

Materials Testing

Materialprüfung

7-8/2011 | Volume 53 | www.Materialstesting.de

Materials and Components, Technology and Application



**Einfluss nichtmetallischer
Einschlüsse auf zuverlässige
HCF-Bemessungskennwerte**

S.455

Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse auf zulässige HCF-Bemessungskennwerte*

Steffen Rödling, Jürgen Fröschl,
Manfred Hück und Matthias
Decker, Ottobrunn

Der vorliegende Beitrag stellt die Ergebnisse umfangreicher Schwingfestigkeitsuntersuchungen unter Umlaufbiegebeanspruchung zur Ermittlung der kritischen Einschlussgrößen in unterschiedlichen, hochfesten Stählen vor. Sämtliche Ermüdungsrisse gingen von nichtmetallischen Einschlüssen aus, deren Größe, Form und Lage vermessen und anschließend statistisch ausgewertet wurden. Eine ergänzende Bestimmung des Reinheitsgrades über Gefügeschliffe, wie sie derzeit im Qualitätssicherungsprozess von Stählen Anwendung findet, führte zu einer signifikanten Unterschätzung der Einschlussgrößen und erwies sich als unzureichende Methode zur Beurteilung relevanter Schwingfestigkeitskennwerte. Abschließend wird unter Einbeziehung bruchmechanischer Überlegungen ein Verfahren zur Festlegung zulässiger Bemessungskennwerte in Abhängigkeit vom größten Einschluss im Werkstoffvolumen angegeben. Hierzu wird ein Sicherheitsbeiwert auf Basis des statistischen Größeneinflusses abgeleitet und der Einfluss der Streuung innerer Fehlstellen auf die Ausfallwahrscheinlichkeit von Bauteilen betrachtet. Durch das vorgestellte Prüf- und Bewertungsverfahren können sowohl Festigkeitspotenziale im Werkstoff besser ausgenutzt als auch das Ausfallrisiko durch optimierte Qualitätsprüfung minimiert werden.

Nichtmetallische Einschlüsse oder andere Gefügeunregelmäßigkeiten sind insbesondere bei schwach gekerbten Bauteilen aus höherfesten Stählen oftmals der Ausgangsort für Ermüdungsrisse. Größe, Anzahl, Form und Verteilung dieser Fehlstellen haben daher einen erheblichen Einfluss auf die lokale Schwingfestigkeit im HCF-Bereich sowie auf die Streuung der Festigkeitswerte. Gerade die Streuung der Dauerfestigkeitswerte hängt unter anderem mit der Streuung der Einschlussgrößen zusammen [11, 12, 15]. Diese wiederum hängt insbesondere von der Art und Größe des Vormaterials sowie der Position ab, an welcher in einem bestimmten Vormaterial nach

nichtmetallischen Einschlüssen gesucht wird. Für die Festlegung von lokal zulässigen Beanspruchungen bei Bauteilen mit einer geforderten, sehr niedrigen, Ausfallwahrscheinlichkeit ist deshalb die Kenntnis der Größenverteilung nichtmetallischer Einschlüsse im Vormaterial von enormer Bedeutung. Weiter steigt mit zunehmender Festigkeit des verwendeten Materials der Einfluss von inneren Fehlstellen auf die Schwingfestigkeit. Umfassende Untersuchungen an unterschiedlichen hochfesten Vormaterialien für Fahrzeugfedern in [1] zeigten dabei einen systematischen Zusammenhang zwischen der lokalen Einschlussgröße und der Dauerfestigkeit. Die in der Schwingfestigkeit üblichen Begriffe der Dauerfestigkeit und des Schwellenwertes werden im Folgenden

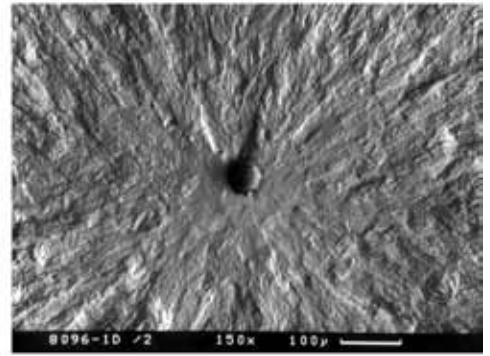
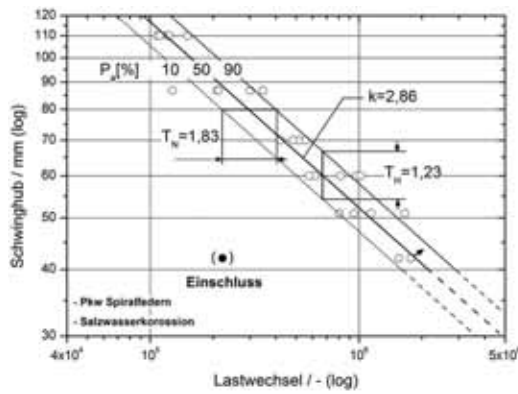
verwendet, ohne näher auf festigkeitsmindernde Effekte im Bereich sehr hoher Lastwechselzahlen einzugehen.

Dieser Einfluss auf die Dauerfestigkeit legt den Schluss nahe, dass das schwingfestigkeitssteigernde Potenzial hochfester Stähle nur dann genutzt werden kann, wenn sichergestellt ist, dass eine gewisse Größe an nichtmetallischen Einschlüssen nicht überschritten wird. In Bild 1 zeigt sich dies an einem Wöhlerschaubild für Pkw-Achsfedern. Der im Diagramm abweichende Bruch konnte unter dem Mikroskop auf einen großen nichtmetallischen Einschluss zurückgeführt werden (Bild 1, rechts, beispielsweise). Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird auf die üblichen Verfahren der Detektion von nichtmetallischen Einschlüssen eingegangen, der

* Dieser Beitrag erschien bereits im DVM-Bericht 137

Bild 1. Auswirkung eines Einschlusses auf die Lebensdauer, Beispiel für einen nichtmetallischen Einschluss in einer REM-Aufnahme [4]

Figure 1. Influence of an inclusion on the durability, example of a non-metallic inclusion in a SEM micrograph [4]



Einfluss dieser Fehlstellen auf HCF-Kennwerte, wie die Dauerfestigkeit, näher dargestellt und eine Möglichkeit zur Berücksichtigung dieser Erkenntnisse beim Festigkeitsnachweis von Bauteilen vorgestellt.

Methoden zur Detektion innerer Fehlstellen

Um auftretende Gefügefehler bei der Streuung von Schwingfestigkeitskennwerten berücksichtigen zu können, muss die Größenverteilung solcher Fehler als ein Maß der Reinheit des Vormaterials bekannt sein. Hierzu werden unterschiedliche Verfahren eingesetzt. Die am weitesten verbreiteten Verfahren sind das Schliiffverfahren als werkstoffkundliche Untersuchungsmethode und die Freilegung von Gefügeengängen über die Umlaufbiegeprüfung. Beide Verfahren werden im Folgenden kurz betrachtet und miteinander verglichen.

Schliiffverfahren. Das am häufigsten zur Anwendung kommende Verfahren zur Bestimmung nichtmetallischer Einschlüsse ist das Schliiffverfahren. Dieses Verfahren beruht auf der lichtmikroskopischen Beurteilung einer Schliifffläche definierter Größe als repräsentative Bestim-

mung für den gesamten Werkstoff. Hierbei werden die erzeugten Schliiffflächen in der Regel vollautomatisch gescannt und über Grauwertanalysen auf Gefügedefekte anhand auftretender Kontrastunterschiede untersucht [2]. Die ermittelten Defekte werden nach standardisierten Verfahren, wie z.B. DIN 50602 oder ASTM-E45, klassifiziert und die statistische Verteilung in Lage, Art und Größe für den gesamten Werkstoff bestimmt.

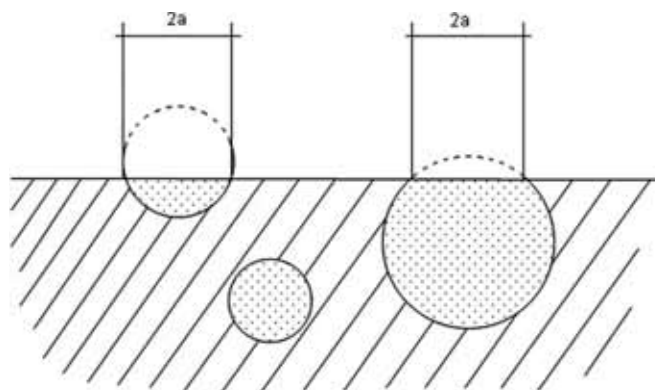
Umlaufbiegeprüfung. Bei dieser Art der Detektion macht man sich zunutze, dass die inneren Fehlstellen infolge ihrer Kerbwirkung eine Spannungsüberhöhung hervorrufen und so zum Bruchauslöser werden. Der Bruchausgang als mikroskopischer Ermüdungsanriss bildet sich im Allgemeinen an der Bauteil- oder Probenoberfläche. Um den Rissausgang an Fehlstellen unterhalb der Oberfläche initiieren zu können, muss ein Versagen der Probe aufgrund von Defekten an der Oberfläche vermieden werden. Hierzu werden die für die Umlaufbiegeprüfung verwendeten Proben einer speziellen Oberflächenbehandlung unterzogen. Über ein nachträgliches Festigkeitsstrahlen der Oberfläche wird in der Randschicht der Proben ein Eigenspannungszustand erzeugt, der einen

Anriss an der Oberfläche verhindert. Zusätzlich wird der Werkstoff zuvor über Härteverfahren in seiner Festigkeit so weit gesteigert, dass mit der dann möglichen höheren Spannung innere Fehlstellen als Bruchauslöser aktiviert werden können. Die Durchführung der Versuche erfolgt nach dem Prinzip der Vierpunktbiegung. In der Prüfmaschine wird über zwei Vorspannlager eine Kraft auf die Probe aufgebracht, die zwischen den beiden inneren Lagern zu einem konstanten Biegemoment führt. Durch Rotation der Probe wird die Belastung zu einer umlaufenden Biegung. Die so aufgebrachte Biegelast führt im geprüften Volumen zur Initiierung eines Risses an der wirksamsten, im gleichmäßig beanspruchten Werkstoffvolumen vorhandenen Gefügeengänge. Dies führt zu einem Versagen der Probe und zur Freilegung der Fehlstelle in der Bruchfläche. Die Lage und Größe der für das Probenversagen verantwortlichen Fehlstelle werden dann im Rasterelektronenmikroskop vermessen und die chemische Zusammensetzung bestimmt.

Vergleich der Verfahren. Mit dem Schliiffverfahren wird lediglich eine Schnittfläche eines Einschlusses unter dem Lichtmikroskop zur Beurteilung des Fehlstellengehaltes und damit der Reinheit des Werkstoffes herangezogen. Bild 2 zeigt dies in schematischer Form an zwei kugelförmigen, unterschiedlich großen Einschlüssen. Bei beiden Fehlstellen wird bei der Auswertung im Schliiff von der gleichen Einschlussgröße ausgegangen. Zusätzlich können Einschlüsse, die knapp außerhalb der Schliiffebene liegen, nicht entdeckt werden. Damit führt eine statistische Betrachtung der Größe, der als kugelförmig angenommenen nichtmetallischen Einschlüsse, mit diesem Verfahren systematisch zu einer Unterbewertung. Aus diesem Grund werden in

Bild 2. Durch Schliiffverfahren bestimmte Querschnitte zweier Einschlüsse

Figure 2. Determination of the cross-section of two inclusions by means of a metallographic specimen



der Literatur [15, 17, 18] Verfahren zur Umrechnung der Kreisradienverteilung von Fehlstellen in die „wahre“ Kugelradienverteilung vorgeschlagen.

Das Verfahren der Umlaufbiegung dagegen aktiviert im geschädigten Probenvolumen mit der entsprechenden Probenbehandlung den für den Bruchausgang wirksamsten Einschluss. Mit dieser Versuchstechnik wird mit einer entsprechenden Anzahl von Proben ein statistisch abgesichertes Ergebnis für die Größe und die Lage der für die Bruchinitiierung relevanten Einschlüsse, erzielt.

Im direkten Vergleich der beiden Verfahren zeigten sich beim Schliiffverfahren im Unterschied zum Verfahren der Umlaufbiegung eine stark unterschiedliche Größenverteilung und Absolutgröße der ermittelten Fehlstellen. Auch unter Anwendung der in der Literatur [15, 17, 18] dargestellten Umrechnungsverfahren werden die Maximalgrößen der zu erwartenden Fehlstellen noch stark unterschätzt. Die Verfahren zeigen bei einer geringen Fehlstellendichte noch Schwächen und ermöglichen es nicht, mit den angewendeten metallografischen Verfahren die größten Einschlüsse zu detektieren. Die aus dem Schliiffverfahren abgeleiteten Annahmen in Bezug auf die Schwingfestigkeitseigenschaften können somit wegen des potenziell irreführenden Ergebnisses der Reinheitsbestimmung des Vormaterials durch das Schliiffverfahren stark nichtkonservativ sein. Untersuchungen von Huster [13] bestätigen dies und zeigen stark nichtkonservative Ergebnisse der Lebensdauerabschätzung auf Basis der aus Schliiffen ermittelten Fehlstellenverteilungen. Aus diesem Grund wurde bereits von Heckel [8] und Ziebart [10] versucht, auf Basis vorhandener Wöhlerversuche über einen bruchmechanischen Ansatz auf die Risskeimverteilung im betrachteten Werkstoff zu schließen.

Ableitung von Bemessungskennwerten auf Basis bruchmechanischer Überlegungen

Von Georges [1] wurden umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss von inneren Fehlstellen auf die Schwingfestigkeit an elf hochfesten Feder- und Wälzlagertählen durchgeführt. Zur Ermittlung der bruchauslösenden Fehlstellen wurde das im vorangegangenen Kapitel beschriebene Verfahren der Umlaufbie-

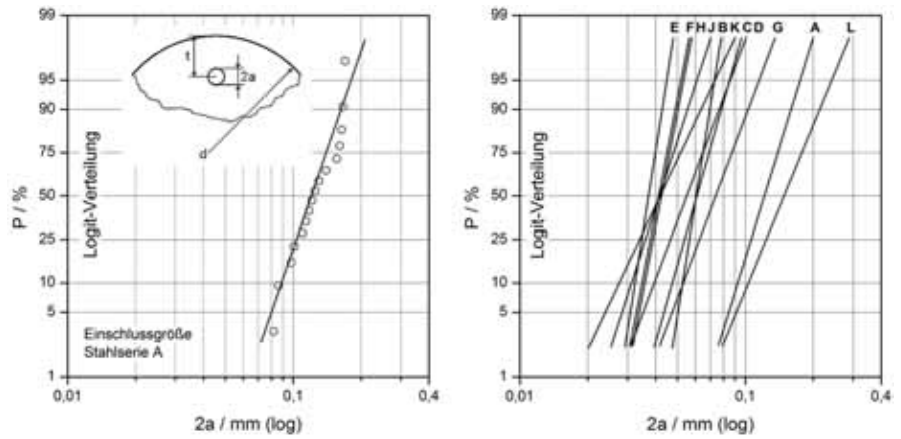


Bild 3. Größenverteilung innerer Fehlstellen in hochfesten Stählen

Figure 3. Size distribution of internal defects in high-strength steels

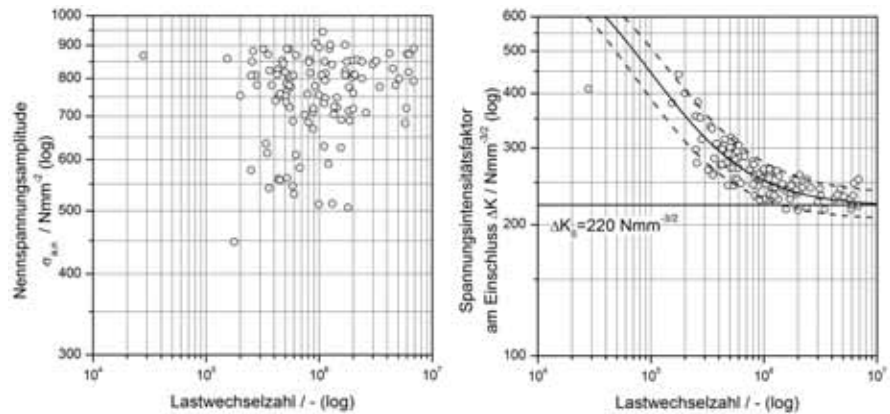


Bild 4. Betrachtung der Lebensdauer von Proben mit inneren Fehlstellen unter Berücksichtigung der Bruchmechanik

Figure 4. Durability of samples with internal defects regarding fracture mechanics

geprüfung an hochfest vergüteten und festigkeitgestrahlten Rundstäben verwendet. Aufgrund der Oberflächenbehandlung der Proben kommt es unter Belastung infolge der lokalen Spannungsüberhöhung an inneren Fehlstellen, wie nichtmetallischen Einschlüssen, zur Anrissbildung und die Fehlstelle wird zum Bruchauslöser. Bild 3 zeigt die Ergebnisse der untersuchten Werkstoffe in Form der Größenverteilung der als kugelförmig angenommenen nichtmetallischen Einschlüsse. Damit kann der Defektgröße ein flächenäquivalenter Durchmesser $2a$, resultierend aus der im Sinne der Bruchmechanik verwendeten Bezeichnung für die Risslänge, zugeordnet werden. Für 175 Einschlüsse wurden die standardisierten Merkmalsgrößen gemeinsam ausgewertet und in je ein Wahrscheinlichkeitsnetz der Weibull-, Log-Normal- und Logit-Verteilung eingetragen. Verwendet man die

Summe der quadratischen Abweichungen von der jeweiligen Ausgleichsgeraden als Maß für die Beurteilung der Eignung der Verteilungsmodelle, so ergibt sich für die Logit-Verteilung die geringste Abweichungssumme. Das aus Überlegungen zum Kettenmodell („weakest link“) ableitbare Verteilungsmodell eignet sich deshalb gut zur statistischen Auswertung von Einschlussverteilungen und wird in diesem Fall verwendet. Gleichzeitig wird die Logit-Verteilung für Extrapolationen auf große Werkstoffvolumina sowie zur Abschätzung von Sicherheitsbeiwerten auf statistischem Wege eingesetzt.

Zur vergleichenden statistischen Bewertung werden sämtliche Durchmesser der bruchauslösenden Fehlstellen in unterschiedlicher Tiefe auf einen Durchmesser mit gleicher Spannungsintensität in einer Referenztiefe umgerechnet. Zudem erfolgt zur Berücksichtigung des

Bild 5. Abschätzung der lokalen Schwingfestigkeit in Abhängigkeit vom mittleren, rissinitierenden Einschlussdurchmesser aus dem Umlaufbiegeversuch

Figure 5. Estimation of the local durability regarding the average, crack initiating inclusion size from the rotating bending test

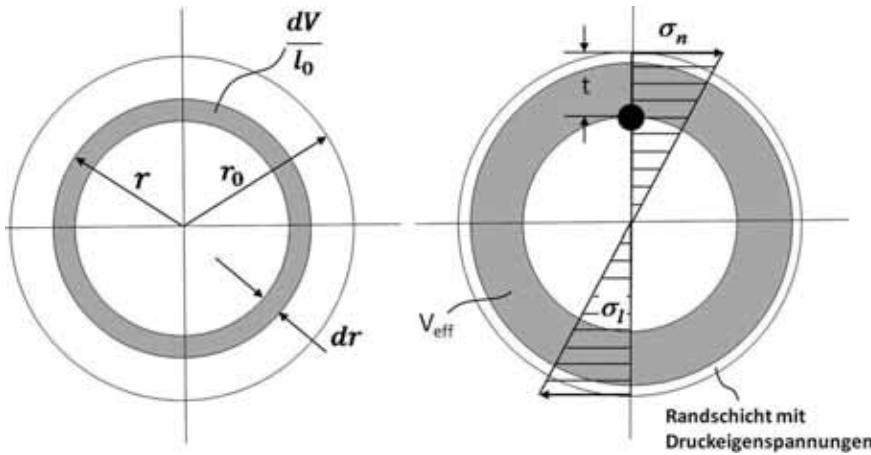
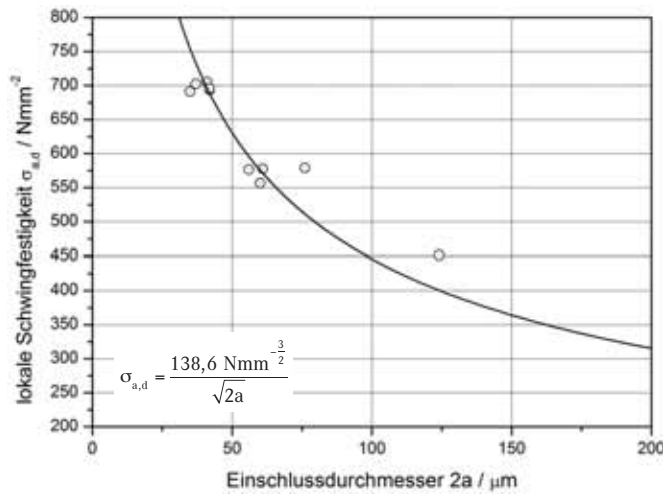


Bild 6. Modell zur Bestimmung des effektiven Volumens

Figure 6. Model for the derivation of the effective volume

statistischen Größeneinflusses eine Umrechnung der Durchmesser der Fehlstellen abhängig vom kritisch beanspruchten Volumen der jeweiligen Probe auf ein einheitliches Vergleichsvolumen. Nähere Informationen zu diesem Vorgehen finden sich in Georges [1].

In Bild 3 zeigt sich eine sehr große Bandbreite im Durchmesser der auftretenden Einschlüsse. Vergleichende Untersuchungen der Werkstoffe mit dem Schliiffverfahren zeigten mit deutlich kleineren detektierten Einschlussdurchmessern keinerlei Korrelation zu den Ergebnissen der Umlaufbiegeprüfung. Bei den hier untersuchten hochbeanspruchten Proben ist die vom Anriss ausgehende Rissfortschrittsphase in Bezug auf die Gesamtlebensdauer vernachlässigbar. Daher lässt sich die Anrisslebensdauer als Gesamtlebensdauer in einem Wöhlerdiagramm darstellen.

Bild 4 zeigt auf der linken Seite die ermittelten Lebensdauern der Umlaufbiegeversuche in Bezug auf die Nennspannungsamplituden. Es ist kein ungeordneter Zusammenhang zwischen bruchauslösender Fehlstelle (in Größe und Lage) und der Bauteillebensdauer zu erkennen. Da die Gesamtlebensdauer der untersuchten Proben im Wesentlichen durch die Anrisslebensdauer bestimmt wird, liegt eine Beschreibung des Zusammenhangs zwischen bruchauslösender Fehlstelle und der Lebensdauer über das Örtliche Konzept nahe, in dem der Einschluss als sehr scharfe Kerbe interpretiert wird. Der auftretende hohe Spannungsgradient macht jedoch eine Hilfsgröße notwendig, die sich mit dem Spannungsintensitätsfaktor als beschreibende Kenngröße der Bruchmechanik zu Beginn der Rissfortschrittsphase ableiten lässt.

Heckel [8] und El Haddad, Smith, Topper [9] beschreiben diese Zusammenführung zwischen Wöhlerkonzept und Bruchmechanik bereits sehr früh. In diesen Konzepten wird der Ausgangspunkt für einen Riss durch einen fiktiven, mithilfe der Bruchmechanik beschreibbaren Riss angenähert.

Zur Darstellung der lokal am Einschluss in der Tiefe t wirkenden Beanspruchung wird die Nennspannungsamplitude $\sigma_{a,n}$ über den Spannungsverlauf am Biegestab mit dem Durchmesser d auf die lokale Beanspruchung $\sigma_{a,l}$ umgerechnet (Bild 6, rechts):

$$\sigma_{a,l} = \sigma_{a,n} \cdot \left(\frac{d - 2t}{d} \right) \tag{1}$$

Unter Verwendung der entsprechenden Korrekturfunktion für einen halbrunden Anriss in einer Rundprobe $Y(a) = 2/\pi$ [6] und der lokalen Spannung aus Gleichung (1), ergibt sich der in Gleichung (2) dargestellte Zusammenhang für die Schwingbreite der Spannungsintensität am Einschluss:

$$K = 2 \cdot \sigma_{a,n} \cdot \frac{d - 2t}{d} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \frac{2}{\pi} \tag{2}$$

Mit den auf diese Weise umgerechneten Nennspannungsamplituden auf die Spannungsintensitäten am Einschluss fallen sämtliche Ergebnisse aus Bild 4 im Wöhlerschaubild in einer Weise zusammen, die eine Approximation erlaubt (Bild 4, rechts). Analog zu Nennspannungswöhlerlinien lassen sich die Ergebnisse in der gewählten Darstellung analytisch wie folgt beschreiben [1]:

$$N = 5 \cdot 10^4 \cdot \frac{900 - \Delta K}{\Delta K - \Delta K_0} \tag{3}$$

mit

$$\Delta K_0 = 220 \text{ Nmm}^{-3/2} .$$

Der so aus den vorliegenden Untersuchungen im Dauerfestigkeitsbereich ermittelte Schwellenwert $\Delta K_0 = 220 \text{ Nmm}^{-3/2}$ (Bild 4) ist also unabhängig von der Stahlorte und kann als Grundlage für die Bewertung der Schwingfestigkeit bei bekannter Fehlstellenverteilung verwendet werden. Weitere Untersuchungen von Hück et al. [3] und Gallagher [5] bestätigen dieses Ergebnis für Stahl.

Unter Verwendung dieses Schwellenwertes der lokalen Spannungsintensität am Einschluss kann aus dem mittleren

Durchmesser der potenziell rissinitiierenden Fehlstellen $\sqrt{2a}$ eines Werkstoffes die lokale Schwingfestigkeit bei einer definierten Grenzlastspielzahl abgeschätzt werden [15]:

$$\sigma_{a,d} = 0,63 \cdot \frac{\Delta K_0}{\sqrt{2a}}$$

mit

$$\Delta K_0 = 220 \text{ Nmm}^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

Die im Versuch ermittelten Dauerfestigkeitswerte mehrerer Stähle aus [1] zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit dem über die Bruchmechanik hergeleiteten Ansatz zur rechnerischen Abschätzung der lokalen Schwingfestigkeit (Bild 5). Untersuchungen in [15] bestätigen diesen Einfluss der Defektgröße auf die Dauerfestigkeit für verschiedene Stähle.

Es zeigt sich ein relevanter Einfluss der mittleren Fehlergröße im Werkstoff auf die lokale Schwingfestigkeit. Gemäß der Darstellung in Bild 5 muss bei Auftreten nichtmetallischer Einschlüsse mit einer maximalen Größe von 150 μm bei der Festlegung der Schwingfestigkeitskennwerte von einer Halbierung der lokalen Schwingfestigkeit gegenüber einem Werkstoffzustand mit technisch nicht detektierbaren Einschlüssen ausgegangen werden. Wie aus den vorliegenden Untersuchungen hervorgeht, liegt diese untere Grenze bei $< 30 \mu\text{m}$ [1].

Definition eines Sicherheitsbeiwertes für die zulässige, dauerhaft ertragbare Beanspruchung auf Basis der ermittelten Fehlstellenverteilung

Zur Ermittlung eines verallgemeinerten Sicherheitsbeiwertes für die Dauerfestigkeit muss die im Umlaufbiegeversuch ermittelte Fehlstellenverteilung wegen des versuchsspezifischen Spannungsgradienten auf ein äquivalentes, axial belastetes und daher gleichmäßig beanspruchtes Volumen umgerechnet werden.

Umwertung Umlaufbiege- in Axialbelastung. Aus dem Spannungsintegral [7, 14] ergibt sich das äquivalente Volumen V_0 bei Axialbeanspruchung gemäß:

$$V_0 = \int_V \left[\frac{\sigma_{xyz}}{\sigma_{\max}} \right]^m dV \quad (5)$$

Bei Umlaufbiegung eines zylindrischen Stabes vom Durchmesser $d_0 = 2 \cdot r_0$ und

einer gleichmäßig beanspruchten Länge l_0 (kreisförmige Biegelinie unter Vierpunkt-biegung) folgt die Vereinfachung:

$$V_0 = \int_V \left[\frac{r}{r_0} \right]^m dV \quad \text{mit} \quad \frac{\sigma_{xyz}}{\sigma_{\max}} = \frac{r}{r_0} \quad (6)$$

Mit dem Streuungsexponenten der Logit-Verteilung (Index L):

$$m = 0,524 \cdot \lg T_{L,a} \quad (7)$$

mit $T_{L,a}$: Streuspanne (10%/90%) der Fehlstellenverteilung.

Das Volumenelement des Integrals ergibt sich für die verwendeten Rundproben aus Bild 6 zu:

$$dV = 2\pi \cdot r \cdot l_0 \cdot dr \quad (8)$$

Damit kann Gleichung (6) umgestellt werden zu:

$$V_0 = 2\pi \cdot l_0 \cdot r_0^{-\frac{1}{m}} \int_0^{r_0} r^{1+\frac{1}{m}} dr \quad (9)$$

Berücksichtigt man ferner, dass Fehlstellen, die im Bereich der aus dem Kugelstrahlen stammenden Druckspannungsschicht von ca. 0,22 mm Dicke unwirksam sind, so ergibt die Integration:

$$V_0 = \frac{2\pi \cdot l_0}{2 + \frac{1}{m}} \cdot r_0^{-\frac{1}{m}} \cdot (r_0 - 0,22)^{2+\frac{1}{m}} \quad (10)$$

V_0 ist die aus dem Umlaufbiegeversuch ermittelte Bezugsgröße für das Bauteilvolumen V_B . Dieses berechnet sich aus dem Spannungsintegral des Bauteils V_e , sowie dem Serienumfang n_B :

$$V_B = n_B \cdot V_e \quad (11)$$

Für die Berechnung des Spannungsintegrals des Bauteils werden dabei die im Umlaufbiegeversuch ermittelten Verteilungsdaten der Ungängen verwendet.

Ableitung eines Sicherheitsbeiwertes. Diese Verteilungsdaten (Mittelwert a_0 und Streuspanne $T_{L,a}$) bilden damit die Grundlage für die Ableitung von zulässigen Spannungen. Dazu wird die experimentell ermittelte Verteilung der Ungängen auf einen Wert extrapoliert, der sich aus dem Volumenverhältnis zwischen Probe und Bauteil ergibt:

$$P_A = \frac{1}{1 + \frac{V_0}{n_B \cdot V_e}} \quad (12)$$

Der für die zulässige, dauerhaft ertragbare Spannung kritische Durchmesser $2a_z$ der Ungängen in einem von n_B Bauteilen ermittelt sich aus der Extrapolationsgleichung:

$$\lg a_z = \lg a_0 + k \cdot s_{lg} \quad (13)$$

bzw.

$$a_z = a_0 \cdot 10^{k \cdot s_{lg}} = a_0 \cdot T_{L,a}^{\frac{k}{2,42}} \quad (14)$$

mit a_0 : mittlere Defektgröße bei einer statistischen Sicherheit von 50% und s_{lg} : Standardabweichung.

Die standardisierte Variable k ergibt sich unter Berücksichtigung der Konfidenz (statistische Sicherheit S) aus folgender Beziehung [19]:

$$k = \frac{2 \cdot (n_p - 1)}{2 \cdot (n_p - 1) - u_s^2} \cdot \left[u_p \pm u_s \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (n_p - 1) + n_p \cdot u_p^2 - u_s^2}{2 \cdot n_p \cdot (n_p - 1)}} \right] \quad (15)$$

mit n_p : Anzahl der im Umlaufbiegeversuch ermittelten Ungängen, u_p : Fraktile für die Extrapolation auf $2a_z$ und u_s : Fraktile für die gewünschte, einseitige statistische Sicherheit S .

Für die hier stets angewendete Logit-Verteilung ergeben sich die beiden Fraktile zu den in den Gleichungen (16) und (17) dargestellten Ausdrücken:

$$u_p = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \ln \frac{n_B \cdot V_e}{V_0} \quad (16)$$

$$u_s = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \ln \frac{s}{1-s} \quad (17)$$

Ausgehend von diesen Überlegungen lässt sich mit Gleichung (4) die dauerhaft ertragbare, lokale Spannungsamplitude σ_{zul} für ein Bauteil mit einer unter n_B Bauteilen zu erwartenden Fehlstellengröße von $2a_z$ mit einer festzulegenden Konfidenz berechnen.

Wenn davon ausgegangen werden kann, dass Materialungängen das Versagen eines Bauteiles bei hoher Festigkeit und großen Volumina verursachen können, lässt sich damit nach den Überlegungen zum statistischen Größeneinfluss ein Teilsicherheitsfaktor für zulässige Fehler im Werkstoff f_f ableiten.

Ausgehend von der Dauerfestigkeit σ_D eines einzelnen Bauteils ergibt sich

der Sicherheitsbeiwert j_f mit der zulässigen Beanspruchung σ_{zul} aus der Logit-Verteilung:

$$j_f = \frac{\sigma_D}{\sigma_{zul}} = \frac{\sigma_D}{0,63 \cdot \frac{\Delta K_0}{\sqrt{2a_z}}} \quad (18)$$

Da der bruchmechanische Schwellenwert ΔK_0 unabhängig vom Werkstoff und dessen Zugfestigkeit ist, gelten die hier angegebenen Gleichungen für sämtliche Stahlsorten [1].

In Bild 7 ist beispielsweise an einer ermittelten Fehlstellenverteilung die Ermittlung der zulässigen Defektgröße bei einer angenommenen Überlebenswahrscheinlichkeit von 99,99% im Konfidenzbereich $S = 90\%$ dargestellt. Damit ergibt sich für ein Großserienbauteil mit einem Serienumfang von $n = 2 \cdot 10^5$, einem kritisch belasteten Bauteilvolumen $V_e = 500 \text{ mm}^3$, einem Bezugsvolumen der Probe

$V_0 = 10\,000 \text{ mm}^3$ und der Streuspanne für die Fehlstellenverteilung $T_{L,a} = 1,8$ ausgehend von einer mittleren Defektgröße $2a_0 = 0,08 \text{ mm}$ die zulässige Spannungsamplitude zu $\sigma_{zul} = 218 \text{ MPa}$. Dies ist die dauerhaft ertragbare Spannungsamplitude für ein Bauteil mit der unter n_B Bauteilen zu erwartenden Einschlussgröße $2a_z = 0,4 \text{ mm}$ bei einer Konfidenz von 90%. Die hier abgeschätzte maximale Größe der Einschlüsse $2a_z$ kommt jedoch erst dann zur Auswirkung, wenn die dauerhaft zu ertragenden Spannungen über den rechnerisch abgeschätzten Spannungsamplituden σ_{zul} liegen.

Einfluss der Streuung interner Fehlstellen auf die der Bauteillebensdauer

Die Bestimmung der Streuspanne $T_{L,\sigma}$ der Dauerfestigkeit bei Wöhlerlinienversuchen ist aufgrund zu geringer Pro-

benumfänge in der Regel mit hohen Unsicherheiten behaftet. Für die statistische Auswertung liegen im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit oftmals nur drei bis fünf Spannungsniveaus mit einer geringen Anzahl an Prüfergebnissen je Niveau vor. Aus diesem Grund ist einerseits die Ermittlung der entsprechenden Bruchwahrscheinlichkeit für jedes Lastniveau und andererseits die Regression im Wahrscheinlichkeitsnetz statistisch nicht ausreichend gesichert. Im Unterschied dazu ist die Bestimmung der Streuspanne der Einschlussgrößenverteilung $T_{L,a}$ aufgrund einer höheren Anzahl an Versuchsergebnissen (Bild 8, rechts) deutlich zuverlässiger.

Um einen Zusammenhang zwischen der Streuspanne der ertragbaren Spannungsamplituden $T_{L,\sigma}$ mit der Streuspanne der Einschlussgrößen $T_{L,a}$ herzustellen, muss zunächst eine formelmäßige Beziehung zwischen der ertragbaren Spannungsamplitude und der Einschlussgröße beschrieben werden. Unter Anwendung der linear elastischen Bruchmechanik erhält man über den Spannungsintensitätsfaktor folgenden Zusammenhang für die Risslänge:

$$\Delta K = 2 \cdot \sigma_{a,n} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y \quad (19)$$

$$a = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\Delta K}{2 \cdot \sigma_{a,n} \cdot Y} \right)^2 \quad (20)$$

Für einen festen Spannungsintensitätsfaktor ist die entsprechende Spannungsamplitude umgekehrt proportional zur Wurzel der Einschlussgröße.

$$a \sim \left(\frac{1}{\sigma_{a,n}} \right)^2 \quad (21)$$

Für die Streuspannen gilt die Inversion nicht, da diese lediglich den Umstand

Bild 7. Abschätzung der zulässigen Defektgröße auf Basis der ermittelten Fehlstellenverteilung unter Berücksichtigung statistischer Überlegungen

Figure 7. Estimation of the tolerable defect size with regard to the distribution of the internal defects and statistical considerations

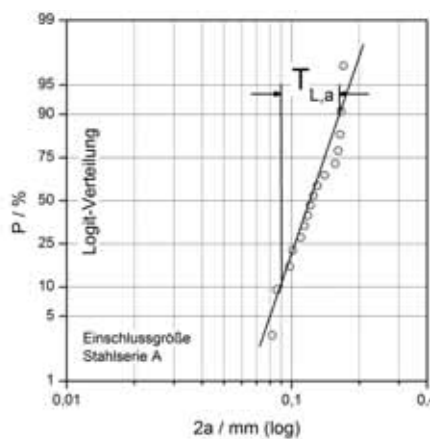
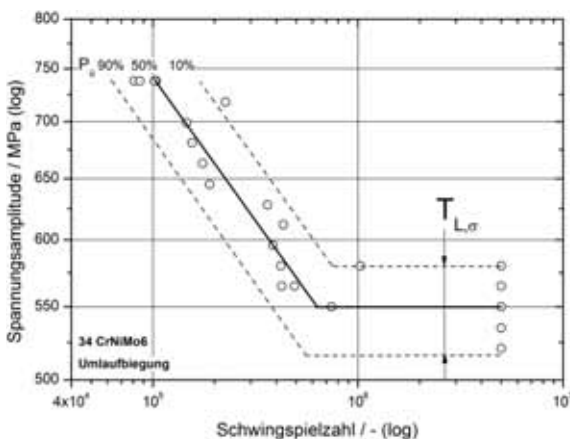
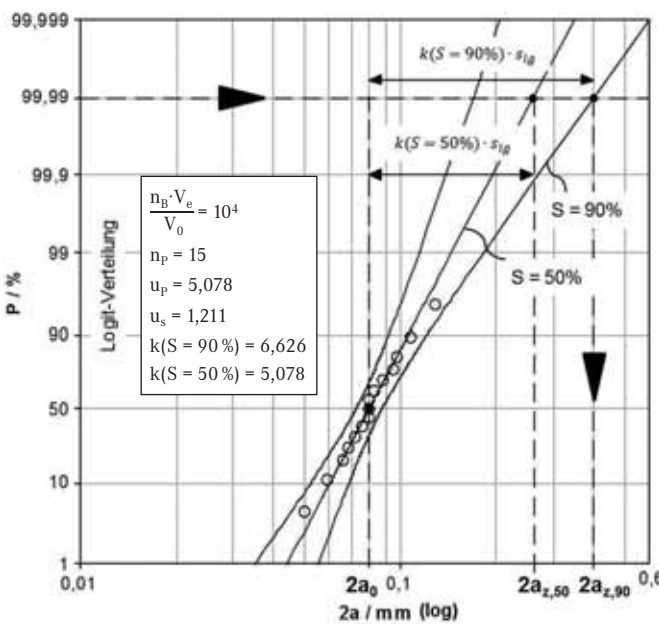


Bild 8. Definition der Streuspannen im Wöhlerlinienschaubild und im Wahrscheinlichkeitsnetz

Figure 8. Definition of the scatter at the Wöhler diagram and the probability grid

widerspiegelt, dass kleine Einschlüsse entsprechend zu hohen ertragbaren Schwingfestigkeiten führen. Für die Streuspannen gilt demnach:

$$T_{L,a} = T_{L,\sigma}^2, \text{ bzw. } T_{L,\sigma} = \sqrt{T_{L,a}}. \quad (22)$$

Da auf die Streuspanne der Spannungsamplituden $T_{L,\sigma}$ neben den nichtmetallischen Einschlüssen auch noch andere Effekte wie z. B. Streuungen der Härte des Gefüges oder Oberflächeneigenschaften einwirken, kann mit dieser Beziehung nicht das absolute Maß der Streuspanne $T_{L,\sigma}$ bestimmt werden. Es lässt sich dadurch jedoch eine deutlich genauere Aussage über die Größenordnung der Streuspanne angeben. Wird das vorgestellte Verfahren zur Ermittlung der Einschlussgrößenverteilung beispielsweise für einen Chargenvergleich in der Qualitätssicherung herangezogen, so können damit direkt die Auswirkungen auf die Streuungen der Bauteilschwingfestigkeiten abgeleitet werden.

Fazit und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass im Rahmen der Auslegung von Bauteilen innere Fehlstellen als Bruchauslöser im hochbeanspruchten Bauteilvolumen berücksichtigt werden müssen. Rein werkstoffkundliche Verfahren zur Bestimmung der Reinheit des Werkstoffes, wie das in der Stahlindustrie verwendete Schließverfahren, liefern keine verlässliche Aussage über den Gehalt an bruchauslösenden Fehlstellen und damit kein zuverlässiges Kriterium für Verbesserungspotenziale im Qualitätssicherungsprozess der Stahlherstellung und der Stahlqualität. Auch die entwickelten Korrekturverfahren sind nicht geeignet, die größten Einschlüsse auf metallografischem Weg zu ermitteln. Als verbessertes Konzept zur Qualitätssicherung wird mit der Prüfung von hochvergüteten und festigkeitsgestrahlten Werkstoffproben unter Umlaufbiege- oder Axialbelastung ein Verfahren zur Ermittlung der Fehlstellenverteilung vorgeschlagen. Liegen mit einer entsprechenden Anzahl von Ergebnissen statistische Aussagen über die Verteilung der rissinitiierenden Fehlstellen eines Werkstoffes vor, so kann mit den vorgestellten bruchmechanischen Überlegungen die zulässige Defektgröße und damit die dauerhaft ertragbare Beanspruchung rechnerisch

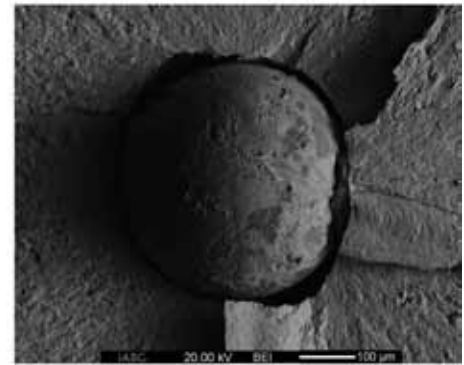
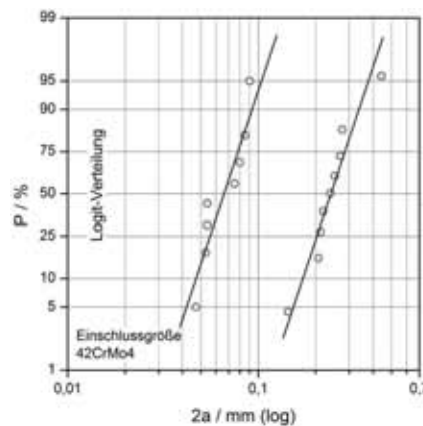


Bild 9. Fehlstellenverteilung für 42CrMo4/Beispiel für einen großen Einschluss ($2a = 430 \mu\text{m}$)

Figure 9. Distribution of internal defects for 42CrMo4/Example for a big non-metallic inclusion ($2a = 430 \mu\text{m}$)

abgeschätzt werden. Mit der dargestellten Korrelation der Fehlstellenverteilung eines Werkstoffes zur Streuung der Bauteillebensdauer kann so ein Sicherheitsbeiwert bestimmt werden, der die Reduzierung der Dauerfestigkeit aufgrund vorhandener Fehlstellen berücksichtigt. Weiter erhält man mit der Bestimmung der Reinheit des Werkstoffes eine relativ genaue Abschätzung der Streuung der Bauteilschwingfestigkeiten. Das schwingfestigkeitssteigernde Potenzial hochfester Stähle kann jedoch nur dann genutzt werden, wenn sichergestellt ist, dass eine gewisse Größe an nichtmetallischen Einschlüssen nicht überschritten wird. Die Bestimmung der Fehlstellenstatistik als Maß für die Reinheit des verwendeten Werkstoffes mit dem vorgeschlagenen Verfahren ist aus diesem Grund aus Sicht der Autoren ein unverzichtbarer Schritt für die Bemessung von Bauteilen. Auf diese Weise können bei der Verwendung hochfester Werkstoffe bereits in der Auslegungsphase von Bauteilen festigkeitsmindernde Einflüsse aufgrund innerer Fehlstellen bei der Bemessung berücksichtigt werden. Umgekehrt kann aus der Forderung der in der Bemessung als zulässig definierten Spannung in Abhängigkeit von der geforderten Ausfallwahrscheinlichkeit eine maximal zulässige Defektgröße abgeleitet, und damit eine Reinheitsforderung für den verwendeten Werkstoff definiert werden.

In weiterführenden Betrachtungen soll untersucht werden, inwieweit die in dieser Veröffentlichung dargestellten Ergebnisse für Werkstoffe mit niedrigerer Festigkeit relevant sind. Erste Unter-

suchungsergebnisse in Bezug auf die Reinheit von weniger festen Werkstoffen zeigen die in Bild 9 dargestellten Ergebnisse. Für den verwendeten Werkstoff 42CrMo4 sind im Umlaufbiegeversuch innere Fehlstellen mit einer Größe von mehr als $400 \mu\text{m}$ ermittelt worden. Für den gleichen Werkstoff sind zwei Chargen, mit deutlich unterschiedlichen Fehlstellenverteilungen, dargestellt.

Trotz zusätzlicher Einflüsse durch Oberflächenkerben kann es zu einem Versagen eines Bauteiles durch große innere Fehlstellen kommen. Die Untersuchungen zeigen deutlich, mit welchen Ungenauigkeiten beim Einsatz dieser Werkstoffe zu rechnen ist. Eine statistische Betrachtung der Fehlstellen und deren Einfluss auf HCF-Bemessungskennwerte ist daher bei der Auslegung von Bauteilen mit großen Serienumfängen, und damit meist niedrigen geforderten Ausfallwahrscheinlichkeiten, unumgänglich.

Literatur

- 1 T. Georges: Zur Gewichtsreduzierung von Fahrzeugfedern unter besonderer Beachtung des schwingfestigkeitsmindernden Einflusses bruchauslösender Fehlstellen im Halbzeug Federdraht, VDI Fortschritts-Bericht, Reihe 5, Nr. 593 (2009)
- 2 S. Bethlehem-Seidel, E. Kast: Automatisches Verfahren zur Reinheitsgradbestimmung an Stählen im REM mittels kombinierter RE-Graustufenbildanalyse und EDX-Analyse mit spezieller Auswertesoftware, Sonderbände der Praktischen Metallographie, Fortschritte in der Metallographie 27 (1995), S. 139 ff.
- 3 M. Hück, P. Heuler, J. W. Bergmann: Bewertung der Schwingfestigkeit der mikrolegierten Stähle 27MnVS6 und 38MnVS5, FKM-Forschungsheft 163, Frankfurt/M. (1992)

- 4 M. Hück: Grundsatzuntersuchung über die Betriebsfestigkeit von Achsfedern am Beispiel der W210-HA-Federn, IABG Bericht B-TA-3903, IABG Ottobrunn (2003)
- 5 J. Gallagher: Damage Tolerant Design Handbook, MCIC-HB-01R, Volume 2, Metals and Ceramics Information Center, Batelle, Columbus, Ohio (1983)
- 6 H. Tada, P. Paris, G. Irwin: The Stress Analysis of Cracks Handbook, ASME, Three Park Avenue, New York (2000)
- 7 J. Böhm, K. Heckel: Die Vorhersage der Dauerschwingfestigkeit unter Berücksichtigung des statistischen Größeneinflusses, Zeitschrift für Werkstofftechnik 13 (1982), S. 120-128
- 8 K. Heckel: Wirkung von Kerben bei schwingender Beanspruchung, in: W. Dahl: Verhalten von Stahl bei schwingender Beanspruchung, Verlag Stahleisen, Düsseldorf (1978)
- 9 M. H. El Haddad, K. N. Smith, T. H. Topper: Fatigue crack propagation of short cracks, Transactions of the ASME 101 (1979), S. 42-46
- 10 W. Ziebart: Ein Verfahren zur Berechnung des Kerb- und Größeneinflusses bei Schwingbeanspruchung, Dissertation, TU München (1976)
- 11 G. Lange, W. Witzel: Der Einfluss grober Ausscheidungen auf die Dauerfestigkeit von Aluminiumlegierungen, Zeitschrift für Metallkunde 70 (1979), S. 403-405
- 12 P. A. Thornton: The influence of non-metallic inclusions on the mechanical properties of steel, A review, Journal of Material Science 6 (1971), pp. 347-356
- 13 J. Huster: Lebensdauervorhersage bei Schwingbeanspruchung unter Berücksichtigung der Mikrorissausbreitung, Dissertation UniBw München (1988)
- 14 C. Krä: Beschreibung des Lebensdauerhaltens gekerbter Proben unter Betriebsbelastung auf der Basis des statistischen Größeneinflusses, Dissertation UniBw München (1988)
- 15 Y. Murakami: Metal Fatigue: Effects of small defects and nonmetallic inclusions, Kyushu University Japan, Elsevier (2002)
- 16 J. Gegner, C. Henninger, A. Öchsner: Stereologische Analyse und Modellierung von Objektverteilungen aus Schnittbildern, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 35 (2004), S. 36-44
- 17 E. Scheil: Die Berechnung der Anzahl und Größenverteilung kugelförmiger Kristalle an durchsichtigen Körpern mit Hilfe der durch einen ebenen Schnitt erhaltenen Schnittkreise, Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie 201, 259 (1931)
- 18 G. Tomandl: Näherungsmethode zur Umrechnung der Kreisradienverteilung von Anschliffen in die „wahren Kugelradienverteilung bei geringem Rechenaufwand, Sonderdruck Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft 48 (1971), No. 5, S. 222-225
- 19 Graf, Henning, Stange, Wilrich: Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin (1987)

Abstract

Influence of Non-Metallic Inclusions on Acceptable HCF Design Properties. This paper presents the results of fatigue investigations under rotating bending loading for the determination of the critical inclusion sizes in different high-strength steels. All fatigue cracks started from non-metallic inclusions, whose size, form and position were determined and statistically evaluated afterwards. An additional determination of the degree of purity derived from microscopic evaluation of cross sections, the commonly used method of quality assurance in steel production, led to a significant underestimation of the inclusion sizes and hence proved to be insufficient for the evaluation of relevant fatigue characteristic values. Finally, a procedure to derive allowable stresses depending on the size of inclusions is shown based on the methods of fracture-mechanics. For this, a safety factor is derived regarding statistical size effect and scatter of internal defects. The methods presented allow for higher utilization of the fatigue strength of the material, as well as for an optimized process of quality assurance, minimizing the risk of failure in service life.

Die Autoren dieses Beitrages

Dr.-Ing. Steffen Rödling, geboren 1973, studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität der Bundeswehr München und promovierte 2003 am Institut für Werkstoffkunde der Universität der Bundeswehr München, in Neubiberg. Im Juli 2005 wechselte er als Projektleiter für Bauteilversuche und Fahrtriebssmessungen in den Bereich Tests und Analysen der Industrieanlagen Betriebsgesellschaft mbH. Seit 2007 ist er als Leiter der Abteilung für Betriebsfestigkeit, Bauteilprüfung, Prüfstände der IABG in Ottobrunn verantwortlich für die Entwicklung von Prüfkonzepten, die Durchführung von Bauteilerprobungen und den Betrieb von Großprüfständen.

Dr. mont. Jürgen Fröschl, geboren 1976, studierte Maschinenbau an der Technischen Universität Wien und promovierte 2006 am Christian-Doppler-Laboratorium für Betriebsfestigkeit der Montanuniversität Leoben. Im November 2008 wechselte er als Projektleiter und Betriebsfestigkeitsexperte in den Bereich Tests und Analysen der Industrieanlagen Betriebsgesellschaft mbH. Seit November 2010 ist er Leiter der Abteilung für Festigkeit, Berechnung, Methodenentwicklung der IABG in Ottobrunn.

Dipl.-Ing. (FH) Manfred Hück, geboren 1939, studierte Allgemeinen Maschinenbau am Polytechnikum in Regensburg. Seit 1966 war er bei VFW-Fokker im Bereich der Schwingungstechnik tätig und wechselte 1972 zur Industrieanlagen Betriebsgesellschaft mbH in Ottobrunn in den Bereich Betriebsfestigkeit. Seit 2003 ist er im heutigen Bereich Tests und Analysen der IABG in der Abteilung für Betriebsfestigkeit als freiberuflicher Berater tätig.

Dipl.-Ing. Matthias Decker, geboren 1970, studierte Maschinenbau an der Technischen Universität München. Von 1995 bis 2002 arbeitete er für MAN Nutzfahrzeuge AG, wo er sich mit der Messung und Auswertung von Straßenlasten sowie mit der Ableitung und Optimierung von Versuchsprogrammen für Betriebsfestigkeits- und Vibrationsprüfungen beschäftigte. 2003 wechselte er als Abteilungsleiter für Betriebsfestigkeit, Funktionsversuche, Prüfstände zur Industrieanlagen Betriebsgesellschaft mbH in Ottobrunn. Seit 2007 ist er als Ressortleiter Versuche Automotive verantwortlich für die mechanische Prüfung, Materialcharakterisierung und Komponententests unter Umwelteinflüssen. Als Leiter Festigkeit, Funktion, Werkstoffe verantwortet er seit 2010 zusätzlich die Berechnung und Methodenentwicklung der IABG im Geschäftsbereich Tests und Analysen.

You will find the article and additional material by entering the document number MP110250 on our website at www.materialstesting.de