



Arbeitsblatt

HiPerComp Projekt 5: Erprobung der neu entwickelten Werkstoffzustände an Wälzlagern und Überführung in Lebensdauerberechnung

AiF-Nr.:
16686

Obmann:

Dr.-Ing. D. Amos

beteiligte Unternehmen
Es haben über 40 Unternehmen das Gemeinschaftsvorhaben "HiPerComp" begleitet.

Laufzeit:
01.06.2012 – 31.05.2015

Erstelldatum:
05.10.2015

Forschungsstelle:
Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen

Projektleiter:
PD Dr.-Ing. B. Clausen

Sachbearbeiter:
Torben Karsch

Forschungsvereinigung:
AWT

Projektbegleitender Fachausschuss
FA 21 (Gefüge und mechanische Eigenschaften)

Zielsetzung und Lösungsweg

Ständige vom Leichtbau und der Ressourcenschonung getriebene Steigerungen der Werkstoffbeanspruchung durch eine Optimierung der Bauteilkonstruktion stoßen immer häufiger an Grenzen. Der Einsatz von höchstfesten Werkstoffzuständen führt zu einem immer empfindlicheren Werkstoffverhalten gegenüber Werkstoffungängen und Bauteilfehlern. Letztere führen gerade bei Stählen zu einer Verteilungsfunktion bezüglich der Bauteilausfälle, die neben einem hohen mittleren Festigkeitsniveau oft wenige Bauteile mit einer deutlich niedrigeren Beanspruchbarkeit und damit Lebensdauer zeigt.

Neben dem bisherigen Ziel der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, eine Steigerung der spezifischen Festigkeit durch ein angepasstes Legierungs- und Wärmebehandlungsverfahren zu erreichen, verfolgte das DFG-AiF-Gemeinschaftsvorhaben „HiPerComp – High Performance Components“ den neuen Ansatz, Werkstoffkonzepte zu entwickeln, die eine größere Schadenstoleranz gegenüber Werkstoffungängen aufzeigen. Dabei wird auch eine leichte Absenkung des mittleren Festigkeitsniveaus toleriert, solange dadurch die Streuung der Lebensdauer reduziert wird.

In dem Gemeinschaftsvorhaben „HiPerComp - Innovative Konzepte zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit hochbeanspruchter Bauteile“ (www.hipercomp.de) wurde das übergeordnete Ziel verfolgt, die

Schadenstoleranz des Werkstoffes gegenüber einem Versagen, ausgehend von Einschlüssen oder Gefügefehlstellen, zu erhöhen. Die notwendigen Lösungsansätze und deren Tauglichkeit wurden durch die interdisziplinäre Kooperation von Metallurgen (Stahlentwicklung, -herstellung, Halbzeugherstellung), Werkstofftechnik / Wärmebehandlung, Konstruktion und Werkstoff- bzw. Bauteilerprobung in insgesamt sechs Projekten erarbeitet.

Das Hauptziel des Projektes „Erprobung der neu entwickelten Werkstoffzustände an Wälzlagern und Überführung in Lebensdauerberechnung“ lag im Nachweis der erhöhten Schadenstoleranz von Bauteilen aus den neu entwickelten Werkstoffen, um die vielversprechenden Ergebnisse aus den vorangegangenen Projekten zu bestätigen und den Weg in die industrielle Anwendung zu unterstützen.

Folgende Maßnahmen wurden im Projekt im Detail untersucht:

1. Gefügestandards von Lagerinnenringen vor und nach der Wälzlagerprüfung
2. Änderungen im Eigenspannungstiefenverlauf infolge der Beanspruchung
3. Lebensdaueruntersuchung an intakten und vorgeschädigten Lagerinnenringen
4. Ermittlung der Schadensursache
5. Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit

Ergebnisse

Mithilfe der Ergebnisse aus den Projekten „Entwicklung von Wärmebehandlungskonzepten zur Einstellung beanspruchungsgerechter Gefüge“ und „Kurzzeit-Verfahren zur Ermittlung der Dauerfestigkeit an neuen Werkstoffzuständen“ wurden drei Werkstoffvarianten ausgewählt, die das Potential aufweisen, die Schadenstoleranz von Wälzlagern zu erhöhen. Als Basiswerkstoff dient zum einen der Wälzlagerwerkstoff 100Cr6 (Industriereferenz), zum anderen wurden Untersuchungen mit dem Vergütungsstahl C56E2 (DF0, Industriereferenz) durchgeführt. Zur Einstellung der gewünschten Eigenschaften wurde dem Wälzlagerstahl entweder 1,9 % Aluminium (D6) oder 1 % Silizium (D10) zulegiert, während beim Vergütungsstahl der Siliziumgehalt auf 0,8 % (DF6) erhöht wurde. Die auf die Legierungszusammensetzung angepasste Wärmebehandlung kann der Tabelle 1 entnommen werden.

Werkstoff	Wärmebehandlung
Industriereferenz	Martensitisch gehärtet
D6 (+1,9 % Al)	Bainitisieren
D6QPT (+ 1,9 % Al)	Quenching-Partitioning-Tempering (QPT)
D10 (+ 1 % Si)	Bainitisieren
C56E2	Induktiv gehärtet
DF6 (+ 0,8 % Si)	Induktiv gehärtet

Tabelle 1: Wärmbehandlungsverfahren

Aus den Ergebnissen der Wälzlageruntersuchungen wird ersichtlich, dass die Lagerinnenringe aus dem Werkstoff DF6 (+0,8 % Si) eine deutlich höhere Lebensdauer erreichen als Lagerinnenringe aus dem Werkstoff DF0, bezogen auf die 50 %ige Ausfallwahrscheinlichkeit. Die Streuung der Lebensdauer ist jedoch wesentlich größer, weshalb eine Reduktion der ppm-Ausfälle durch dieses Konzept nicht möglich ist. Die Analyse der Schadensursache ergab in beiden Fällen, dass im Bereich der Rissinitiierung häufig Aluminiumoxide vorhanden waren.

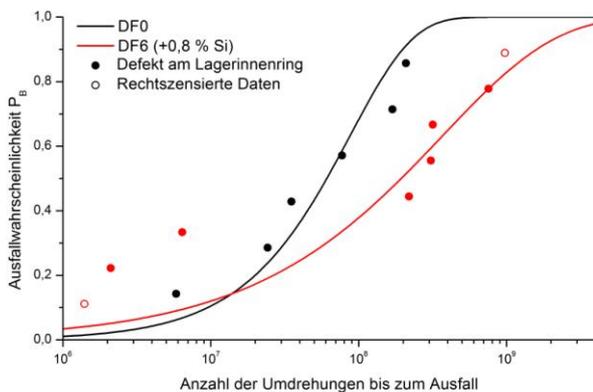


Bild 1: Ausfallwahrscheinlichkeit der Lagerinnenringe aus den Werkstoffen DF0 und DF6 bei einer Beanspruchung von $p_0 = 2800$ MPa

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der neuen Werkstoffkonzepte auf Basis des Wälzlagerstahles 100Cr6 wurde die Lebensdauer berechnet, bei der eine 50 %ige Ausfallwahrscheinlichkeit erwartet wird. In diese Berechnung sind die Lagerausfälle, die nicht von einem Lagerinnenring ausgehen, als rechtszensierte Daten eingeflossen. Die neuen Werkstoffkonzepte versagen bei einer Belastung mit 3400 MPa zum Teil erheblich früher als die Industriereferenz. Allerdings zeigt sich auf dem Lashorizont von 3200 MPa bereits ein anderes Bild. Verdeutlicht wird dieser Umstand bei der Betrachtung der berechneten Weibull-Verteilungen für den Lashorizont 3400 MPa, Bild 2 oben, und 3200 MPa, Bild 2 unten.

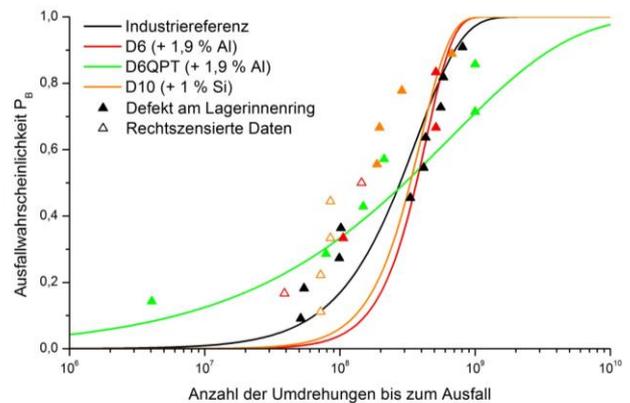
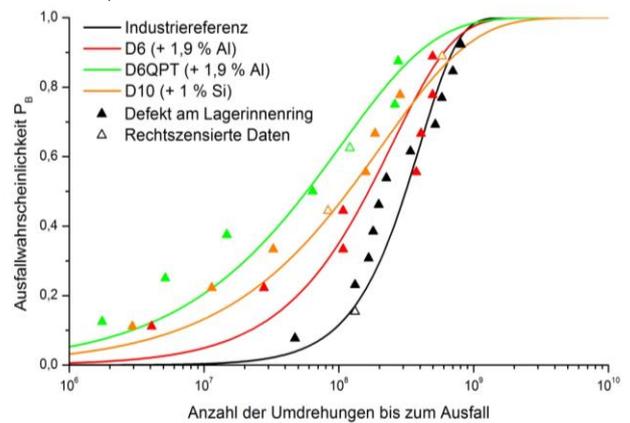


Bild 2: Berechnete und ermittelte Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Lebensdauer. Oben: $p_0 = 3400$ MPa, unten: $p_0 = 3200$ MPa

Vor allem die größere Streuung in der Lebensdauer von Lagerinnenringen aus den neuen Werkstoffkonzepten, bei einer Belastung von 3400 MPa, widerspricht der Zielsetzung, die ppm-Ausfälle zu reduzieren. Wird dagegen die Belastung um 200 MPa auf 3200 MPa gesenkt, ist die Streuung der Lebensdauer für Lagerinnenringe aus den Werkstoffen D6 bainitisiert und D10 geringer als die der Industriereferenz. Gleichzeitig erreichen die Lager auch eine höhere Lebensdauer. Lediglich bei den Lagerinnenringen aus dem Werkstoff D6QPT ist auf dem Lashorizont von 3200 MPa keine Reduktion der Streuung erkennbar.

Die Gefügereaktion der neuen Werkstoffkonzepte auf die Beanspruchung bei der Überrollung ist exemplarisch in Bild 3 gezeigt. Es bildet sich ein dunkler Saum unterhalb der Laufbahn aus, der bis in eine Tiefe von 400 µm reicht. Bei höherer Vergrößerung wird die Ausbildung von Weißen Bändern in einer Tiefe von 100-300 µm ersichtlich. Die Neigung der Weißen Bänder zur Laufbahn beträgt 26°.

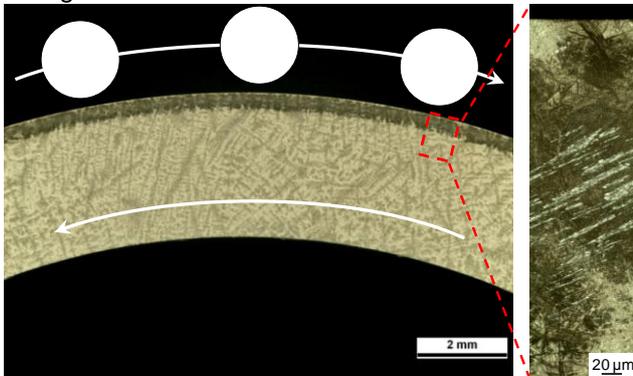


Bild 3: Querschliff mittig durch die Laufbahn eines Lagerinnenringes aus dem Werkstoff D6 (+ 1,9 % Al), Ätzung: 50 s in 3% alk. HNO₃, p₀ = 3400 MPa, N = 5 x 10⁸

Die Elementverteilung im Bereich der Weißen Bänder wurde mithilfe der Mikrosonde analysiert und ist im Bild 4 dargestellt. In den Weißen Bändern existieren Bereiche, die stark an Kohlenstoff verarmt sind, während an anderer Stelle dieser in schmalen Zeilen hoch konzentriert vorliegt. Gleichzeitig konnte in diesen Zeilen die höchste Konzentration an Chrom gemessen werden. Bei der Überlagerung der Chrom- und Kohlenstoffverteilungen wird ersichtlich, dass die Struktur innerhalb der Weißen Bänder aus dem Chromcarbid-Netzwerk hervorgeht. Während das an Kohlenstoff verarmte und aluminiumreiche Gefüge in den Weißen Bändern eine homogene Struktur aufweist und beim Korrosionsangriff gleichmäßig abgetragen wird, kommt es in den hoch chrom- und kohlenstoffhaltigen Bereichen zu einem diffusen Abtrag. Dadurch erscheinen diese Bereiche im geätzten Schlibbild dunkler.

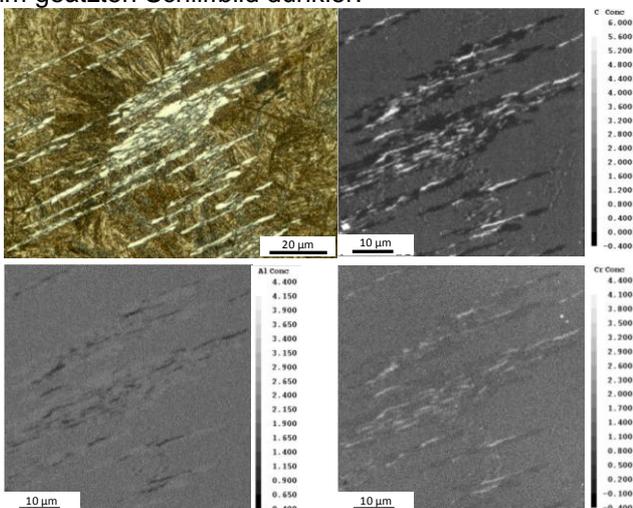


Bild 4: Microsondenmapping von Weißen Bändern im Werkstoff D6, N = 5 x 10⁸

Zur Beurteilung der Schadenstoleranz wurden acht Härteeindrücke (HRB 160 µm) symmetrisch über den Umfang der Laufbahn des Lagerinnenringes eingebracht und im Wälzlagerversuch bei einer Beanspruchung von p₀ = 2800 MPa geprüft. Die aus den ermittelten Lebensdauern resultierenden Weibull-Verteilungen der Ausfallwahrscheinlichkeiten für die einzelnen Werkstoffkonzepte sind in Bild 5 zusammengefasst.

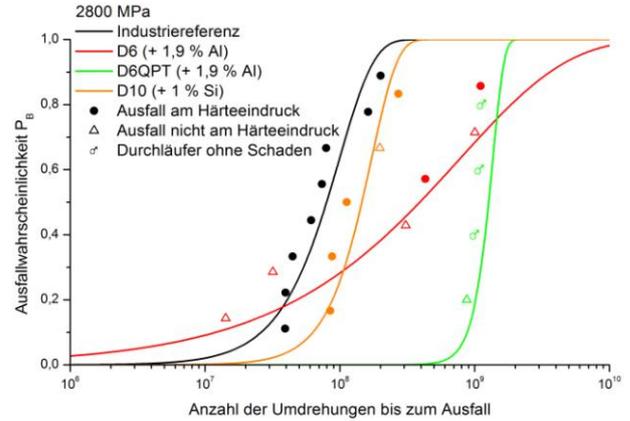


Bild 5: Weibull-Verteilung für die Ausfallwahrscheinlichkeit von vorgeschädigten Lagerinnenringen bei einer Belastung von 2800 MPa

Hierbei muss erwähnt werden, dass auch die Ausfälle bei der Berechnung berücksichtigt wurden, wo der Schaden nicht von einem Härteeindruck ausging. Gerade die Werkstoffvariante D6 im bainitisierten Zustand macht deutlich, dass es nicht ausreicht, dass der Werkstoff gegenüber einer von außen eingebrachten Schädigung tolerant reagiert, wenn gleichzeitig das Gefüge an anderer Stelle aufgrund von internen Fehlstellen versagt. Im Gegensatz dazu versagen die Lagerinnenringe aus der Industriereferenz immer an Pittingschäden, ausgehend von dem eingebrachten Härteeindruck. Das Gefüge reagiert also sehr sensibel auf Schäden in der Laufbahn, während der restliche Bereich der Beanspruchung widersteht. Ähnlich verhalten sich die Lagerinnenringe aus dem Werkstoff D10. Die Härte der Lagerinnenringe überschreitet jedoch deutlich die geforderte Mindesthärte von 700 HV. Es ist daher davon auszugehen, dass eine Reduktion der Härte und eine damit einhergehende Zähigkeitssteigerung der Matrix die Schadenstoleranz weiter erhöhen kann. Das Werkstoffkonzept D6 mit der angepassten Wärmebehandlung QPT zeigt dagegen keinen Ausfall der Lagerinnenringe durch einen vom Härteeindruck ausgelösten Schaden. Vielmehr überleben drei der vier Lagerinnenringe die Belastung bis zur Abbruchgrenze von 10⁹ Umdrehungen. Aufgrund der sehr guten Eigenschaften wurde die zweite Hälfte der vorgeschädigten Lagerinnenringe auf dem höchsten Lasthorizont (3400 MPa) geprüft. Erstaunlicherweise erreichten die Lagerinnenringe mit Lebensdauern von 3,4 x 10⁶–2,3 x 10⁸ Umdrehungen vergleichbare Werte wie die Lagerinnenringe ohne Vorschädigung.

Die deutlich höhere Schadenstoleranz der neuen Werkstoffkonzepte gegenüber Härteeindrücken im Vergleich zur Industriereferenz zeigt sich auch bei der Betrachtung der erwarteten Lebensdauer bei der Annahme einer 50 %igen Ausfallwahrscheinlichkeit, die zusammen mit der Steigung m als Maß für die Streuung und die Ausfallursache in Tabelle 2 für jedes Konzept angegeben ist.

Material	Ausfallursache	N50	m
Industriereferenz	8 x Härteeindruck 0 x Pitting	$8,0 \times 10^7$	1,7
D6 (+ 1,9 % Al)	2 x Härteeindruck 4 x Pitting	$3,9 \times 10^8$	0,5
D6QPT (+ 1,9 % Al)	0 x Härteeindruck 1 x Pitting	$1,3 \times 10^9$	5,1
D10 (+ 10 % Si)	4 x Härteeindruck 1 x Pitting	$1,5 \times 10^8$	2,3

Tabelle 2: Berechnete Lebensdauer von vorgeschädigten Lagerinnenringen bei einer 50 %igen Ausfallwahrscheinlichkeit

Demnach erreichen Lagerinnenringe aus dem Werkstoff D10 (+1 % Si) bezogen auf die Industriereferenz die doppelte Lebensdauer, aus dem Werkstoff D6 (+ 1,9 % Al) im bainitisierten Zustand die fünffache und nach der optimierten Wärmebehandlung QPT sogar die sechzehnfache Lebensdauer.

Zusammenfassung

Die Wälzlagerversuche zeigten eine signifikante Verbesserung der Lebensdauer von Lagerinnenringen aus dem Werkstoff DF6 im Vergleich zu Lagerinnenringen aus dem konventionellen Vergütungsstahl C56E2. Jedoch stehen die Frühausfälle und die daraus resultierende große Streuung dem Ziel der Verringerung von ppm-Ausfällen entgegen. Bei der Analyse der Schadenstoleranz konnte ebenfalls kein Vorteil durch das eingebrachte Silizium festgestellt werden. Die Lagerinnenringe aus dem neuen Werkstoff versagen, ebenso wie die aus der Industriereferenz,

an der eingebrachten Vorschädigung. Wobei die Lebensdauer bei einer 50 %igen Ausfallwahrscheinlichkeit geringfügig unter der der Industriereferenz liegt.

Wie aus den Gefügeuntersuchungen ersichtlich wurde, weisen die neuen Werkstoffkonzepte aufgrund ihrer Herstellung als Laborschmelze eine deutliche größere Inhomogenität auf, als es bei der Industriereferenz der Fall ist. Trotz dieser Randbedingung erreichen die Lagerinnenringe aus den neuen Werkstoffen bei der höchsten Beanspruchung annähernd die Lebensdauer der Lagerinnenringe aus der Industriereferenz. Wird die Beanspruchung auf 3200 MPa reduziert, werden bei einer 50 %igen Ausfallwahrscheinlichkeit sogar die gleichen Lebensdauern erreicht. Wie relevant die erhöhte Schadenstoleranz der neuen Werkstoffkonzepte für die Erzielung dieser Ergebnisse ist, zeigt sich bei den Untersuchungen mit vorgeschädigten Lagerinnenringen. Die Industriereferenz reagiert sehr sensibel auf die Vorschädigung und bei allen ausgefallenen Lagerinnenringen wurde eine Rissinitiation an der Vorschädigung beobachtet. Dagegen versagte ein Großteil der Lagerinnenringe aus den neuen Werkstoffen an Pittingschäden, die nicht von der Vorschädigung, sondern von den bereits im Halbzeug vorhandenen Gefügestellen ausgingen. Besonders eindrucksvoll sind Ergebnisse aus den Wälzlageruntersuchungen mit vorgeschädigten Lagerinnenringen aus dem Werkstoff D6QPT (+ 1,9 % Al). Dieser Werkstoff ist in der Lage, die Schädigung des Gefüges durch die Vorschädigung vollständig zu kompensieren und dadurch die Industriereferenz um das Sechzehnfache übertreffen. Aber auch alle anderen Werkstoffkonzepte erreichen bei einer Beanspruchung von 2800 MPa im vorgeschädigten Zustand eine höhere Lebensdauer als die Industriereferenz.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 16686 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 Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Es wurde vom Fachausschuss 21 (Gefüge und mechanische Eigenschaften) der AWT betreut.

Der vollständige Schlussbericht kann über die Stiftung Institut für Werkstofftechnik bezogen werden.

Kontakt:

Stiftung Institut für Werkstofftechnik
Badgasteiner Straße 3
D-28359 Bremen
www.iwt-bremen.de

Dr.-Ing. Holger Surm
Tel.: 0421 218-51342
Email: surm@iwt-bremen.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages