



Technische Universität Wien
Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien

DISSERTATION

BEEINFLUSSUNG DER RANDSCHICHT DURCH DISKRETE MIKROUMFORMUNG

zum Zwecke der Erlangung
des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften

ausgeführt am

E311 - Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien
der Technischen Universität Wien eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

durch

Dipl.-Ing.(FH) Stephan Krall, MSc
Matr.Nr. 1228440

unter der Anleitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Friedrich Bleicher

Begutachtet von

Prof. Dr. Konrad Wegener

Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigung – ETH Zürich

Leonhardstrasse 21
8092 Zürich
Schweiz

Prof. Dr.-Ing. Michael Weigand

Institut für Konstruktionswissenschaften
und Produktentwicklung – TU Wien

Getreidemarkt 9
1060 Wien
Österreich

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Dissertation

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, 04.10, 2019

Unterschrift

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, Erkenntnisse über die Auswirkungen der System- und der Stellgrößen auf die Prozess- und die resultierenden Wirkgrößen eines mechanischen Oberflächenbearbeitungsprozesses, dem sogenannten maschinellen Oberflächenhämmern (engl. Machine Hammer Peening - MHP), zu gewinnen. Das Verfahren basiert auf einem oszillierenden Hammerkopf, der wiederholt auf eine Werkstückoberfläche trifft. Eine Aktorik, welche die Hammerkopfbewegung ausführt, wird an einer Werkzeugmaschine oder einem Roboter befestigt und entlang einer vorgegebenen Bahn geführt. Gemäß der VDI 3416 verwendet die Technologie ein Aktorsystem, um die Oberflächenrauheit zu reduzieren, die Oberflächenhärte zu steigern und oberflächennahe Druckeigenstressungen zu erzeugen. Darüber hinaus wird in dieser Arbeit ein umfassendes Verständnis des gesamten Bearbeitungsprozesses, basierend auf Maschinenuntersuchungen sowie dem Vergleich verschiedener MHP-Aktorsysteme, geschaffen. Um jedoch gezielte Oberflächenstrukturen herstellen zu können, ist die Kopplung zwischen der Bahndynamik des Maschinensystems und der Bewegung des Hammerkopfes erforderlich. Aufgrund der NC-gesteuerten Positionierung und der präzisen Werkzeugführung zeigt der MHP-Prozess auch die Fähigkeit – unter der Anwendung funktional gestalteter Werkzeuge – definierte Mikrostrukturen auf einer Werkstückoberfläche herzustellen. Im Gegensatz zu Beschichtungstechniken zur Funktionalisierung von Oberflächen erfolgt die Herstellung durch einen Mikroumformprozess. Diese Tatsache, in Kombination mit der Möglichkeit der Phasenumwandlung des Kristallgitters einer metastabilen austenitischen CrNi-Legierung hin zu einer martensitischen Struktur durch den Einsatz des genannten Verfahrens, birgt großes Potenzial dieser Technologie. Um die Eignung eines piezoelektrischen Aktors zur Herstellung von Mikrostrukturen zu überprüfen, werden Versuche am Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-1 (1.2343) durchgeführt. Neben der Strukturierung der Oberfläche wird die durch plastische Verformung induzierte Phasenumwandlungen an einem metastabilen austenitischen CrNi-Werkstoff X5CrNi18-10 (1.4301) untersucht. Untersuchungen werden an einem Roboter sowie an Fräsbearbeitungszentren durchgeführt. Als Aktoriken sind ein elektromagnetisches, ein pneumatisches, sowie ein piezoelektrisches Aktorsystem Bestandteil der Untersuchungen. Im speziellen ist es der piezoelektrische Aktor welcher in dieser Arbeit herangezogen wird um Mikrostrukturen auf der Oberfläche eines Warmarbeitsstahles herzustellen. Ausgehend von diesen geschaffenen Mikrostrukturen auf Formeinlege-teile für ein Spritzgusswerkzeug wird in einem nachgelagerten Spritzgussprozess gezeigt, dass die Oberflächen am Kunststoff-Formteil wasserabweisende Eigenschaften aufweisen. Im Bereich der induzierten Phasenumwandlungen eines CrNi-Werkstoffes kann in den oberen Schichten des Werkstücks eine Phasenumwandlung von einer metastabilen austenitischen in eine martensitische Phase erreicht werden.

Abstract

The objective of this research is to gain knowledge about the effects of the system- and the independent variables on the dependent variables and the resulting material properties of a mechanical surface treatment process, called machine hammer peening (MHP). MHP is based on an oscillating hammer head which strikes repeatedly on a workpiece surface. The actuator, which provides the tool movement, is attached to a machine tool or a robot in order to treat the surface with well-directed impacts. According to VDI 3416, the technology uses an actuator system to reduce surface roughness, increase surface hardness, and induce near surface compressive residual stresses. Moreover, a comprehensive understanding of the entire machining process, based on machine investigations as well as the comparison of different MHP actuators, is created in this work. However, to achieve distinctively oriented surface structures and patterns the coupling between the tool path motion and the actuator motion dynamics is required. When producing defined surface structures to influence the surface integrity by the use of MHP, the acceleration of the machining system has to be considered. Apart from the named surface properties, structured tools can also be applied for surface treatment processes to create defined surface textures. In the past, these surface properties were achieved by advanced coatings or additional finishing technologies. While both work, they have their limitations. Coatings wear off over time. This fact, in combination with the possibility of phase transformation of the crystal lattice of a processed metastable austenitic to martensitic structure by the application of machine hammer peening, contains great potential. For this purpose, a coupling between the impact frequency of the MHP-system and the speed distribution on the tool path must be realized. Along with adapted NC-controlled motion of the machining system, a predictable sequence of contacts between the tool and the workpiece can be achieved. Further, to verify the suitability of an investigated piezoelectric actuator to create microstructures, experiments are carried out on the hot work tool steel X38CrMoV5-1 (1.2343). In addition to surface texturing, the deformation induced phase transformations on a metastable austenitic CrNi material X5CrNi 18-10 (1.4301) is investigated. As a result, it is possible to create deterministic patterns on the surfaces of workpieces and influence the surface characteristics. Experimental investigations have been performed using a KUKA robot KR30-3 equipped with an electromagnetic actuator system. Another application for a vibration-based process was shown by creating micro-structured surfaces with a piezoelectric actuator for a subsequent mold injection process which show hydrophobic surface conditions on the plastic molded part. Finally, due to plastic deformation of the crystalline steel material, as caused by machine hammer peening treatment in the upper layers of the workpiece, phase transformations may be achieved, from a metastable austenitic phase to a martensitic phase. The results obtained in this project show the potential for expanded application of mechanical surface treatments, like machine hammer peening.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Inhaltsverzeichnis | 1 |
| Vorwort..... | 3 |
| 1 Einleitung | 13 |
| 2 Grundlagen und Stand der Technik..... | 17 |
| 2.1 Maschinelles Oberflächenhämmern..... | 17 |
| 2.2 MHP-Technologien zur Oberflächenbearbeitung..... | 18 |
| 2.3 MHP-Aktortechnologie | 21 |
| 2.3.1 Patentrecherche..... | 23 |
| 2.3.2 Pneumatisch angetriebene Aktorsysteme | 24 |
| 2.3.3 Elektrodynamisches Aktorsystem | 27 |
| 2.3.4 Mechanische Systeme | 29 |
| 2.3.5 Piezoelektrische Systeme | 30 |
| 2.3.6 Sonotroden Systeme | 31 |
| 2.3.7 Elektromagnetisches Aktorsystem..... | 32 |
| 2.4 Nomenklatur in der MHP-Bearbeitung | 34 |
| 2.5 Wirkgrößen bei der MHP-Bearbeitung | 36 |
| 2.5.1 Plastische Deformation durch die MHP-Bearbeitung..... | 37 |
| 2.5.2 Beschichten durch die MHP-Bearbeitung | 39 |
| 2.5.3 Beeinflussung der Oberflächenrauheit durch die MHP-Bearbeitung | 40 |
| 2.5.4 Erzeugung funktionaler Oberflächen durch Mikrostrukturen..... | 42 |
| 2.5.5 Einfluss der MHP-Bearbeitung auf die Kaltverfestigung..... | 43 |
| 2.5.6 Beeinflussung des Spannungszustandes | 45 |
| 2.5.7 Änderung des Werkstoffgefüges..... | 46 |
| 3 Zielsetzung und Vorgehensweise | 49 |
| 4 Prozess des maschinellen Oberflächenhämmerns | 51 |
| 4.1 Maschinensystem als Werkzeugträgersystem..... | 52 |
| 4.1.1 Einfluss des dynamischen Maschinenverhaltens | 55 |
| 4.1.2 Einfluss des statischen Maschinenverhaltens | 58 |
| 4.1.3 Einfluss der Bahninterpolation und der Bearbeitungsstrategie | 61 |

| | |
|---|-----|
| 4.2 Steuerung des Einzelschlages der E-MHP-Aktorik..... | 68 |
| 4.3 Modellbasierte Beschreibung..... | 76 |
| 4.3.1 Prozessmodell auf Basis der Energiebilanz..... | 77 |
| 4.3.2 FEM-Modell der Energieumsetzung im Einzeleinschlag..... | 78 |
| 4.3.3 Ergebnis der Simulation zur Energiebeschreibung..... | 78 |
| 4.4 Einfluss des Werkstück-Werkstoff..... | 85 |
| 4.4.1 Versuchsbeschreibung und Auswertung | 87 |
| 4.4.2 Versuchsdurchführung..... | 88 |
| 4.4.3 Einfluss auf die Kaltverfestigung..... | 91 |
| 4.4.4 Einfluss auf die Rauheit | 96 |
| 5 Oberflächenstrukturierung durch Mikroumformung | 103 |
| 5.1 Entwicklung einer Aktorik zur Mikrostrukturierung | 104 |
| 5.1.1 Piezoelektrische Grundlagen und Entwurfsprozess | 105 |
| 5.1.2 Vorversuche..... | 110 |
| 5.2 Antriebsauslegung..... | 111 |
| 5.2.1 Aufbau der Aktorik zur Mikrostrukturierung..... | 115 |
| 5.2.2 Messtechnische Evaluierung der Aktorik..... | 118 |
| 5.3 Werkzeuge zur Mikrostrukturierung | 121 |
| 5.4 Versuchsdurchführung und Auswertung | 123 |
| 5.5 Strukturierte Formeinsätze..... | 131 |
| 6 Gefügeumwandlung durch Mikroumformung..... | 139 |
| 6.1 Grundlagen zur Phasenumwandlung..... | 139 |
| 6.2 Versuchsdurchführung und Auswertung | 144 |
| 6.3 Beschreibung der Umformarbeit | 154 |
| 6.4 Aufbringen von Signaturen..... | 158 |
| 7 Zusammenfassung und Ausblick..... | 163 |
| Abbildungsverzeichnis | 167 |
| Tabellenverzeichnis | 171 |
| Literaturverzeichnis..... | 173 |