

Verschleißoptimierung hochbelasteter Umformwerkzeuge

Stetig steigende Anforderungen an Bauteiltoleranzen, -festigkeiten und -oberflächen erfordern zunehmend den Einsatz hochgenauer Werkzeuge aus Hartmetallen. Derzeit erfolgt die Bearbeitung der Werkzeugoberflächen manuell und erfahrungsbasiert. Einen vielversprechenden Ansatz zur Automatisierung dieses Prozessschritts stellt das Maschinelle Oberflächenhämmern (MOH) dar. MOH ermöglicht eine Einglättung der Werkzeugoberflächen, Druckeigenstressungen in den oberflächennahen Zonen sowie eine Kaltverfestigung der bearbeiteten Randschichten. Im vorliegenden Beitrag wird die Eignung des MOH für den Einsatz an Hartmetallwerkzeugen anhand von Hartmetallproben untersucht.

Entscheidend für die Werkzeugqualität sind nicht nur das Werkzeugmaterial und die geometrische Maßhaltigkeit, sondern ebenso die Oberflächeneigenschaften der Wirkflächen, welche durch einen geeigneten Fertigungsprozess gezielt beeinflusst und optimiert werden können.

Johannes Bruder

Das maschinelle Oberflächenhämmern kann auch bei sehr harten Werkzeugoberflächen zu einer automatisiert durchgeführten Einglättung genutzt werden.“

Prof. Dr. Peter Groche

AUTOREN



Johannes Bruder, M.Sc.

ist Abteilungsleiter Tribologie am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) an der Technischen Universität Darmstadt



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche

leitet das Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) an der Technischen Universität Darmstadt



Philipp Gehringer, M.Sc.

ist ehemaliger wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) an der Technischen Universität Darmstadt



Andreas Kördel, M.Sc.

ist ehemaliger Abschlussarbeiter am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) der Technischen Universität Darmstadt

Im Jahr 2021 erzielte Deutschland mit einem Produktionsvolumen von 4,3 Mrd. Euro den höchsten europäischen Anteil an der Werkzeugherstellung, wovon 1,9 Mrd. Euro auf die Blech- und Massivumformung entfielen [1]. Der zunehmende Einsatz hochfester Werkstoffe sowie gestiegene Anforderungen an Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität führen zu stetig wachsenden Ansprüchen an Werkzeuge hinsichtlich der Oberflächengüte, den Verschleißseigenschaften und der Präzision. Gleichzeitig müssen Werkzeuge kosteneffizient hergestellt und ausreichend langlebig sein, um den Bedarf an Ersatzwerkzeugen zu reduzieren.

Einen vielversprechenden Ansatz zur Lösung dieses Zielkonflikts stellt das maschinelle Oberflächenhämmern (MOH) dar. Das seit 2007 patentierte Verfahren hat sich bereits in der industriellen Anwendung etabliert, unter anderem bei Automobilherstellern im Großwerkzeugbau [2, 3]. Das mechanische Oberflächenbehandlungsverfahren dient der Einglättung technischer Oberflächen und bewirkt gleichzeitig eine Erhöhung der Oberflächenhärte sowie die Einbringung von Druckeigenspannungen. Diese Effekte können maßgeblich zur Erhöhung der Standzeit beitragen, insbesondere bei Werkzeugen und Bauteilen, die schwellenden oder wechselnden mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt sind. Das

Wirkprinzip des MOH ähnelt dem traditionellen Dengeln von Sensen. Dabei werden durch wiederholte Hammerschläge Unebenheiten an der Schneide eingeebnet. Die dadurch erzeugte lokale Kaltverfestigung führt zu einer erhöhten Härte führt [4]. Derart behandelte Sensen zeichnen sich durch eine deutlich höhere Standzeit im Vergleich zu geschliffenen Varianten aus [5].

Darüber hinaus kann das MOH manuelle Nachbearbeitungsschritte wie beispielsweise das Polieren, ersetzen. Dies reduziert nicht nur Zeit- und Lohnkosten, sondern erhöht zugleich die Reproduzierbarkeit der Bearbeitungsergebnisse. Laut VDI-Richtlinie 3416 lassen sich Fertigungszeiten von Umformwerkzeugen durch den Einsatz des MOH um etwa 30 Prozent reduzieren, während die Prozesskosten um bis zu 50 Prozent sinken können [6].

Bisher wurde das Verfahren überwiegend bei konventionellen Werkzeugstählen eingesetzt. Der vorliegende Beitrag untersucht, ob das Verfahren auch für hochfeste Werkzeughmaterialien, insbesondere Hartmetalle, geeignet ist und unter welchen Prozessparametern optimale Ergebnisse erzielt werden.

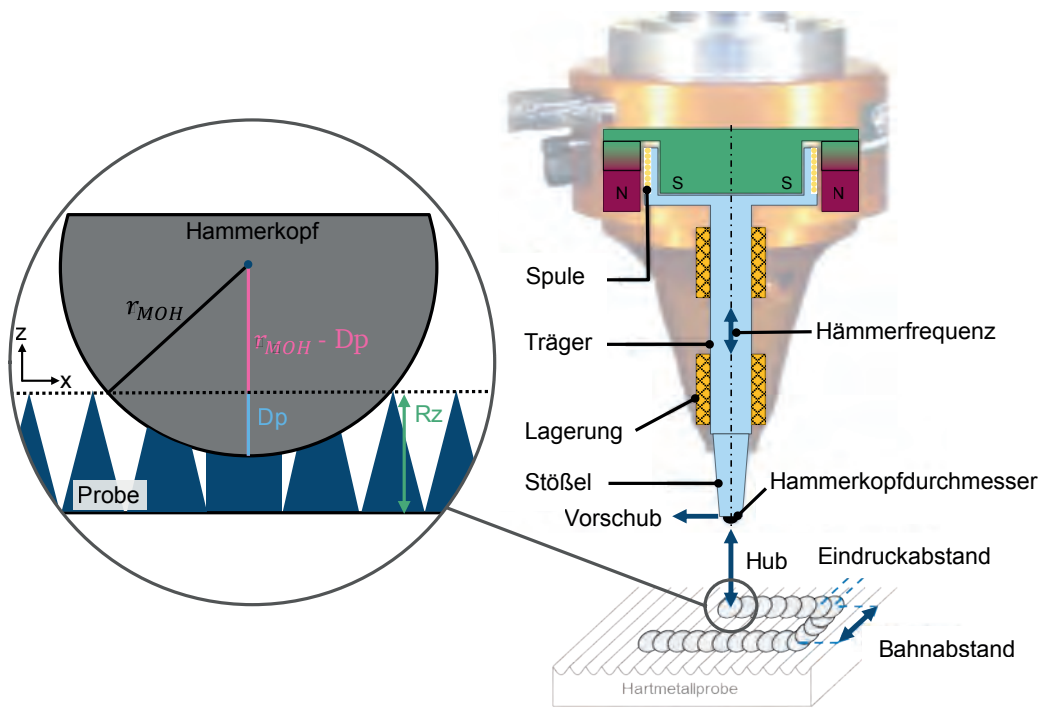


Bild 1: Aufbau des Hammersystems und schematische Darstellung des Verfahrensprinzips des MOH nach [Ste15, Sti16, Lec14] (rechts), mikroskopische Betrachtung des Prozessablaufs beim MOH (links)

VERFAHRENSBESCHREIBUNG

Der grundlegende Aufbau eines Hammersystems ist in Bild 1 dargestellt und besteht aus einem gelagerten Stößel, an dessen Ende sich ein Hammerkopf mit einem Kopfradius (r_{MOH}) befindet. Der Stößel wird durch einen Aktuator zu einer oszillierenden Bewegung angeregt, wobei der Hammerkopf in Abhängigkeit des zu bearbeitenden Werkstoffs und der gewünschten Eindringtiefe gewechselt werden kann. Die Antriebsenergie zur Beschleunigung des Stößels wird elektromagnetisch, pneumatisch oder piezoelektrisch erzeugt. Das im Rahmen dieser Untersuchungen eingesetzte Hammersystem der Firma Accurapuls arbeitet mit einem elektromagnetischen Aktuator.

Parameter	Wert
Hammerkopfdurchmesser	20 mm
Hub	0,5 mm
Frequenz	200 Hz
Systemleistung	75 Prozent
Bahnabstand	0,2 mm
Eindruckabstand	0,2 mm
Vorschub	2.400 mm/min
Auftreffwinkel	senkrecht
Ausgangsmaterial	erodiert/gefräst/geschliffen/MOH

Tabelle: Versuchsparameter

Während der Bearbeitung wird das Hammersystem mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit und definiertem Bahnabstand über die Werkstückoberfläche geführt. Die Kombination aus Hämmerfrequenz und Vorschub bestimmt den Eindruckabstand. Der Prozessablauf auf mikroskopischer Ebene (Bild 1, links) verdeutlicht, dass Rauheitsspitzen beim Aufprall plastisch verformt und eingeebnet werden. Eine Halbierung der Ausgangsrauheit, die durch den Kennwert R_z beschrieben wird, wird als optimale Einglättung angesehen. Die Eindringtiefe D_p charakterisiert die Materialverdrängung in Z-Richtung und korreliert mit der wirkenden Schlagenergie. Die Schlagenergie ist maßgeblich für die erzielte Einglättung und wird in der Literatur durch unterschiedliche Modellansätze beschrieben [7].

Die im Rahmen der Untersuchungen verwendeten Standardparameter sind, sofern nicht anders angegeben, in Tabelle 1 zusammengefasst.

ERGEBNISSE DER EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN

Bild 2a) zeigt die Oberflächentopographie einer erodierten Hartmetallprobe (GB32) vor und nach dem MOH sowie die entsprechenden Oberflächenaufnahmen. Sowohl visuell als auch aus der 3D-Oberflächentopographie, welche durch das konfokal Mikroskop μ Surf Expert aufgenommen wurde, wird der Einfluss des MOH deutlich. Ausgeprägte Rauheitsspitzen werden reduziert und die Oberflächenqualität verbessert sich sichtbar.

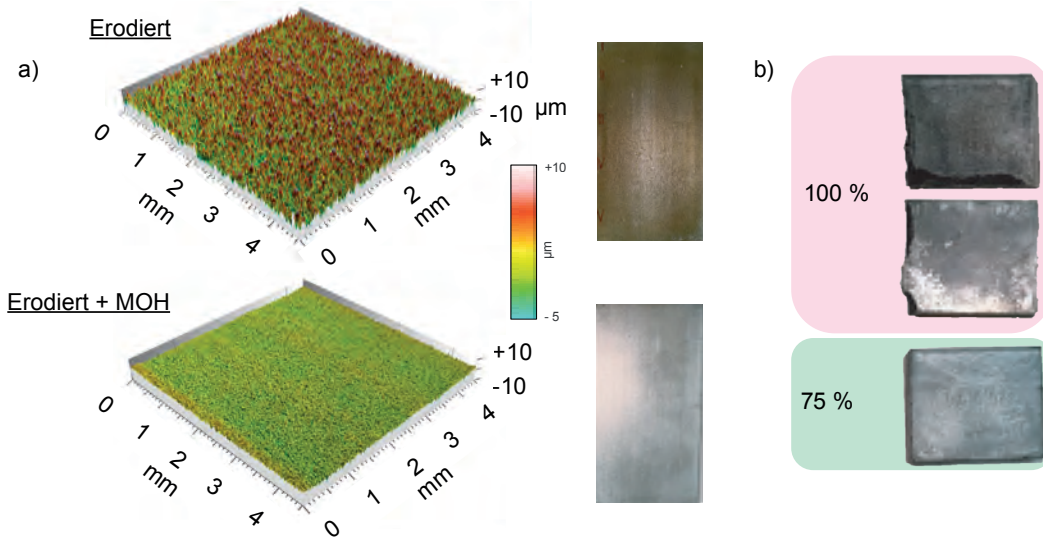


Bild 2: Vergleich der Oberflächentopographie der erodierten Probe vor und nach MOH-Bearbeitung (a), Einfluss variierender Systemleistungen auf das Hämmerergebnis (b)

Vorversuche zeigten, dass eine Systemleistung von 100 Prozent zu Materialausbrüchen an den Probenrändern führt (Bild 2b). Durch die Reduktion der Systemleistung auf 75 Prozent konnten diese Schäden vollständig vermieden werden. Da spröde Werkstoffe besonders anfällig für derartige Ausbrüche sind, muss dieser Effekt bei der Auslegung von MOH-Prozessen an Hartmetallen zwingend berücksichtigt werden.

EINFACH GEHÄMMERT

In Bild 3 sind die aus den Rauheitsprofilen abgeleiteten R_z -Werte sowie die Härte der vier untersuchten Ausgangszustände (erodiert/gefräst/geschliffen/MOH) vor und nach dem MOH dargestellt. Ergänzend sind die zugehörigen Oberflächenaufnahmen zu sehen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Rauheit der erodierten, gefrästen und MOH-behandelten Proben signifikant abnimmt, während bei der geschliffenen Probe eine Zunahme der Rauheit R_z von 0,16 auf 0,34 μm festgestellt wurde. Die Härtewerte steigen bei den Proben „erodiert“ und „MOH“, während bei den beiden anderen Zuständen keine signifikanten Veränderungen festgestellt wurden. Sowohl hinsichtlich der Rauheit als auch der Härte nimmt die Wirkung der Bearbeitung mit zunehmender Ausgangsrauheit zu. Dies ist auf eine stärkere Einglättung grob strukturierter Oberflächen zurückzuführen (Bild 1). Die lokal erhöhten Spannungen an Rauheitsspitzen führen zu ausgeprägteren plastischen Verformungen, wodurch sich sowohl der R_z -Wert als auch die erzielte Härtezunahme deutlicher verändern.

PARAMETERVARIATION

Neben der Bearbeitung mit den in Tabelle 1 aufgeführten Standardparametern wurde eine systematische Variation zentraler Prozessgrößen durchgeführt. Dabei standen der Bahn- und Eindruckabstand, die Anzahl der Hämmerdurchläufe sowie der Einfluss von ölbenetzten im Vergleich zu gereinigten Oberflächen im Fokus. Ziel dieser Untersuchungen war es, den Einfluss einzelner Prozessparameter auf das Hämmerergebnis zu quantifizieren und daraus praxisnahe Empfehlungen für industrielle Anwendungen abzuleiten.

In der Praxis werden Bahn- und Eindruckabstand in der Regel gemeinsam angepasst. Eine Halbierung beider Parameter führt zu einer Vervierfachung der Bearbeitungszeit. Unterschreiten Bahn- und Eindruckabstand einen kritischen Wert, resultieren daraus für den industriellen Einsatz unwirtschaftlich lange Bearbeitungszeiten. Zur Abbildung praxisnaher Prozessbedingungen wurden Bahn- und Eindruckabstand innerhalb jeder Versuchsreihe identisch eingestellt und zwischen den Versuchsreihen variiert. Bild 4 zeigt die Zunahme der Bearbeitungszeit infolge reduzierter Abstände bezogen auf eine Fläche von 32 cm^2 . Bei Abstandswerten unter 0,08 mm wird der exponentielle Anstieg deutlich sichtbar, was zu erheblich verlängerten und somit wirtschaftlich nicht mehr vertretbaren Prozesszeiten führt. Neben der Bearbeitungszeit sind die ermittelten R_z - sowie S_z -Werte nach der MOH-Bearbeitung mit den definierten Abständen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen

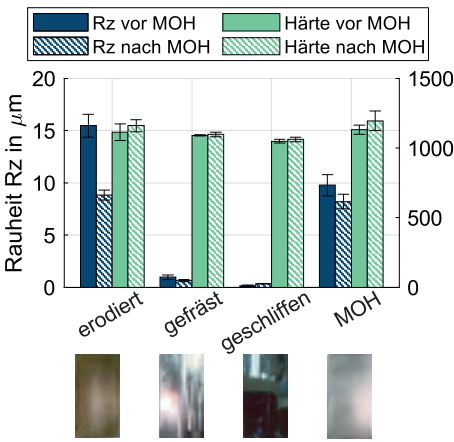


Bild 3: Werkstoffparameter (R_z und Härte) vor und nach MOH-Bearbeitung unterschiedlicher Ausgangsoberflächenzustände

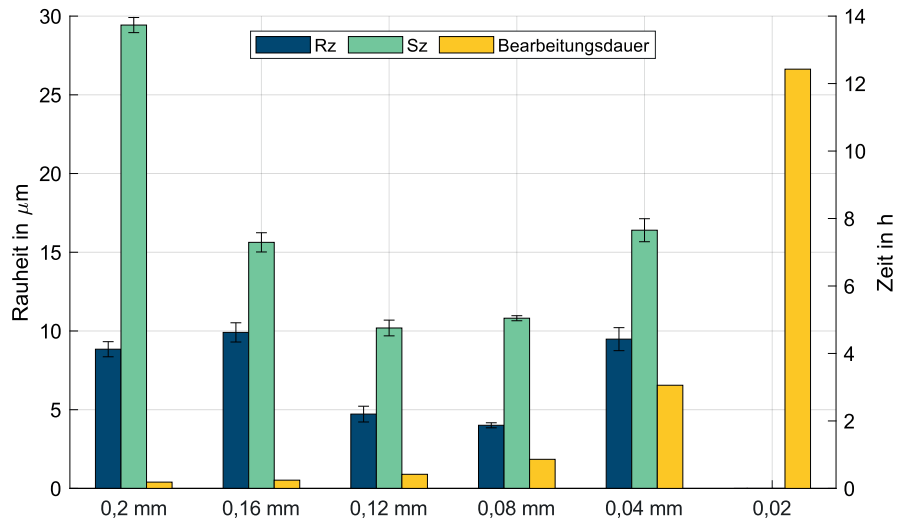


Bild 4: Einfluss variierender Bahn- und Eindruckabstände beim MOH auf die Oberflächenkennwerte und die Bearbeitungsdauer

Einfluss des Abstands auf die erzielte Einglättung. Unter den untersuchten Prozessbedingungen ergibt sich bei einem Bahn- und Eindruckabstand zwischen 0,12 mm und 0,08 mm ein Optimum. Unter Berücksichtigung der erzielten Einglättung sowie der moderaten Bearbeitungszeit sind Bahnabstände zwischen 0,12 mm und 0,08 mm als technisch und wirtschaftlich sinnvoll zu bewerten.

Bild 5 zeigt den Vergleich der Rauheitswerte bei variierender Anzahl an Wiederholungsdurchläufen sowie bei ölbefetzten und gereinigten Oberflächen. Der Einsatz eines Ölfilms erfolgt aus prozesstechnischer Sicht zur Reduzierung des Verschleißes am Hammerkopf, insbesondere bei nicht senkrechtem Auftreffen auf die Werkzeugoberfläche und der damit einhergehenden Relativbewegung zwischen Hammerkopf und Werkstück. Der Schmierstoffeinsatz ermöglicht somit eine Standzeiterhöhung des Hammerkopfs. Die unterschiedlichen Versuchskonfigurationen wurden jeweils an einem Probekörper durchgeführt. An diesen erfolgte die Bearbeitung der Oberfläche mit den jeweiligen Parametern auf definierten Quadraten. Es wurden bis zu fünf Hämmerdurchläufe pro Quadrat ausgeführt. Die dabei auftretenden deutlichen visuellen Unterschiede sind auf eine Glättung beziehungsweise Änderung der Mikrostruktur der Oberfläche zurückzuführen.

Für gereinigte Oberflächen zeigt die Erhöhung der Anzahl an Durchläufen keine signifikanten Unterschiede in den Rauheitswerten. Demgegenüber hat ein aufgebrachtter Ölfilm einen deutlichen Einfluss. Besonders hervorzuheben ist die zweifache Bearbeitung, bei der ein Anstieg der Rauheit um rund 100 Prozent gegenüber dem ersten Durchlauf beobachtet wurde. Der Ölfilm verhindert zumindest teilweise den direkten Kontakt zwischen Hammerkopf und Werkzeugoberfläche. Dadurch tritt

die plastische Deformation infolge von Kompressionseffekten zwar weiterhin auf, fällt jedoch geringer aus, was zu einer Aufrauung der Oberfläche führen kann. Daraus folgt, dass der Einsatz von Schmierstoffen die erzielbare Oberflächenglättung begrenzt. Zur Erzielung möglichst geringer Rauheitswerte sind daher trockene Prozessbedingungen zu bevorzugen. Dabei sollte die Bearbeitung zur Minimierung des Werkzeugverschleißes mit einem möglichst senkrechten Auftreffwinkel erfolgen.

FAZIT

Im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen wurden systematische Variationen zur Optimierung der Prozessparameter des MOH an Hartmetallen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass es sich beim MOH um einen komplexen, von zahlreichen Stellgrößen beeinflussten Prozess handelt. Mit Hilfe der durchgeführten Versuche konnten Handlungsempfehlungen zur Einstellung optimaler Prozessparameter abgeleitet werden.

Es zeigte sich, dass das Potenzial der Einglättung stark von der Ausgangsrauheit abhängt. Rauere Oberflächen, wie die erodierten Proben, konnten signifikant geglättet werden, wohingegen hochglatte Oberflächen, wie geschliffene Proben, durch das Hämmern wieder aufgeraut werden. Ein Bahn- beziehungsweise Eindruckabstand zwischen 0,08 mm und 0,12 mm wurde als optimaler Prozessparameter identifiziert. Eine ölbefetzte Oberfläche während der Bearbeitung führt vor allem bei mehrfachen Bearbeitungsgängen zu erheblichen Prozessschwankungen. Insbesondere bei spröden Werkstoffen wie Hartmetallen ist die Bearbeitung von Randbereichen eine besondere Herausforderung, da hier ein erhöhtes Risiko von Abplatzungen besteht. Um Beschädigungen zu vermeiden, sollte die maximale Systemleistung materialabhängig reduziert werden, sofern eine Bearbeitung der Ränder erforderlich ist.

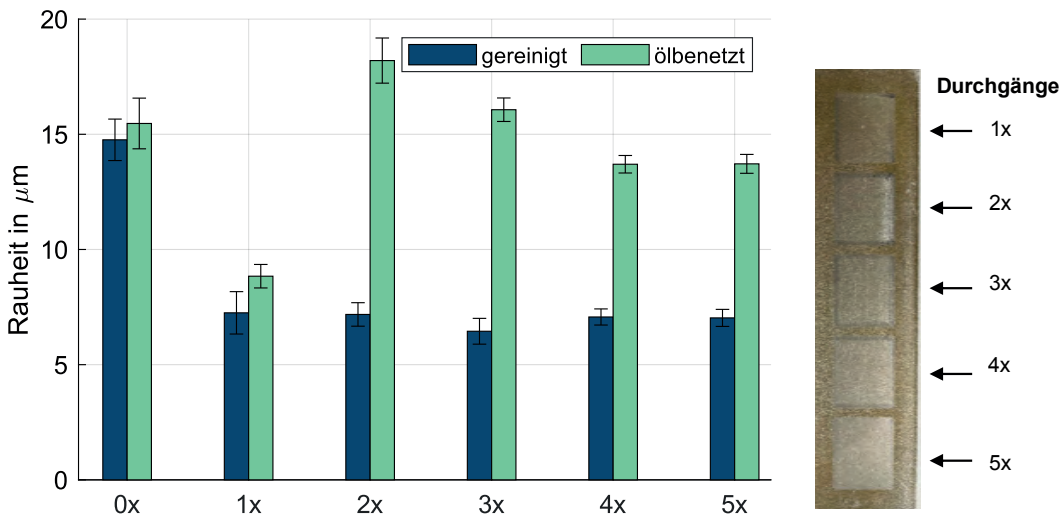


Bild 5: Einglättung durch MOH bei variierenden Prozessparametern (gereinigt/ölbenezt; mehrfachgehämmert), Bilder: Autoren

Zusammenfassend bestätigen die Untersuchungen die grundsätzliche Eignung des maschinellen Oberflächenhämmerns zur gezielten Oberflächenmanipulation von Hartmetallen. Das Verfahren stellt damit auch für diese Werkstoffklasse einen vielversprechenden Ansatz zur Standzeiterhöhung hochbelasteter Umformwerkzeuge dar. Die in Bild 1 dargestellte Prozesskinematik ist jedoch für die Bearbeitung innenliegender, schwer

zugänglicher Wirkflächen nicht geeignet. Solche Geometrien treten in der Kaltmassivumformung, beispielsweise bei Fließpressmatrizen, prozessbedingt häufig auf. Um eine ganzheitliche Werkzeugbearbeitung durch maschinelles Oberflächenhämmern zu ermöglichen, müssen auch diese schwer zugänglichen Bereiche bearbeitet werden. Hierfür ist die Entwicklung einer speziell angepassten Prozesskinematik erforderlich, die die Bearbeitung sowohl außen- als auch innenliegender Werkzeugflächen erlaubt.



- [1] Boos, W. et al.: Tooling in Germany. Aachen: WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH, 2023
- [2] „FORGEfix (Air): Klopfen fürs perfekte Finish“. In: Werkzeug & Formenbau, Juni 2012
- [3] Groche, P.; Steitz, M.: „Prozesskettenverkürzung im Werkzeugbau: Integration von Verfahren der maschinellen Oberflächeneinglättung“. In: wt Werkstattstechnik online (2011), S. 655 – 659
- [4] Accurapuls GmbH. Produktgruppen. 2023. url: <http://accurapuls.de/Produktgruppen.html> (aufgerufen am 14.03.2023)
- [5] Förster, R.; Förster, A.: „Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580“. In: Einführung in die Fertigungstechnik: Lehrbuch für Studenten ohne Vorpraktikum. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2018
- [6] VDI3416 Blatt 1: Maschinelles Oberflächenhämmern. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2018
- [7] Schulze, V.; Bleicher, F.; Groche, P.; Guo, Y. B.; & Pyun, Y. S.: (2016). Surface modification by machine hammer peening and burnishing. Cirp Annals, 65(2), S. 809 – 832



Das IGF-Vorhaben „Wear optimization of highly stressed shaping tools“ der AiF-Forschungsvereinigung FSV e. V. wurde unter der Fördernummer 268 EN im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages