Erzeugung und Charakterisierung von Ersatzfehlern zur zerstörungsfreien Schleifbrandprüfung

Martin SEIDEL^{*}, Antje ZÖSCH^{*}, Christopher SEIDEL^{*}, Wolfgang KORPUS^{**}, Heinz PÖHLMANN^{**}, Bernd EIGENMANN^{***} ^{*} imq Ingenieurbetrieb GmbH, Gewerbering 30, 08451Crimmitschau ^{**} ibg Prüfcomputer GmbH, Pretzfelder Straße 27, 91320 Ebermannstadt Röntgenlabor Eigenmann, Felsenweg 6, 91220 Schnaittach - Hormersdorf

Kurzfassung. Schleifbrand stellt in der Fertigung ein Risiko für die Bauteilsicherheit dar. Für die Bewertung, Einstellung und Überprüfung geeigneter Prüfverfahren zur Schleifbrandprüfung werden Prüfnormale benötigt. Diese können mittels Laserbehandlung hergestellt werden. Die so entstandenen Ersatzfehler zeigen analoge Eigenschaftsverläufe wie reale Schadensbilder. Sie können weitgehend reproduzierbar an definierten Stellen entsprechend den Anforderungen (Art und Tiefe der Gefügeveränderung, räumliche Ausdehnung) erzeugt werden.

1. Einleitung

Zum Thema Schleifbrand, seiner Entstehung im Schleifprozess, seinen Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften und den Möglichkeiten des Nachweises mittels möglichst zerstörungsfreier Prüfverfahren, wurden und werden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, ohne dass dieses Phänomen abschließend und umfassend gedeutet werden kann. Dies ist auch nicht zu erwarten, sind doch die Einflussfaktoren während des Schleifprozesses, die verarbeiteten Werkstoffe, die vielfältigen Werkstückformen so mannigfaltig, dass sich der Schleifbrand in sehr unterschiedlichen Erscheinungsbildern zeigen kann. So haben wir zum Beispiel bei den in unseren metallografischen Laboratorien durchgeführten Untersuchungen von Rillenkugellagerringen festgestellt, dass dieser auf den Laufbahnen häufig die Form von quer zur Laufrichtung angeordneten Strichmarken hat. An Borden von Wälzlagerringen wiederum tritt hin und wieder Schleifbrand in Umlaufrichtung auf und erfasst dort größere Bereiche. Allerdings ist auch nicht auszuschließen, dass solcher Schleifbrand auch auf der Laufbahn auftritt.

Nach ISO 14104 handelt es sich beim Schleifbrand um lokal überhitzte oberflächennahe Bereiche Selbstverständlich bewirkt jede mechanische Bearbeitung eine Veränderung der oberflächennahen Bereiche. Von Schleifbrand spricht man dann, wenn die Wärmeeinwirkung groß genug war, um lokale Anlassvorgänge oder bei noch größerem Wärmeeintrag örtlich sogenannte Neuhärtezonen hervorzurufen.

Zum Nachweis von Schleifbrand werden verschiedene Prüfverfahren eingesetzt: Als quasi-zerstörungsfreies Verfahren wird die Nital- Ätzung nach ISO 14104 [1] angewendet. Allerdings ist dieses Verfahren nur bedingt automatisierbar und die Auswertung der geätzten Teile erfolgt visuell durch Prüfer. Aus diesem Grund besteht großes Interesse an einem zerstörungsfreien Verfahren, das es erlaubt, ohne subjektive Prüfereinflüsse reproduzierbar und automatisierbar Schleifbrand zu detektieren. Angewandt werden derzeit



besonders das sogenannte 3MA-Verfahren und das Barkhausen-Rausch-Verfahren [2] und in jüngster Zeit auch wieder die Wirbelstromprüfung [3,6].

Um die Eignung von zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Detektierung von Fehlern in Bauteilen beurteilen zu können, benötigt man Teile mit definiert eingebrachten Fehlstellen unterschiedlicher Ausprägung. Gerade bei Schleifbrand steht man hier vor großen Problemen, denn es ist praktisch unmöglich, gezielt und reproduzierbar Schleifbrand dazu noch definiert zum Beispiel hinsichtlich Größe und Tiefe des beeinflussten Bereiches zu erzeugen. Eine Alternative stellen sogenannte Ersatzfehler dar. So werden beispielsweise zur Einstellung der Empfindlichkeit der Wirbelstromprüfung nach DIN EN 10246-3 mittels Erodierens Kerben oder Vertiefungen definierter Tiefe in Teile eingebracht.

In diesem Beitrag werden Erfahrungen und Erkenntnisse bei der Herstellung und Bewertung von Ersatzfehlern für die Schleifbrandprüfung vorgestellt, die bei Untersuchungen in den Laboratorien der an den Untersuchungen beteiligten Partner gewonnen wurden.

2. Ersatzfehler

Ersatzfehler müssen sich definiert nach Größe, Lage und Art reproduzierbar erzeugen lassen. Außerdem sollen sie möglichst ähnliche physikalische Prüfeffekte wie reale Fehler hervorrufen. Es ist aber nicht erforderlich und es wäre sicher auch vergeblich, wenn man versuchte, Ersatzfehler zu erzeugen, die reale Fehler in allen ihren Erscheinungsformen nachbilden. Die Schwellen zum Sortieren der Gut – und Schlecht – Teile kann man erst an Hand der Prüfung realer Teile festlegen (Validierung des Verfahrens). Dazu müssen Teile mit abweichenden Anzeigen entnommen und mit Referenzverfahren untersucht werden. Entsprechend den Anforderungen an die Bauteileigenschaften können dann nicht zulässige Zustände definiert und Sortiergrenzen festgelegt werden.

Ersatzfehler dienen vor einer Prüfung von realen Teilen zur Einstellung der verwendeten Prüfeinrichtung, insbesondere der erforderlichen Prüfempfindlichkeit. Weiterhin sollen Prüfnormale in bestimmten Abständen in den Prüfprozess eingeschleust werden, um sicher zu stellen, dass die Prüfung unter konstanten, reproduzierbaren Bedingungen erfolgt. Letzteres setzt voraus, dass keine zeitabhängigen Veränderungen im Normal ablaufen, die den eingebrachten Ersatzfehler verändern können.

Eine Möglichkeit für die Herstellung von Referenzproben für die Schleifbrandprüfung besteht darin, Wärme definiert und lokal sehr begrenzt in die Oberflächen mittels eines Lasers einzubringen. In [4] werden Ergebnisse eines Ringversuches an lasergeschädigten einsatzgehärteten Teilen, in [5] Ergebnisse vergleichender Untersuchungen zu den beim Schleifen, beim Hartdrehen und beim Lasern entstehenden "weißen Schichten" (Neuhärtezonen) in einsatzgehärtetem 16 MnCr6 vorgestellt. Die weißen Schichten, die bei den drei betrachteten Verfahren erzeugt wurden, zeigen sowohl übereinstimmende als auch unterschiedliche Merkmale. Zu beachten ist, dass die Eigenspannungen, die bei einer durch Schleifen oder Hartdrehen hervorgerufenen lokalen Erwärmung entstehen, das Resultat einer Überlagerung von thermischen Wechselwirkungen und mechanischer Belastung sind. Beim Laserprozess fehlt die mechanische Komponente. Welche Auswirkungen dies auf die Eigenspannungsverläufe hat, wird in [5] nicht näher erläutert. Jedoch werden die Risse, die durch Zugeigenspannungen unterhalb einer Neuhärtezone entstehen, vornehmlich durch die konzentrierte Wärmeeinbringung und nicht durch die mechanische Bearbeitung erzeugt [4]. Die Laserbehandlung kommt somit der tatsächlichen Schadensentstehung zumindest sehr nahe.

Unter Verwendung eines diodengepumpten Scheibenlasers wurden sowohl in Wälzlagerringe und in zylindrische Wälzkörper verschiedener Abmessungen Ersatzfehler eingebracht. Verwendet wurde dabei eine Laseroptik mit einem Faserdurchmesser von 0,3 mm. Der Vorteil bei Verwendung eines derartigen Scheibenlasers bestand insbesondere darin, dass lokal eng begrenzte Bereiche mit definierter Streckenenergie behandelt werden konnten.

Im weiterem soll die Herstellung derartiger Lasermarken, deren Eigenschaften und ihre Anwendung bei der Wirbelstromprüfung an Hand von Zylinderrollen, auf deren Mantelflächen lokal wärmebeeinflusste Bereiche erzeugt wurden, erläutert werden. Die Abbildung 1 zeigt die mit unterschiedlichen Laserleistungen auf den Rollen erzeugten Lasermarken und deren Anordnung auf der Rolle.



Abb. 1 a) Lasermarken, erzeugt mit steigender Laserleistung auf Wälzlagerrollen aus 100Cr6 und b) Anordnung der Marken auf der Rolle

Bei der Laserbehandlung wurden jeweils zwei Teile mit gleichen Laserparametern hergestellt. Damit standen je zwei Teile mit (nahezu) identischen Ersatzfehlern zur Verfügung. Ein Teil wurde für zerstörende Untersuchungen verwendet und das zweites als Prüfnormal für zerstörungsfreie Prüfungen. Die Übersichtsaufnahmen (Abbildung 1.a) zeigen die in Achsrichtung orientierten, strichförmigen laserbehandelten Bereiche bei unterschiedlichen Laserleistungen. Sie haben eine Breite von ca. 2 mm und eine Länge von ungefähr 12 mm.

An den gelaserten Stellen der Rollen wurden im homogenen Bereich der Laserspur Querschliffe entnommen. Die Abbildung 2 zeigt Mikroaufnahmen von Bereichen, die mit unterschiedlichen Laserleistungen behandelt wurden. Bei der niedrigsten Laserleistung L1 sind keine optisch sichtbaren Veränderungen feststellbar. Bei höheren eingebrachten Energien (L2) werden Anlasseffekte hervorgerufen. Bei noch höheren Leistungen ab L3 entstehen dann Neuhärtezonen.



c) L 3: Anlasszone Tiefe (230 µm) und Neuhärtezone (Tiefe 620 µm)

l) L 4: Anlasszone Tiefe (540 μm) und Neuhärtezone (Tiefe 900 μm)

Abb. 2: Metallografische Schliffe durch die Lasermarken zeigen die erzielten Gefügeänderungen bei steigender Laserleistung von L 1 nach L 4



Abb. 3: Mikrohärtemessungen vom Rand zum Kern (Härteverläufe für unterschiedliche Laserleistungen)

Die Ergebnisse der Mikrohärtemessungen an den vier Lasermarken sind in Abbildung 3 dargestellt. Man findet die erwarteten Härteverläufe, wie sie auch bei Anlasszonen und Neuhärtezonen in realen Bauteilen registriert werden. Zum Vergleich zeigt Abbildung 4 exemplarisch die Ergebnisse der Schleifbrandmarke an einer Wälzlagerrolle: charakteristische Verfärbung der Oberfläche nach Nitalätzung; Anlasszone im metallografischen Schliff und Verringerung der Härtewerte im oberflächennahen Bereich, der der Anlasszone entspricht.







a) Übersichtsaufnahme nach Nitalätzung

b) metallografischer Schliff: Anlasszone (Tiefe $16 \,\mu m$)

c) Härteverlauf am Schliff (Kleinlasthärte nach Vickers HV 0,01)

Auf der Oberfläche der Rollen wurden quer zu den Lasermarken röntgenografisch die Eigenspannungen und die Halbwertsbreiten der Interferenzprofile ermittelt (Abbildung 5). Auch die ermittelten Eigenspannungen und Halbwertsbreiten entsprechen denen, wie sie bei Anlasszonen und Neuhärtezonen in realen Bauteilen mit Schleifbrand registriert wurden.





Abb. 5: a) Röntgenografisch ermittelte Eigenspannungen und b) Halbwertsbreite der Interferenzprofile quer zu den Lasermarken

3. Wirbelstromprüfung

Zur Detektion der Lasermarken wurde das präventive Mehrfrequenzverfahren unter Verwendung einer Differenzsonde eingesetzt. Das Prüfgerät ibg eddyvisor wurde dabei in den eigens entwickelten Prüfautomaten QuaSor E integriert. Dieser besteht aus einem CNC – gesteuerten Prüfautomaten, mit dem ein automatischer Ablauf des Prüfvorgangs realisiert wird.

Je nach zu prüfender Teileart (Innenring, Außenring, Rolle) wählt der Bediener das entsprechende Prüfprogramm aus. Das zu prüfende Teil wird manuell eingelegt. Auf eine Automatisierung der Teilezuführung wurde auf Grund der sehr unterschiedlichen Teilearten und Teileabmessungen sowie der teilweise nur kleinen Losgrößen bewusst verzichtet. Nach dem Einlegen des Teiles läuft der Vorgang automatisch ab. Dabei werden die teilespezifischen Prüfparameter abgerufen und eingestellt. Danach fährt die Prüfsonde die zu prüfenden Bereiche ab. Geprüft werden können die Laufbahnen, Borde, Stirnseiten von Innen – und Außenringen sowie von Rollen. Die Prüfsignale werden automatisch erfasst und auf Basis der ebenfalls hinterlegten Bewertungskriterien bewertet. Der Prüfer erhält sofort die Bewertung des Teiles als "Gut" oder "Schlecht".

Abbildung 6.a zeigt die Anordnung der Wirbelstromsonden bei der Prüfung eines Wälzlager- Innenringes. Durch die abgewinkelte Sondenform und die Kombination von drei Sonden können alle relevanten Flächen erreicht werden. Abbildung 6.b zeigt die Einspannung einer Rolle. Hier werden in einem Zuge Laufbahn und Stirnflächen geprüft.





a) Sondenanordnung b) Prüfen einer Wälzlagerrolle Abb. 6. Schleifbrandprüfung mittels QuaSor E



Abb. 7: Prüfautomat QuaSor E in der Fertigung der Spindel- und Lagerungstechnik Fraureuth GmbH

Der Prüfautomat QuaSor E wird in der Fertigung zur Schleifbrandprüfung und zum Detektieren von oberflächennahen Materialfehlern eingesetzt (Abbildung 7).

Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der Wirbelstromprüfung der an der Wälzlagerrolle mit den vier Lasermarken. Als Bewertungsgrundlage wird zunächst eine Referenzmenge aus den Wirbelstromsignalen von fehlerfreien Teilen erstellt. Die Signale der Prüfteile werden dann relativ zu dieser Referenzmenge beurteilt. Als Maß für die Abweichung der Wirbelstromsignale des Prüfteils von der Referenzmenge wird eine Trennzahl bestimmt. Dabei wird die Ausdehnung der Referenzmenge um einen Toleranzbereich erweitert, so dass fehlerfreie Prüfteile eine Trennzahl um 0,5 besitzen. Die Empfindlichkeit des Prüfverfahrens richtet sich nach der Festlegung der Bewertungsschwelle für die Trennzahl, bei der das Teil aussortiert werden soll.

Die Trennzahlen für die Ersatzfehler nehmen mit steigender Laserleistung deutlich zu. Die Lasermarken L2 bis L4, die sowohl deutlich optisch sichtbare Gefügeveränderungen als auch signifikante Härte- und Eigenspannungsunterschiede aufweisen und somit einer Schleifbrandschädigung entsprechen, ergeben sehr hohe Trennzahlen und können sicher detektiert werden.

Die Prüfsignale der Lasermarke L1, die keine lichtmikroskopisch feststellbare Gefügeänderungen und nur einen geringen Unterschied der Eigenspannungen bzw. der Halbwertsbreiten der Röntgenprofile im Vergleich zum Grundmaterial zeigen, ergeben eine Trennzahl von 2,23 und heben sich damit ebenfalls deutlich von der Referenzmenge ab.



Abb. 8: Ergebnisse der Wirbelstromprüfung mit dem QuaSor E/ ibg eddyvisor an der Wälzlagerrolle mit eingebrachten Lasermarken L1 bis L4

4. Zusammenfassung

Mittels Laserbehandlung mit einem Scheibenlaser ist es möglich, definierte Ersatzfehler in Wälzlagerteilen zu erzeugen. Die erzeugten Ersatzfehler zeigen analoge Eigenschaftsverläufe wie reale Schadensbilder. Sie können weitgehend reproduzierbar an definierten Stellen entsprechend den Anforderungen (Art und Tiefe der Gefügeveränderung, räumliche Ausdehnung) erzeugt werden.

Die mit Ersatzfehlern versehenen Teile können als Prüfnormale für zerstörungsfreie Schleifbrandprüfungen und auch die Nital-Ätzung Anwendung finden. Weiter ist möglich, sie zum Beispiel bei Ringversuchen einzusetzen bzw. sie als Referenzproben für Untersuchungen zum Vergleich der Eignung verschiedener Verfahren zur Schleifbrandprüfung zu verwenden.

Es wird empfohlen, für die Erzeugung von Ersatzfehlern für die Schleifbrandprüfung mittels Laserverfahren einheitliche Kriterien zu formulieren.

Mittels der präventiven Mehr-Frequenz-Prüfung mit einer Differenzsonde können berührungsfrei sowohl Ersatzfehler als auch realer Schleifbrand sicher detektiert werden, unabhängig ob es sich um Anlass- oder Neuhärtezonen handelt.

Referenzen

- [1] ISO 14104 : 1995 (E) Gears –Surface temper etch inspection after grinding
- [2] S. Schwienbacher: Einfluss von Schleifbrand auf die Flankentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder; Dissertation TU München 2008
- [3] P. Kreier, Innotest AG; R. Becker IzfP; Ch. Rodner IzfP; H. Flückiger, Sulzer Textil AG: WS Prüfsystem zum Nachweis von Schleiffehlern an Nockenscheiben; Vortrag DACH Jahrestagung, Innsbruck 2000
- [4] Ch. Goergels Entstehung und Vermeidung von Schleifbrand beim diskontinuierlichen Zahnflankenprofilschleifen Dissertation RWTH Aachen 2011
- [5] B. Denkena, M. Jung, C. Müller, L. Walden Charakterisierung weißer Schichten nach mechanischer und thermischer Einwirkung durch Fertigungsverfahren HTM 58(2003) 4 S.211ff
- [6] H. Pöhlmann: Schleifbrandprüfung; ibg Prüfcomputer GmbH, Workshop März 2011