe Härte der Probe mit 1.500 HV_{0,5} etwa 300 HV_{0,5} oberhalb der Verläufe von WZ 4 liegen und das trotz der eher geringer ausgeprägten Verbindungsschichtdicke, vergleiche Bild 3 b.

Dieser Aspekt bedarf weiterer Untersuchungen. Eine mögliche Ursache könnte in der Vorzugsrichtung des Gefüges der stranggepressten Profile begründet liegen. Die im Labormaßstab untersuchten Scheibenproben weisen eine Zeiligkeit der Karbide parallel zur Härtetiefenbestimmung auf, wohingegen die Zeiligkeit bei den Werkzeugen nahezu parallel zur Oberfläche bzw. senkrecht zur Härtetiefenbestimmung verläuft. Zudem wurde lediglich ein einzelner Härtetiefenverlauf mit HV_{0,5} pro Position bestimmt. Dennoch kann festgehalten werden, dass

eine Vergleichbarkeit der Oberflächenhärte mit den metallographischen Gefügen nachgewiesen ist und somit von einer vollständigen Übertragbarkeit auf die geometrisch komplexen Werkzeuge ausgegangen werden kann.

Bild 9 zeigt die REM/BSE-Aufnahmen im Rahmen der Verschleißanalysen nach der vollständig durchgeführten trockenen Anwendungsprüfung gegen den Baustahl S235. Links sind die Reduzierzonen der Werkzeuge WZ 1 und der DUPLEX behandelten Varianten WZ 3 und WZ 4 dargestellt, vergleiche Tabelle 2. Rechts sind die entsprechenden Aufnahmen der Kalibrierzonen zu sehen.

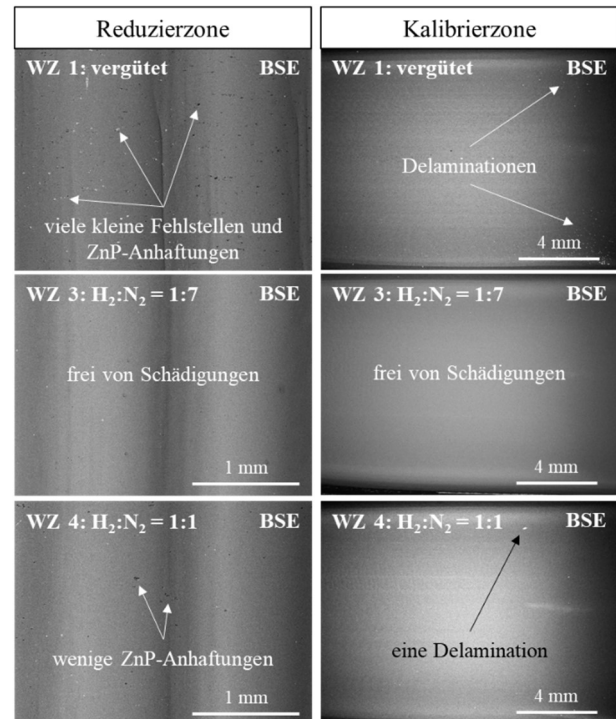


Bild 9: REM/BSE-Aufnahmen im Rahmen der Verschleißanalysen nach dem vollständigen Prüfprogramm von Tabelle 2 der Werkzeuge WZ 1 im vergüteten Zustand sowie den Werkzeugen WZ 3 und WZ 4 der jeweils DUPLEX- Zustände der H₂:N₂-Verhältnisse von 1:7 und 1:1

Die Reduzierzone des vergüteten Rundnetzwerkzeugs WZ 1 weist flächenhaft diskrete weiße und schwarze Stellen auf. EDX-Analysen an den dunklen Stellen haben erhöhte Peaks von Zink, Phosphor und Sauerstoff ergeben. Dies lässt auf die Zinkphosphate schließen, welche als Korrosionsschutzschicht auf den Stahlrohren aufgetragen wird [11]. Die weißen Stellen zeigen den möglichen Beginn der Schichtermüdung. Dies bestätigt die in Bild 1 exemplarisch gezeigten möglichen Ermüdungsmechanismen. Hierbei wurde zwar noch keine vollständige Schichtdelamination nachgewiesen, jedoch konnte im EDX-Spektrum ein Anstieg des Wolfram-Peaks festgestellt werden. Mit Bezug zum applizierten Lagendesign aus Bild 4 kann somit geschlossen werden, dass sich hierbei die Wolfram freie a-C:H-Funktionsschicht abgetragen hat. Da sowohl die weißen als auch dunklen Stellen dieselbe Größe aufweisen, liegt der Verdacht nahe, dass die angehafteten Zinkphosphate lokale Überbeanspruchungen hervorrufen und unterhalb der Adhäsionen eine frühzeitige Schichtermüdung provozieren können. Dennoch ist festzuhalten, dass die PVD-Beschichtung in der Reduzierzone nach der

durchgeführten Anwendungsprüfung noch intakt ist und das primäre Arbeitsergebnis, die resultierende Werkstückqualität, an dieser Stelle nicht beeinflusst wird. Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zur Kalibrierzone von WZ 1, siehe Bild 9 rechts. Hinter der kontinuierlichen Übergangzone vom Reduzier- in den Kalibrierbereich wurden an den Seitenbereichen der Kavität des Werkzeuges zwei lokalisierte Cluster von Delaminationen entdeckt. Dieser Aspekt deutet darauf hin, dass das verwendete Schichtsystem selbst in seiner Festigkeit gegen hohe Schubnormalspannungen gesteigert werden muss. In der Kalibrierzone ist zwar der Umformvorgang abgeschlossen, erreicht aber die höchste Relativbewegung von im Mittel 0,25 m/s, was hierzu eigens durchgeführte FEM-Simulationen ergeben haben.

Im Vergleich zu WZ 1 ist das DUPLEX behandelte Werkzeug WZ 3 frei von Schichtfehlern. Es konnten entlang der gesamten Umformzone keinerlei Delaminationen festgestellt werden. Somit erscheint die DUPLEX-Behandlung mit einem Gasdurchfluss-Verhältnis von $N_2:H_2$ von etwa 1:7 als sehr vielversprechend für eine längere Standzeit mit trockener Prozessführung.

Auch das DUPLEX behandelte WZ 4 zeigt keinerlei Schädigungen in der Reduzierzone. Hier wurden, ähnlich dem vergüteten WZ 1, jedoch ZnP-Adhäsionen mittels EDX-Analysen detektiert, die ebenfalls als schwarze diskrete Stellen erscheinen. Allerdings fallen die Mengen der angehafteten Zinkphosphate weitaus geringer aus als beim WZ 1. Anders als beim WZ 3 konnte in der Kalibrierzone von WZ 4 eine größere Delamination gefunden werden, siehe Bild 9 rechts unten. Hier müssen weitere Analysen durchgeführt werden, ob es sich bei der Delamination um eine Schichtabplatzung bis zum Substrat handelt oder ob es bereits zu einer Schädigung der darunter liegenden und als allgemein hin spröde geltenden Verbindungsschicht gekommen ist. Hierzu werden laserfokal-mikroskopische Messungen durchgeführt werden müssen, um die exakte Tiefe der Schädigung zu bestimmen.

Die REM-Analysen belegen insgesamt die Einsatzbefähigung und das große Potenzial einer DUPLEX-Behandlung für die Trockenbearbeitung von Stahlrohren.

4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden Hartstoffschichtsysteme und Oberflächenstrukturen für die Anwendung auf Rundknetwerkzeugen für die Trockenbearbeitung untersucht. Ein verschleißbeständiges a-C:H(:W)-Multilagenschichtsystem sowie eine gradierte sinusförmige und reibungssteuernde Makrostrukturierung ermöglichen eine trockene Prozessführung. Ziel dieser Untersuchung war es die Schichthaftung bzw. Ermüdungsbeständigkeit des applizierten Schichtsystems unter den tribologischen Gegebenheiten des Rundknetprozesses durch eine DUPLEX-Behandlung zu steigern.

Eine a-C:H:W-Schicht im Einsatz zum Trockenformen von Stahlrohren unterliegt einem Verschleiß, so dass es früh zu ersten Fehlstellen kommt, welche unter anderem durch Adhäsionen von Zinkphosphaten initiiert werden können. Durch die DUPLEX-Behandlung der

Werkzeuge, das heißt einem voran gegangenem Plasmanitrierungsverfahren vor der PVD-Beschichtung, konnte sowohl die Menge der angehafteten Zinkphosphate signifikant reduziert als auch die Menge an Schichtfehlern minimiert werden. Besonders das Plasmanitrieren mit einem Gasdurchfluss-Verhältnis $H_2:N_2$ von etwa 1:7 hat sich als besonders geeignet für eine trockene Prozessführung erwiesen.

Ziele weiterer Arbeiten sind die Untersuchung vom Einfluss von gezielt mikrostrukturierten Oberflächen im Kalibrierbereich, um über die Veränderung der Traganteile die Neigung von Mikro-Adhäsion des Werkstücks zu minimieren. Diese gezielten Mikrostrukturen sollen durch Hartfräsen erzeugt werden. Zudem muss die aufgebrauchte Beschichtung insbesondere gegen die hohen Schubnormalspannungen in der Kalibrierzone weiter verbessert werden. Hierzu wurden bereits die Prozessparameter während des reaktiven Magnetronspüterns angepasst und entsprechend weiter entwickelte Schichtsysteme auf Rundknetwerkzeuge übertragen. Diese Schichten befinden sich derzeit in der Anwendungsprüfung und sind noch Stand der aktuellen Arbeiten.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projektes „TRUK – Potenziale des Trockenrundknetens“ innerhalb des Schwerpunktprogramms 1679 „Trockenumformen – Nachhaltige Produktion durch Trockenbearbeitung in der Umformtechnik“.

Literatur

- [1] C. Kienhöfer, P. Grupp: Rundknettechnik Verfahren, Vorteile, Möglichkeiten. Verl. Moderne Industrie, Landsberg/Lech (2003).
- [2] F. Heislitz: Optimierung des Axial-Radial-Umformens. Eine Verfahrenserweiterung des Rundknetens. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss, 2001. Shaker, Aachen (2001).
- [3] B. Kuhfuß: Hollow drive shafts - a contribution towards weight and cost reduction in automotive construction. Automotive Technology International (1998).
- [4] W. Schätzle: Rundkneten von Vollquerschnitten. DRAHT, 35, 5 (1984) 200–203.
- [5] F. Heislitz: Kraftbedarf beim Kaltrundkneten. Vorhaben Nr. 224. Vergleichende Untersuchungen des Kraftbedarfs beim Kaltrundkneten mit unterschiedlichen Maschinenkonzepten. Abschlussbericht. In Forschungshefte. Forschungskuratorium Maschinenbau e. V. (FKM) (2000) 254.
- [6] M. Herrmann, B. Kuhfuss, C. Schenck: Dry Rotary Swaging - Tube Forming. Key engineering materials KEM, 651/653 (2015) 1042–1047.
- [7] M. Herrmann, C. Schenck, B. Kuhfuss: Dry Rotary Swaging with Structured Tools. Procedia CIRP, 40 (2015) 653–658.
- [8] H. Hasselbruch, M. Herrmann, A. Mehner, B. Kuhfuss, H.-W. Zoch: Development, characterization and testing of tungsten doped DLC coatings for dry rotary swaging. MATEC Web of Conferences, 21 (2015) 8012.
- [9] M. Herrmann: Schmierstofffreies Rundkneten / Trockenrundkneten, Dissertation, Universität Bremen (2019)
- [10] F. Böhmermann, M. Herrmann, O. Riemer, B. Kuhfuß: Reducing Abrasive Particle Generation in Dry Rotary Swaging by Utilizing DLC Hard Coated Dies. MATEC Web of Conferences, 190 (2018) 14011.
- [11] H. Hasselbruch, M. Herrmann, A. Mehner, B. Kuhfuss, H.-W. Zoch: Incremental dry forging - Interaction of W-DLC Coatings and Surface Structures for Rotary Swaging Tools. In Procedia Manufacturing, 8 (2017) 541–548.

- [12] H. Hasselbruch, A. Mehner, H.-W. Zoch: Einfluss der Plasmanitrierparameter und anschließenden Oberflächenveredelung auf die Haftfestigkeit von Wolfram dotierten PVD-a-C:H-Schichtsystemen Proc. 58. Tribologie-Fachtagung, 25.09.-27.09., Göttingen, Deutschland (2017) 59/1-59/11
- [13] M. Herrmann, C. Schenck, B. Kuhfuss: Graded Structured Tools for Dry Rotary Swaging. Dry Metal Forming Open Access Journal, 4 (2018) 18-24.
- [14] M. Herrmann, F. Böhmermann, H. Hasselbruch, B. Kuhfuss, O. Riemer, A. Mehner, H.-W. Zoch: Forming without Lubricant – Functionalized Tool Sur-faces for Dry Forming Applications. In Procedia Manufacturing, 8 (2017) 533–540.
- [15] H. Hasselbruch, A. Mehner, H.-W. Zoch: Influence of plasma nitriding parameters and subsequent surface finishing on adhesion strength of tungsten doped PVD a-C:H coatings. Proceedings of 13th The “A” Coatings International Conference (2017) Vol. 13.
- [16] F. Böhmermann, O. Riemer: Development and application of a test rig for tribological investigations under impact loads. In CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 19 (2017) 129-137.
- [17] A. Almohallami, M. Arghavani, F. Böhmermann, H. Freiße, M. Herrmann, A. Mousavi, S. Schöler, P. Scholz, J. Tenner, M. Teller, G. Umlauf, D. Wulff, D. Yilkiran, H.J. Maier: How dry is dry? - A critical analysis of surface conditions used in dry metal forming. In Dry Metal Forming OAJ FMT, 3 (2017) 90–94. |