

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

T. Abeln
Grundlagen und Verfahrenstechnik
des reaktiven Laserpräzisionsabtragens
von Stahl

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtragens von Stahl

Von Dr.-Ing. Tobias Abeln
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

D 93

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Konstruktions- und Fertigungstechnik
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Friedrich Dausinger
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kück

<p>Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich</p>
--

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2002

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2002

ISBN 3-8316-0137-2

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

Kurzfassung

Fortschreitende Entwicklungen in der Mikroelektronik und -systemtechnik verlangen kontinuierlich nach neuen präziseren Fertigungsverfahren. Daraus ergibt sich die Forderung, metallische Werkstoffe präzise zu strukturieren.

Deshalb befasst sich diese Arbeit mit dem Verfahren des Laser-Mikrospanens, um insbesondere die Strukturpräzision zu erhöhen. Bei diesem Prozess wird der Werkstoff auf Zündtemperatur erhitzt und unter Sauerstoffumgebung oxidiert. Dadurch kann erreicht werden, dass das Material nicht über die schmelzflüssige Phase abgetragen wird. Der entstehende Oxidspan kann dadurch in fester Form von der Materialoberfläche entfernt werden. Dabei kommen Festkörperlaser zum Einsatz, die bei hoher Strahlqualität eine gute Fokussierbarkeit ermöglichen.

In der vorliegenden Arbeit wird das Prozessverständnis des Laserspanens erweitert. Dies erfolgt insbesondere durch die Betrachtung der ablaufenden Vorgänge in der Wechselwirkungszone sowie durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen.

Dabei hat sich gezeigt, dass sich eine in Abhängigkeit von den Prozessparametern mehr oder weniger stark ausgeprägte Dampfkapillare (Keyhole) ausbildet, wie sie vom Laserschweißen bekannt ist. Dadurch wird die Oxidschicht dünn gehalten, welche die Reaktionspartner Fe und O_2 voneinander trennt, und es sind relativ hohe Strukturiefen erreichbar.

Auf das Abtragsergebnis haben verfahrenstechnische und materialspezifische Einflussfaktoren starke Auswirkungen. Um einen flächigen Abtrag zu erzeugen, werden die einzelnen Bearbeitungsspuren mit einem bestimmten Überlapp aneinandergereiht. Dabei hat sich gezeigt, dass der optimale Bahnversatz, um eine geringe Oberflächenrauheit zu erzielen, in einem Bereich zwischen $1/4$ und $1/5$ des Fokusedurchmessers liegt. Bei unlegierten und legierten Stählen ohne das Legierungselement Nickel war mit zunehmender Leistung eine lineare Zunahme der Strukturiefe zu beobachten. Dabei nimmt die Abtragsrate mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt des Werkstoffs zu. Die Legierungselemente zeigen einen starken Einfluss auf die Spanbildung. Hochlegierte Werkstoffe bilden zusammenhängende, flächige Oxidspäne aus, wohingegen der Span bei unlegierten Werkstoffen relativ schnell zerfällt. Tiefe und dreidimensionale Strukturen mit geringer Rauheit des Strukturgrunds können über eine Mehrfachbearbeitung erzielt werden.

Mit dem Verfahren des reaktiven Abtragens ist es somit möglich, sehr präzise Strukturen unter Vermeidung eines Nachbearbeitungsverfahrens herzustellen. Anwendungsfelder sind insbesondere dort zu sehen, wo im Prototypenstadium häufig die Struktur geändert wird und somit eine hohe Flexibilität gefordert ist.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Formelzeichen und Abkürzungen	9
Extended Abstract	13
1 Motivation und Zielsetzung	17
2 Stand der Technik	19
2.1 Einordnung der Bearbeitungsverfahren.....	19
2.2 Konventionelle Präzisionsbearbeitungsverfahren	20
2.2.1 Mechanische Verfahren	20
2.2.2 Funkenerosive Verfahren (EDM)	20
2.2.3 Ätzverfahren und elektrochemische Verfahren (ECM)	21
2.2.4 Lithographische Verfahren	22
2.2.5 Ultraschallbearbeitungsverfahren (USM)	23
2.2.6 Ionen- und Elektronenstrahlverfahren	23
2.2.7 Laserverfahren	24
2.2.8 Verfahrensvergleich	26
2.3 Laserspanen	27
3 Physikalische und technologische Grundlagen des Laserspanens	30
3.1 Physikalische Grundlagen	30
3.1.1 Phänomenologie	30
3.1.2 Energiehaushalt des Laserspanens	36
3.1.3 Phänomenologische Abläufe des Laser-Mikrospanens	49
3.1.4 Wechselwirkungsprozesse beim reaktiven Abtragen	52
3.1.5 Spanbildung und -ablösung	60
3.2 Technologische Grundlagen	64
3.2.1 Bearbeitungsstrategien beim Abtragen	64
3.2.2 Einflussgrößen auf den Flächenabtrag	66
3.2.3 Bestimmung des Abtragsvolumens	67

3.2.4	Bestimmung der Rauheit.....	67
3.2.5	3-D-Flächenabtrag	70
4	Experimentelle Untersuchungen.....	73
4.1	Systemtechnik	73
4.1.1	Laserstrahlquelle	73
4.1.2	Strahlführung und -formung	79
4.1.3	Positioniersystem	82
4.2	Untersuchung der Prozessparameter/Einflussfaktoren.....	84
4.2.1	Generelle Zusammenhänge	84
4.2.2	Einfluss des Bahnversatzes	94
4.2.3	Einfluss der Gasströmung	96
4.2.4	Einfluss der Laserleistung	98
4.2.5	Einfluss des Kohlenstoffgehalts	99
4.2.6	Einfluss der Legierungselemente	101
4.2.7	Einfluss der Verfahrensgeschwindigkeit.....	106
4.2.8	Oxidausbildung	109
4.2.9	Einfluss der Wellenlänge	111
4.2.10	Mehrfachbearbeitung	113
4.3	Anwendungsbeispiele.....	118
5	Zusammenfassung und Ausblick	122
6	Anhang.....	125
6.1	Werkstoffe – Chemische Zusammensetzung	125
6.2	Werkstoffe – Physikalische Werkstoffkennwerte	126
	Literatur	127