

Andre Eltze

**Lasernitrieren von Aluminiumwerkstoffen**  
Untersuchungen zu Prozeßparametern  
und Anwendbarkeit



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist  
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, Bayreuth, Univ., 2001

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 3-8316-0102-X

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

# Inhaltsverzeichnis

<b>KAPITEL 1</b>	<b>EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG</b>	<b>1</b>
<b>KAPITEL 2</b>	<b>GRUNDLAGEN – STAND DER TECHNIK</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Aluminium</b>	<b>3</b>
2.1.1	Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Aluminium	3
2.1.2	Korrosion von Aluminiumoberflächen	6
2.1.3	Tribologisches Verhalten von Aluminiumwerkstoffen	7
2.1.4	Behandlung von Aluminium zur Verbesserung der Korrosions- und Verschleißbeständigkeit	8
2.1.5	Aluminium in Verbrennungskraftmaschinen	9
<b>2.2</b>	<b>Laser</b>	<b>12</b>
2.2.1	Materialbearbeitung mit Lasern	12
2.2.2	Grundlagen und Anwendungen von Excimerlasern	13
2.2.3	Grundlagen und Anwendungen von Nd:YAG-Lasern	15
<b>2.3</b>	<b>Aluminiumnitrid und Lasernitrieren</b>	<b>18</b>
2.3.1	Eigenschaften, Herstellung und Verwendung von Aluminiumnitrid	18
2.3.2	Methoden zum Nitrieren der Oberfläche von Aluminium	19
2.3.3	Lasernitrieren von Aluminium – Stand der Technik	20
2.3.4	Lasernitrieren von Aluminium – Stand der Modellbildung	23
<b>KAPITEL 3</b>	<b>EXPERIMENTELLE VORGEHENSWEISE</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Werkstoffe und Probenvorbereitung</b>	<b>29</b>
3.1.1	Verwendete technische Aluminiumlegierungen	29
3.1.2	Herstellung von binären Al-Legierungen	30
3.1.3	Vorbereitung der Oberfläche für die Laserbehandlung	31
<b>3.2</b>	<b>Lasernitrieren</b>	<b>31</b>
3.2.1	Verwendete Lasersysteme	31
3.2.2	Strahlführung und -formung, Druckkammer	32
3.2.3	Bewegung der Proben zum flächigen Lasernitrieren	34
<b>3.3</b>	<b>Analyseverfahren</b>	<b>35</b>
3.3.1	Eingesetzte Verfahren der Mikroskopie	35
3.3.2	Röntgendiffraktometrie zur Phasenanalyse und Eigenspannungsmessung	36
3.3.3	Elektrochemische Korrosionsmessungen und Auslagerungsversuche	36
3.3.4	Bestimmung von Rauheit, Verschleiß und Universalhärte	37
<b>3.4</b>	<b>Quantitative Oberflächenanalytik</b>	<b>39</b>
3.4.1	Analytik mit Glimmentladungsspektrometer	39
3.4.2	Verwendetes Glimmentladungsspektrometer und Auswertung der Messungen	42
3.4.3	Ergebnisse der Kalibration und Vergleich mit quantitativer Phasenanalyse	47

<b>KAPITEL 4</b>	<b>GRUNDLAGENUNTERSUCHUNGEN ZUM LASERNITRIEREN</b>	<b>51</b>
<b>4.1</b>	<b>Legierungseinfluß</b>	<b>51</b>
4.1.1	Qualitative Bewertung der Oberfläche lasernitrierter Legierungen	52
4.1.2	Quantitative Charakterisierung der Nitrierschichten	55
4.1.3	Modell für den Legierungseinfluß auf das Nitrierergebnis	61
4.1.4	Zusammenfassende Bewertung des Legierungseinflusses	62
<b>4.2</b>	<b>Wellenlängenabhängigkeit des Lasernitrierens</b>	<b>63</b>
4.2.1	Qualitative Bewertung des Nitrierens mit IR-Laserstrahlung	63
4.2.2	Einfluß der Wellenlänge: Quantitative Auswertung der Nitrierexperimente	66
4.2.3	Einfluß der Bearbeitungsparameter beim Nitrieren mit IR-Laserstrahlung	69
4.2.4	Zusammenfassende Bewertung der Wellenlängenabhängigkeit	70
<b>4.3</b>	<b>Weitere Einflußparameter</b>	<b>72</b>
4.3.1	Bedeutung des Laserstrahldurchmessers	72
4.3.2	Abgrenzung der Effekte durch Laserumschmelzen und Lasernitrieren	73
4.3.3	Lasernitrieren an Luft und Stickstoff bei variablem Druck	76
<b>KAPITEL 5</b>	<b>TECHNOLOGISCH RELEVANTE ERGEBNISSE UND ANWENDUNGEN</b>	<b>79</b>
<b>5.1</b>	<b>Anwendungsnahe Untersuchungen</b>	<b>79</b>
5.1.1	Ergebnisse von Messungen der Warmhärte und Verschleißbeständigkeit	79
5.1.2	Entstehung von Poren in Nitrierschichten	81
<b>5.2</b>	<b>Korrosionseigenschaften von nitriertem Aluminium</b>	<b>84</b>
5.2.1	Auslagerungsversuche in praxisrelevanten, korrosiven Medien	84
5.2.2	Ergebnisse elektrochemischer Untersuchungen	89
5.2.3	Zusammenfassende Bewertung der Korrosionseigenschaften	91
<b>5.3</b>	<b>Vergleich der Verfahren Plasmanitrieren und Lasernitrieren</b>	<b>91</b>
5.3.1	Schichteigenschaften plasmanitrierter AlN-Schichten	92
5.3.2	Einfluß der Prozeßparameter auf das Nitrierergebnis	95
5.3.3	Anwendungsbezogener Vergleich der Nitrierverfahren und Zusammenfassung	95
<b>5.4</b>	<b>Anwendungen des Lasernitrierens</b>	<b>97</b>
5.4.1	Lasernitrieren von Kolben für Verbrennungsmotoren	97
5.4.2	Lasernitrieren der Bohrsäulen für Kernbohrmaschinen	99
5.4.3	Oberflächenbehandlung von Zylinderlaufflächen	99
<b>5.5</b>	<b>Lasernitrieren von Magnesiumwerkstoffen</b>	<b>101</b>
5.5.1	Nachweis von Stickstoff in lasernitriertem Magnesium	101
5.5.2	Eigenschaften von lasernitriertem Magnesium	103
<b>KAPITEL 6</b>	<b>ZUSAMMENFASSENDE DISKUSSION UND AUSBLICK</b>	<b>105</b>
<b>6.1</b>	<b>Einfluß der Bearbeitungsparameter</b>	<b>105</b>
<b>6.2</b>	<b>Einsatz von modernen Festkörperlasern</b>	<b>108</b>
<b>6.3</b>	<b>Ausblick</b>	<b>110</b>
<b>ANHANG</b>		<b>113</b>
<b>Gefügeaufnahmen</b>		<b>113</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>123</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>		<b>131</b>

# Kapitel 1

## Einleitung und Zielsetzung

„Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz von Produkten und Systemen wird von den eingesetzten Werkstoffen maßgeblich beeinflusst. Dabei bilden verbesserte oder neuartige Werkstoffe die Basis für Systeminnovationen und haben Schlüssel- und Schrittmacherfunktion für technologischen und ökonomischen Fortschritt.“ [BMBF00]

Die Anwendung von Leichtbauwerkstoffen in Verbindung mit neuen Fertigungstechnologien bietet viele Möglichkeiten, dem Trend zunehmender Fahrzeuggewichte von Personenkraftwagen entgegenzuwirken und über Gewichtsreduzierungen Kraftstoffeinsparungen zu erzielen. Dabei ermöglicht insbesondere der Einsatz von Aluminium im Motorblock von Verbrennungskraftmaschinen eine erhebliche Gewichtsersparnis. Aluminiumwerkstoffe weisen darüber hinaus eine bessere Gießbarkeit und höhere Wärmeleitfähigkeit als Eisengußlegierungen auf und bieten deshalb die Möglichkeit, feinere und komplexere Strukturen direkt in den Motorblock zu integrieren, woraus sich sekundäre Gewichtsreduzierungen und günstigere Gebrauchseigenschaften ergeben.

Die sehr gut gießbaren, naheutektischen Aluminiumlegierungen verfügen allerdings über eine ungenügende Verschleißbeständigkeit [ALU95]. Da das bisher meist verwendete Konzept, bei welchem Büchsen aus Grauguß in den Aluminium-Motorblock eingegossen werden, zahlreiche Nachteile aufweist, kommt den Verfahren der Oberflächenbehandlung eine Schlüsselrolle bei der Weiterentwicklung von Aluminiummotoren zu. Allerdings ist das Hauptproblem der Schutzschichten, die sowohl zu einer Verbesserung der Verschleiß- als auch der Korrosionsbeständigkeit von Aluminiumwerkstoffen führen, ihre teilweise ungenügende Haftbeständigkeit.

Ein neues Verfahren der Oberflächenbehandlung von Aluminium ist das Lasernitrieren, mit dem festhaftende, verschleißbeständige Aluminiumnitridschichten erzeugt werden können [AUD95]. Es ermöglicht eine lokale Behandlung besonders beanspruchter Stellen, z.B. von Zylinderlaufflächen oder Kolben von Verbrennungsmotoren, und verfügt über alle Vorteile

laserbasierter Verfahren, wie Berührungslosigkeit, hohe Automatisierbarkeit, große Freiheit in der Bauteilgeometrie und die Möglichkeit der Fertigteilbearbeitung.

In der vorliegenden Arbeit soll durch eine eingehende Charakterisierung des Nitrierergebnisses der Nachweis der Anwendbarkeit und der Prozeßsicherheit des Lasernitrierens erbracht werden.

In Kapitel 2 wird der Bedarf einer Oberflächenbehandlung von Aluminiumbauteilen bei korrosiver und tribologischer Beanspruchung deutlich gemacht, die möglichen Verfahren diskutiert sowie die Grundlagen und Vorarbeiten zum Lasernitrieren vorgestellt.

In Kapitel 3 sind die nitrierten Werkstoffe und ihre Vorbereitung, die verwendeten Laser- und Bearbeitungssysteme sowie die eingesetzten Untersuchungsmethoden erläutert.

Kapitel 4 schafft durch Grundlagenuntersuchungen eine Basis für das Verständnis der physikalischen Vorgänge beim Lasernitrieren. Im einzelnen wird in Kapitel 4.1 zunächst die Nitrierfähigkeit und AlN-Schichtbildung in Abhängigkeit von allen typischen Legierungselementen des Aluminiums untersucht und in einem Modell beschrieben. Damit soll die Prozeßsicherheit und Übertragbarkeit der Ergebnisse auf beliebige Aluminiumlegierungen geklärt werden. Von hohem wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Interesse ist die Abhängigkeit des Nitrierprozesses von der verwendeten Wellenlänge und damit von der Laserstrahlquelle, da hiervon einerseits das Verständnis des Nitrier-Mechanismus, andererseits die Einsetzbarkeit von modernen und kostengünstigen Lasern abhängt. Diese Wellenlängenabhängigkeit ist in Kapitel 4.2 anhand von Versuchen mit einem Festkörperlaser bei drei verschiedenen Wellenlängen untersucht. In Kapitel 4.3 dienen weitergehende Untersuchungen einem verbesserten Verständnis des zugrundeliegenden Prozesses. Dazu wird auf den Einfluß der Bearbeitungsparameter eingegangen und eine Abgrenzung der Effekte durch Laserumschmelzen und Lasernitrieren erreicht.

In Kapitel 5 werden technologisch relevante Fragen geklärt und Anwendungen des Lasernitrierens vorgestellt. Im einzelnen sind in Kapitel 5.1 technologisch wichtige Fragen untersucht, wie die Härte bei erhöhten Temperaturen und die Verschleißbeständigkeit sowie die Entstehung von Poren. Für eine Anwendung ist die Korrosionsbeständigkeit der nitrierten Aluminiumoberflächen ähnlich wichtig, wie ihre Verschleißseigenschaften. In Kapitel 5.2 werden daher lasernitrierte Proben in Auslagerungsversuchen und elektrochemischen Messungen bezüglich ihrer Korrosionseigenschaften charakterisiert. In Kapitel 5.3 erfolgt ein Vergleich mit dem alternativen Verfahren des Plasmanitrierens. Im Praxiseinsatz von lasernitrierten Bauteilen zeigt sich die Anwendbarkeit anhand von drei Beispielen in Kapitel 5.4, dem sich Versuche zur Übertragbarkeit des Lasernitrierens auf Magnesium in Kapitel 5.5 anschließen.

Die Arbeit schließt in Kapitel 6 mit einer zusammenfassenden Diskussion der Ergebnisse aus den vorangegangenen Kapiteln und einem Ausblick auf Anwendungen, die im Rahmen der Erkenntnisse dieser Arbeit erschlossen worden sind.