

Weiterentwicklung der mikromagnetischen Multiparameter-Methode zur zerstörungsfreien Ermittlung von Gefüge- und Spannungsgradienten in randschichtgehärteten und -verfestigten Zuständen

AiF-Nr.:
18171 N

Obmann:
Dr.rer.nat. Michael Gierling

beteiligte Unternehmen
ZF Friedrichshafen, Härterei Technotherm,
Rieker, Dr. Sommer Werkstofftechnik, OSK
Kiefer, Metal Improvement, Lohnhärtere
Harms

Laufzeit:
01.04.2014 – 30.09.2016

Erstelldatum:
01.03.2017

Forschungsstellen:
Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT),
Bremen

Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüf-
verfahren (IZFP), Saarbrücken

Projektleiter:
Dr.-Ing. Jérémy Epp
Dr.-Ing. Klaus Szielasko

Sachbearbeiter:
Dipl.-Ing. Nils Alisch
Dipl.-Ing. (FH) Melanie Kopp

Forschungsvereinigung:
AWT

Projektbegleitender Fachausschuss
FA 13 (Eigenspannungen)

Zielsetzung und Lösungsweg

1 Einleitung

Bauteile des Maschinenbaus weisen in verschiedenen Stadien des Produktionsprozesses durch unterschiedliche Herstellungsverfahren Randschichten mit Werkstoffgradienten auf. Diese sind im einfachsten Falle (einer Bearbeitung von quasi einphasig vergüteten Werkstoffen) Verfestigungs- und Eigenspannungsgradienten. Mit thermochemischen Randschichtwärmebehandlungen werden zudem zielgerichtet auch oberflächennahe Gradienten einer chemischen Zusammensetzung erzeugt, die ihrerseits Gradienten von Härte, Eigenspannungen, Phasenzusammensetzung und Verfestigung und damit komplexe Werkstoffzustände randnaher Schichten bewirken.

Die Kenntnis über den Zustand dieser Randschichten ist für die Beurteilung von Bauteileigenschaften unter schwingender Beanspruchung bzw. unter Verschleißbeanspruchung unerlässlich. Die Qualitätssicherung erfolgt in vielen Fällen nach wie vor zerstörend. Besonders im Falle hoher Bauteilkosten und geringer Stückzahlen kann daher nur ein Bruchteil des Produktionsvolumens geprüft werden. Daher besteht eine hohe Nachfrage aus der Industrie, möglichst zerstörungsfrei Werkstoffe und deren Zustände zu charakterisieren.

2 Lösungsansatz

Das Lösungspotential zur direkten Erfassung von tiefenabhängigen Werkstoffeigenschaften bis in Tiefen von ca. 5 mm bietet der bekannte „Skineffekt“ [1]. Dieser beschreibt die frequenzabhängige Eindringtiefe von elektromagnetischen Wechselfeldern, wobei hohe Frequenzen stärker gedämpft werden als niedrige Frequenzen. Dabei ist die Eindringtiefe umgekehrt proportional zur Wurzel der Frequenz. Bei der 3MA-Prüfmethode [2] werden die zu untersuchenden Werkstoffe mit einem magnetischen Wechselfeld ummagnetisiert, wobei die Ummagnetisierungsvorgänge von den mechanisch-technologischen Eigenschaften beeinflusst werden. Zur Analyse der Ummagnetisierungsvorgänge werden die Oberwellen der magnetischen Tangentialfeldstärke, das magnetische Barkhausenrauschen, in ausgewählten Frequenzbereichen und die Wirbelstromüberlagerung bei bestimmten Arbeitsfrequenzen ausgewertet. Das Grundprinzip des neuen Ansatzes besteht darin, dass durch eine automatische Frequenzvariation eine Steuerung der erfassten Werkstofftiefe erfolgt. Hierdurch soll erstmalig eine Auftragung und Analyse der mikromagnetischen 3MA-Kenngrößen (von welchen bereits bekannt ist, dass sie auf die Werkstoffeigenschaften reagieren)

als Funktion der Tiefe erfolgen können. Zu den im 3MA-Verfahren erzeugten Frequenzen zählen die Magnetisierungsfrequenz (typisch zwischen 10 Hz und 1 kHz) sowie die Prüffrequenz für die Wirbelstromanalyse und Wirbelstrom-Überlagerungspermeabilitätsanalyse (typisch zwischen 10 kHz und 10 MHz). Im Falle des Barkhausenrauschens sollen die analysierten Frequenzanteile des Barkhausenrauschspektrums variiert werden. Dieses erstreckt sich breitbandig über einen Frequenzbereich bis zu einigen MHz.

3 Experimentalgeräte

Um diese frequenzabhängigen Untersuchungen durchführen zu können, war der Aufbau eines Experimentalgerätes erforderlich. Im Rahmen des Vorhabens wurden unterschiedliche Gradienten durch gezielte Versuchsbedingungen erzeugt und untersucht. So wurden mittels Biegeversuchen tiefreichende Spannungsgradienten (mm-Bereich) eingebracht, wohingegen durch Kugelstrahlen von Proben oberflächennahe Spannungsgradienten (wenige 100 µm tief) eingebracht wurden. Die durch Randschichthärtungen eingebrachten Gefüge- und Spannungsgradienten liegen sowohl oberflächennah als auch bis in größere Tiefen vor. Somit war ein großes Spektrum an Tiefenauflösung und folglich an Frequenzvariation erforderlich. Daher wurden in diesem Vorhaben zwei Gerätevarianten realisiert. Für die Analyse der tiefreichenden Gradienten wurde daher eine 3MA-X8-Variante mit niederfrequenter Signalverarbeitung (NF) aufgebaut. Diese beinhaltet die Prüfmethode Oberwellenanalyse und niederfrequente Wirbelstrom- und Überlagerungspermeabilitätsanalyse. Weiterhin wurde für die Analyse der oberflächennahen Gradienten eine 3MA-Gerätevariante mit hochfrequenter und breitbandiger Signalverarbeitung (HF) aufgebaut. Diese Gerätevariante nutzt die Barkhausenrauschanalyse und die Überlagerungspermeabilitätsanalyse als Prüfmethode. Um die neue Messtechnik nutzen zu können, war eine Anpassung der 3MA-Sensorik erforderlich. Die Grundkomponenten wie der u-förmige Kern mit der Erregerwicklung, der federnd gelagerte Sensorträger mit Hallsonde, Barkhausenrausch- und HF-Wirbelstrommessspule konnten weiterverwendet werden. Für die hochfrequente breitbandige Gerätevariante wurde eine neuartige Sensorelektronik entwickelt, aufgebaut und in den Sensor integriert. Diese bietet Differenzsignale zur Unterdrückung von Störungen, eine breitbandige Signalübertragung zum Gerät sowie temperaturstabilisierte absolute HF-Wirbelstromimpedanzmessung. Dieser neue Sensor ist auch für die Messungen mit der niederfrequenten Gerätevariante geeignet. In diesem Falle wird nur die Erregerwicklung auf dem u-förmigen Kern verwendet. Diese dient sowohl als Magnetisierungsspule als auch als NF-Wirbelstrommessspule. Auch die Software musste für die vorliegende Aufgabenstellung erweitert werden, um die systematische Variation der Anregungs- und Analysierfrequenzen sowie die Erfassung der magnetischen Kenngrößen in Abhängigkeit von der jeweiligen Frequenz zu ermöglichen. Hierzu wurden

sogenannte Sweep-Module erstellt, die die entsprechenden Frequenzen in benutzerdefinierten Schritten variiert.

4 Werkstoffzustände und Charakterisierung

Zur Korrelation der frequenzabhängigen mikromagnetischen Signale zu verschiedenen Werkstoffzuständen wurden Untersuchungen an quaderförmigen Proben aus dem Werkstoff 42CrMo4 durchgeführt. Diese wurden aus unterschiedlichen Werkstoffchargen mit variiertem chemischen Zusammensetzung, Wärmebehandlung und Probendicken hergestellt. Zur Erreichung unterschiedlicher Gefüge- bzw. Spannungsgradienten wurde die Nachbehandlung wie folgt variiert: Induktivhärtungen mit unterschiedlichen Randhärtetiefen, Kugelstrahlen von randschichtgehärteten und nicht randschichtgehärteten Proben sowie Aufbringen von unterschiedlichen Biegelastspannungen. Abb. 1 zeigt eine Übersicht über die unterschiedlichen Kombinationen aus Materialchargen, durch Wärmebehandlung eingestellten Gefügestand, Probengeometrien und Nachbehandlungen.

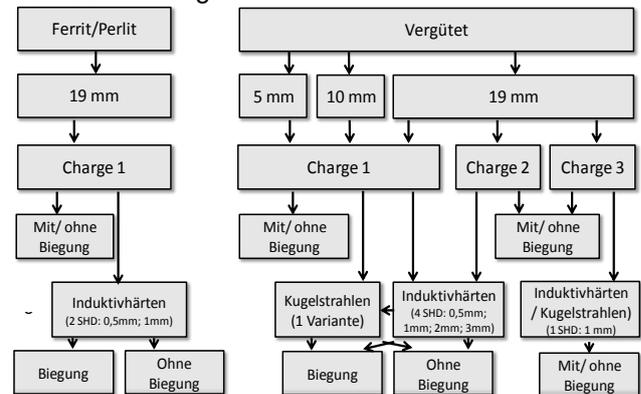


Abb. 1: Versuchsplan für das gesamte Projekt

Alle Probenzustände wurden umfangreich mit Referenzmethoden charakterisiert. So wurden die chemischen Zusammensetzungen mittels Spektroskopieanalyse und die Härtebarkeit mittels Stirnabschreckversuchen ermittelt. Zur Bestimmung der Mikrostruktur wurden lichtmikroskopische metallografische Untersuchungen durchgeführt. Ebenso wurden die Korngröße und der Reinheitsgrad der Eingangszustände bestimmt. Mittels Vickershärteprüfung wurden sowohl die Oberflächenhärten als auch die Kernhärten sowie bei den randschichtgehärteten Zuständen der Härtetiefenverlauf normgerecht ermittelt. Um die Verteilung der Eigenspannungen in der Randzone der behandelten Proben zu erfassen, wurden umfangreiche röntgenografische Tiefenverläufe mit sukzessivem elektrochemischen Abtrag durchgeführt. An Proben aller Parameterkombinationen wurde außerdem die Rauheit mittels Tastschrittverfahren gemessen. Die umfangreichen Charakterisierungen waren notwendig um die aufgenommenen mikromagnetischen Signalen bewerten zu können.

Ergebnisse

5 Mikromagnetische Kenngrößen

An allen Proben wurden die mikromagnetischen Kenngrößen bei Variation der Anregungs- bzw. Analysierfrequenzen aufgenommen. Beispielhaft werden hier die Ergebnisse für drei unterschiedliche Gradientensituationen gezeigt. In Abb. 2 sind die Messergebnisse (Klirrfaktor) an einer Probe, die mit unterschiedlichen Biegelastspannungen belastet wurde, dargestellt. Die im 4-Punkt-Biegeversuch eingebrachten Spannungen weisen einen ausgeprägten Spannungsgradienten auf, der sich von der Probenoberseite zur Unterseite hin von Druck- in Zugspannungen umkehrt. Die magnetischen Messungen wurden bei unterschiedlichen Laststufen jeweils von beiden Probenseiten aus aufgenommen. In Abb. 2 (unten) erkennt man bei hohen Magnetisierungsfrequenzen, also geringen Eindringtiefen, deutliche Unterschiede zwischen den Laststufen. Bei kleineren Magnetisierungsfrequenzen, also größeren Eindringtiefen, werden die Unterschiede erwartungsgemäß geringer, da in zunehmender Tiefe die Spannungsunterschiede kleiner werden.

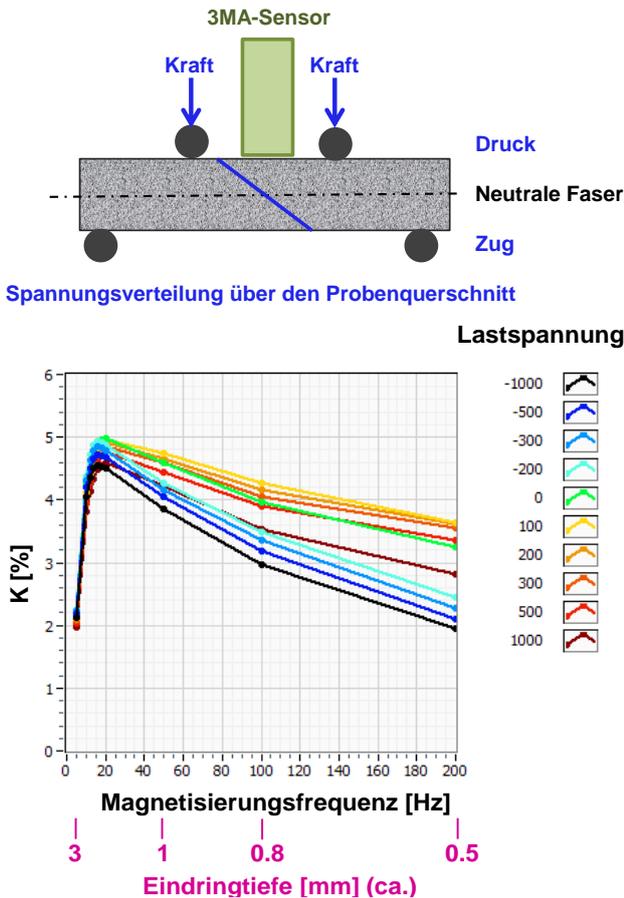


Abb. 2: Frequenzverläufe des Klirrfaktors K bei unterschiedlichen Biegelastspannungen

Die randschichtgehärteten Proben zeigen sowohl Gefüge- als auch Spannungsgradienten, die entsprechend der eingestellten Randhärtetiefe (SHD) unterschiedlich tief ausgeprägt sind. Generell sind die Gefügegradienten sehr steil, während sich die Druckeigenstressungen mit zunehmender Tiefe langsam abbauen. Abbildung 3 zeigt den Klirrfaktor

in Abhängigkeit von der Magnetisierungsfrequenz für eine vergütete Probe und für vergütete Proben mit zusätzlichen Randhärtetiefen von 0,5 mm, 1,0 mm, 2,0 mm und 4,0 mm. Die Klirrfaktorwerte liegen bei den höheren Frequenzen, also im oberflächennaheren Bereich für alle randschichtgehärteten Proben wie erwartet aufgrund der Druckeigenstressungen und aufgrund des martensitischen Gefüges unter dem Wert der vergüteten Probe. Ebenso wie erwartet zeigen alle randschichtgehärteten Proben bei den hohen Frequenzen ähnliche Klirrfaktorwerte, da in diesem Tiefenbereich sowohl der Spannungs- als auch der Gefügestand sehr ähnlich sind. Mit abnehmender Frequenz, also zunehmender Analysiertiefe, verlaufen die Signale der gehärteten Proben aufgrund unterschiedlicher Härtetiefenverläufe auseinander, wobei sich die Probe mit der geringsten SHD der vergüteten Probe am schnellsten nähert, was aufgrund der geringsten Härteschicht über dem vergüteten Gefüge zu erwarten ist.

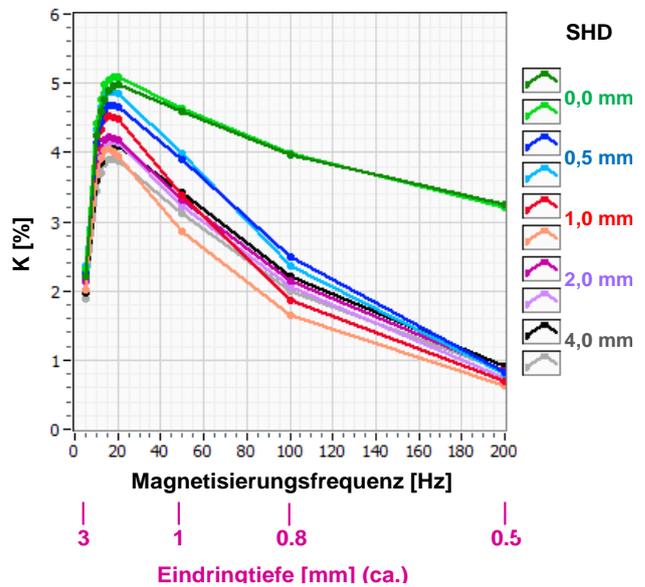


Abb. 3: Klirrfaktor K in Abhängigkeit von der Magnetisierungsfrequenz, für Proben im vergüteten Zustand sowie induktiv gehärtet mit SHD 0,5 mm, 1,0 mm, 2,0 mm und 4,0 mm

Abb. 4 zeigt die Eigenspannungstiefenverläufe einer vergüteten Probe nach der Induktionswärmebehandlung mit SHD = 1 mm und einer ähnlich wärmebehandelten Probe, welche anschließend kugelgestrahlt wurde. Das zusätzliche Kugelstrahlen bewirkt im oberflächennahen Bereich bis ca. 200 µm eine deutliche Erhöhung der durch das Härten eingebrachten Druckeigenstressungen, wie in den röntgenographischen Messungen zu erkennen ist (s. Abb. 4 oben). Unmittelbar an der Oberfläche hat das Kugelstrahlen nur einen geringen Einfluss. Zusätzlich zu den erhöhten Druckeigenstressungen ist die Halbwertsbreite in den ersten 200 µm gesunken, als Folge einer Neuordnung der Versetzungsstruktur. Das untere Bild zeigt den Vergleich der frequenzabhängigen Messungen an Proben vor und nach einer zusätzlichen Kugelstrahlbehandlung.

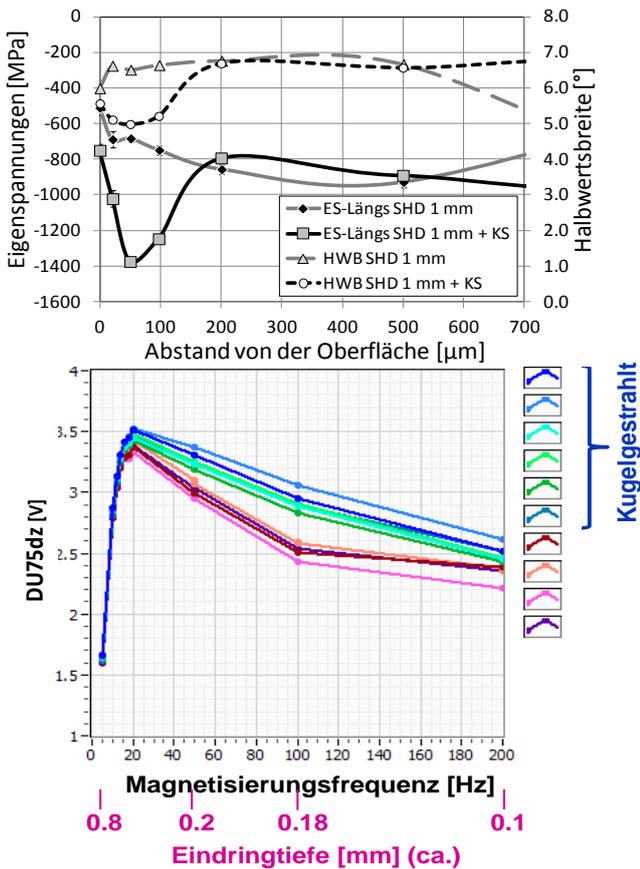


Abb. 4: Tiefenverläufe der Eigenspannungen und der Halbwertsbreite (oben) und Frequenzverläufe der Kenngröße DU75dz (unten) für induktiv gehärtete Proben mit und ohne Kugelstrahlen

Betrachtet man die frequenzabhängigen Messungen in Abb. 4 unten, so erkennt man, dass für beide Probengruppen bei hohen Frequenzen, also oberflächennah, geringe Unterschiede der Kenngröße DU75dz (Aufweitung der Überlagerungspermeabilitätskurve bei 75 % der Amplitude) vorliegen. Erhöht man die Eindringtiefe durch Reduzierung der Magnetisierungsfrequenz, so wachsen die Unterschiede zunächst an und mit weiter steigender Eindringtiefe werden die Unterschiede wieder geringer. Dieser Verlauf spiegelt somit sehr gut die unterschiedlichen Eigenspannungstiefenverläufe wider.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr.18171 N der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Kontakt:

Dr.-Ing. Klaus Zielasko

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Campus E3.1, 66123 Saarbrücken, Deutschland
 Telefon +49 681 9302-3888 | Fax +49 681 9302-113888, klaus.zielasko@izfp.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Jérémy Epp

Stiftung Institut für Werkstofftechnik IWT, Badgasteiner Straße 3, 8359 Bremen, Deutschland
 Telefon +49 421 218-51335 | Fax +49 421 218-51333, epp@iwt-bremen.de

6 Sensorcharakteristik

Die gemessenen Frequenzverläufe stellen die direkt gemessenen Kenngrößen in Abhängigkeit von der Magnetisierungs-, Wirbelstromanregungs- bzw. analysierten Barkhausenrauschfrequenz dar. Diese Frequenzkennlinien zeigen die Frequenzabhängigkeit aufgrund des Werkstoffgradienten, überlagert mit der frequenzabhängigen Empfindlichkeit der jeweiligen Messspule. Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurde ein Ansatz entwickelt und angewendet um beide Effekte weitgehend voneinander zu trennen.

7 Fazit

Im Projekt wurde aufgezeigt, dass sich Materialgradienten signifikant auf das Frequenzverhalten magnetischer Kenngrößen auswirken und auf diesem Wege abgefragt werden können. Im Laufe des Forschungsvorhabens wurde beobachtet, dass einige frequenzabhängige Signale für die verschiedenen Probenzustände Verläufe zeigten, die mit (Eigen-) Spannungsgradienten erklärbar sind. Allerdings wurden bei einigen Proben auch magnetische Kennwerte gemessen, deren Verlauf nicht direkt zu den Werkstoffgradienten korreliert werden konnte. Dieser Zusammenhang zwischen magnetischen Messungen und Werkstoffzuständen soll in einem Folgevorhaben vertieft und grundlegender untersucht werden, um die physikalischen Ursachen der Beobachtungen zu identifizieren und somit eine Basis für die messtechnische Nutzung zu schaffen. Die durchgeführten Arbeiten bieten ein hervorragendes Anknüpfungspotential für ein Fortsetzungsvorhaben, da sie zur Messtechnik, zu definierten Probensätzen und umfangreichen Messdatenbanken geführt haben.

Literatur:

- [1] Küpfmüller, K.; Mathis, W.; Reibiger, A.: Grundlagen der theoretischen Elektrotechnik. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1978
- [2] Theiner, W.A.: Micromagnetic Techniques. In: Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods, V. Hauk (Hrsg.), Elsevier, Amsterdam, NL, 1997, S. 564-589

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages