

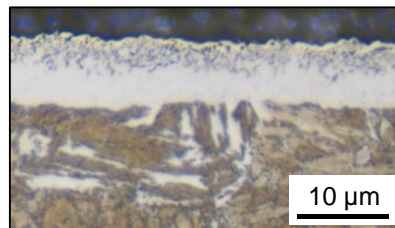
Verbindungsschichtdesign für tragfähigkeitsoptimierte Zahnflanken

Das Nitrieren ist neben dem Einsatzhärten ein bewährtes Verfahren, um die Gebrauchseigenschaften von Zahnrädern zu verbessern. Die Nitrierschicht besteht in der Regel aus einer Verbindungs- und einer Diffusionsschicht, deren Aufbau gezielt durch die Wärmebehandlungsparameter beeinflusst werden kann. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens AiF 17730/FVA 482 IV zeigen, dass durch einen günstigen Verbindungsschichtaufbau die tribologische Tragfähigkeit hinsichtlich Verschleiß und Graufleckigkeit signifikant verbessert werden kann. Der beste Kompromiss für diese in AiF 17730/FVA 482 IV untersuchten Schadensarten ist eine Verbindungsschicht mit einem ϵ -Nitrid-Anteil von mindestens 50 %. Damit ergeben sich jedoch unterschiedliche Anforderungen zur tribologischen Tragfähigkeit von Nitrierschichten nach AiF 17730/FVA 482 IV und zur Grübchentrugfähigkeit nach ISO 6336-5:2016, in welcher für die höchste Werkstoffqualität ME bei Nitrierschichten ein γ'/ϵ -Nitridverhältnis > 8 gefordert wird.

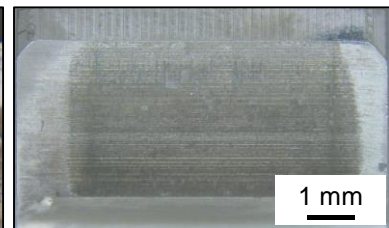
Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war die Erforschung der Beziehung zwischen Verbindungsschicht und Tragfähigkeit nitrierter Zahnräder auf Basis experimenteller Ergebnisse, sowie die Erarbeitung von Empfehlungen zum Nitrieren von Verzahnungen für die praktische Anwendung. Dazu wurden zunächst mit Hilfe des geregelten Nitrierens und Nitrocarburierens im Gas und Plasma gezielt Verbindungsschichten mit unterschiedlichen Nitrid-Phasenzusammensetzungen, Verbindungsschichtdicken und Porositäten hergestellt und metallografisch charakterisiert. Anschließend wurden ausgewählte Verbindungsschichten auf Prüfverzahnungen übertragen und experimentelle Untersuchungen zur Grübchentrugfähigkeit sowie ergänzend zur Verschleiß- und Graufleckentrugfähigkeit durchgeführt.

Über die Standardanalyse (Querschliff mit Nital-Ätzung und Härteverlauf) hinaus, wurde die Phasenzusammensetzung der Verbindungsschichten durch Sonderätzungen, Röntgenografie und GDOES ermittelt. Unterschiedliche Stickstoffkonzentrationen in der Verbindungsschicht und somit die Unterscheidung zwischen γ' - und ϵ -Nitrid, können durch eine Ätzung nach Beckert/Klemm sichtbar gemacht werden. Eine Ätzung nach Murakami macht unterschiedliche Kohlenstoffkonzentrationen sichtbar und hebt somit speziell ϵ -Carbonitrid-Phasen hervor.

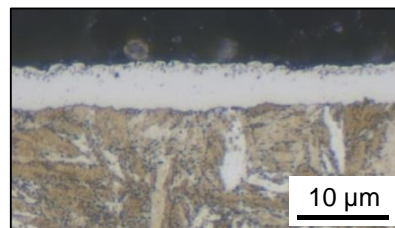
Durch die Kombination einer Murakami Ätzung mit anschließender Bildanalyse ist es möglich, die Anteile der Nitridphasen in der Verbindungsschicht quantitativ zu bestimmen.



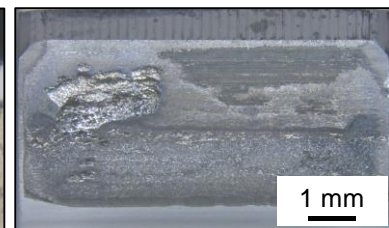
Ausreichender Porenraum



Keine Schäden



Unzureichender Porenraum



Graufleckigkeit, Grübchen

Verbindungsschichten (Neuzustand) und exemplarische Flankenfotos (geprüft) zweier Varianten des Werkstoffs 31CrMoV9

Die Ergebnisse der Laufversuche am FZG-Kleintriebeprüfstand mit Achsabstand $a = 52$ mm belegen unabhängig vom Werkstoff einen signifikanten Einfluss der Eigenschaften der Verbindungsschicht, insbesondere des Porensaums, auf die Grübchentragfähigkeit. Ein ausreichend ausgeprägter Porensaum beeinflusst die Grauflecken- und Grübchentragfähigkeit positiv, was den dominanten Einfluss des Porensaums auf die Grauflecken- und Grübchentragfähigkeit nach AiF 17730/FVA 482 IV bestätigt. Ein Einfluss der Phasenzusammensetzung der Verbindungsschicht auf die Grübchentragfähigkeit wurde nicht nachgewiesen. Solange an der Oberfläche der Zahnflanke eine geschlossene, tragfähige Verbindungsschicht vorliegt und Graufleckigkeit durch einen ausreichend ausgeprägten Porensaum vermieden werden kann, ist eine hohe Grübchentragfähigkeit zu erwarten. Ist die Verbindungsschicht dagegen beschädigt (z. B. durch Graufleckigkeit) bzw. nicht tragfähig, ist von einer Minderung der Grübchentragfähigkeit auszugehen. Zudem belegen die Ergebnisse, dass eine Übertragung einer hochtragfähigen Nitrierschicht (Standard-Nitrierstahl 31CrMoV9) auf alternative, kostengünstige Werkstoffe (z. B. 42CrMo4) möglich ist und vergleichbare, hohe Grübchentragfähigkeiten erreicht werden können. Die ermittelten Grübchen-Dauerfestigkeitswerte ordnen sich oberhalb bzw. zum Teil deutlich oberhalb der in ISO 6336-5:2016 ausgewiesenen Festigkeitskennwerte für nitrierte Nitrierstähle bzw. einsatzgehärtete, legierte Stähle ein und zeigen das Potential einer erhöhten Grübchen-Dauerfestigkeit, sofern Graufleckigkeit durch einen ausreichend ausgeprägten Porensaum sicher vermieden werden kann.

Die Untersuchungen zur tribologischen Tragfähigkeit ($a = 91,5$ mm) bestätigen die Ergebnisse aus AiF 17730/FVA 482 IV, dass die tribologische Tragfähigkeit nitrierter Zahnräder maßgebend von den Eigenschaften der Verbindungsschicht abhängig ist. Die experimentellen Untersuchungen zum Graufleckenverhalten belegen, dass der Porensaum eine maßgebende Einflussgröße darstellt. Solange ein ausreichend dicker und tragfähiger Porensaum an der Zahnflanke vorliegt, kann Graufleckigkeit (weitestgehend) vermieden werden. Unter dieser Voraussetzung scheint der Einfluss der Phasenzusammensetzung der Verbindungsschicht auf die Grauflecken- und Grübchentragfähigkeit von untergeordneter Bedeutung zu sein, solange ein Phasenanteil von mindestens 10 % ϵ -Nitrid in der Verbindungsschicht vorliegt. Hinsichtlich der Verschleißtragfähigkeit weisen Verbindungsschichten mit einem hohen Anteil an hartem ϵ -Nitrid von mindestens 50 % ein günstiges Verschleißverhalten auf. Negative Einflüsse hoher Verbindungsschicht- und Porensaumdicken von bis zu $CLT \leq 30$ μm bzw. $CLT_P \leq 9$ μm auf das Verschleißverhalten wurden nicht festgestellt, was ebenfalls die Ergebnisse aus AiF 17730/FVA 482 IV bestätigt.

Auf Basis der experimentellen Untersuchungen zur Grübchen- und tribologischen Tragfähigkeit sowie unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Vorhabensreihen FVA 386, FVA 482 und FVA 615 wurden Empfehlungen für die praktische Anwendung zum Verbindungsschichtdesign für tragfähigkeitsoptimierte nitrierte Zahnflanken abgeleitet. Für eine optimale Zahnflankentragfähigkeit (Grauflecken-, Verschleiß- und Grübchentragfähigkeit) sind Verbindungsschichtdicken zwischen 5 $\mu\text{m} \leq CLT \leq 25$ μm , eine Mindest-Porensaumdicke von $CLT_P > 2$ μm , sowie eine Phasenzusammensetzung von mindestens 50 % ϵ -Nitrid in der Verbindungsschicht anzustreben.

Die Ergebnisse der theoretischen Untersuchungen bestätigen grundsätzlich, dass eine Abschätzung der Grauflecken- und Verschleißtragfähigkeit nach ISO/TS 6336-22:2018 bzw. FVA 10 nitrierter Zahnräder in der Paarung nitriert/nitriert möglich ist, jedoch zum Teil große Sicherheitsreserven beinhaltet.

Die Untersuchungen erweitern den Wissenstand zur Grübchen-, Grauflecken-, und Verschleißtragfähigkeit nitrierter Zahnräder und ermöglichen dem Anwender eine beanspruchungsgerechte Einstellung der Verbindungsschicht. Auf Basis der Ergebnisse wurden die Anforderungen der Norm ISO 6336-5:2016 zu den Werkstoffeigenschaften nitrierter Zahnräder überprüft und Vorschläge für deren Erweiterung abgeleitet. Die bestehenden Berechnungsverfahren zur Flankentragfähigkeit wurden auf ihre Anwendbarkeit auf nitrierte Verzahnungen überprüft.

Autoren: Michaela Sommer, M.Sc.

Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT

André Sitzmann, M.Sc.

Technische Universität München | TUM School of Engineering and Design
Lehrstuhl für Maschinenelemente | Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebe-
systeme (FZG)

Kontakt: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA)

Dr. Ing. Stefan Gross

T 069- 66 03- 18 88

Das IGF-Vorhaben IGF-Nr. 20067-N der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Hintergrundinformationen zur FVA

Die FVA ist das weltweit führende Innovationsnetzwerk der Antriebstechnik. Die 170 laufenden Projekte der industriellen Gemeinschaftsforschung fördern die Innovationsfähigkeit der Industrie im Bereich der Antriebstechnik und ist an den wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen ein wichtiger Beitrag zur Ausbildung von Jungingenieuren in und für die Branche. Die 207 Mitgliedsfirmen sind produzierende Unternehmen aus der Antriebstechnikbranche. Zusammen mit den über 40 Forschungsinstituten bildet die FVA die Basis für das weltweit führende Netzwerk der Antriebstechnik.

Die FVA versteht sich als eine wichtige Plattform der Kommunikation und des Wissenstransfers zwischen Wissenschaft und Industrie. Themenfelder sind die mechanische und die elektrische bzw. mechatronische Antriebstechnik, sowohl von stationären industriellen Anlagen als auch von Fahrzeugen, mobilen Maschinen und Luftfahrzeugen. Die Gemeinschaftsforschung hat zum Ziel, das technische Know-how der Unternehmen und die Qualität ihrer Produkte zu verbessern und die Produktionskosten zu senken. Informationsveranstaltungen, Seminare und Tagungen der Forschungsvereinigung bieten den Unternehmen die Möglichkeit, neueste Forschungsergebnisse anzuwenden und Mitarbeiter entsprechend aus- und weiterzubilden.

Weitere Informationen unter www.fva-net.de.