

Lebensdauer von Konstruktionsstählen bei einer zufälligen Ermüdungsbeanspruchung

J. Kermes, J. Vojtišek

Einleitung

Die Verbesserung der Parameter von Maschineneinrichtungen und die Herabsetzung deren Masse erfordert die vollkommene Ausnutzung der Eigenschaften von Konstruktionsmaterialien. Dazu ist das Studium der Eigenschaften und des Verhaltens von Konstruktionsmaterialien unter Betriebsbedingungen, also bei Einwirkung einer ganzen Reihe von Faktoren erforderlich. Es ist möglich zu sagen, daß die Lebensdauer eine integrierte Reaktion der Maschinenkomponente auf die Kombination von Belastungs-, Material- und Technologieparametern darstellt.

Experimentelle Bedingungen

Zu den eigentlichen experimentellen Arbeiten wurden zwei Stähle, weiter bezeichnet als A und B verwendet. Nach der entsprechenden Wärmebehandlung hatte der A-Stahl ein ferritisch-perlitisches Gefüge (Streckgrenze 420 MPa, Festigkeit 630 MPa) und der B-Stahl ein sorbitisches Gefüge (Streckgrenze 821 MPa, Festigkeit 928 MPa). So war es möglich, die Reaktion von zwei Stählen mit wesentlich unterschiedlichen mechanischen Werten und Gefügen auf eine zufällige Belastungsart zu verfolgen. Die Ermüdungsversuche für harmonische und zufällige Zug-Druck-Belastung wurden mit sinusförmigem Schwingpielverlauf bei Raumtemperatur durchgeführt. Die Frequenz der harmonischen Belastung betrug 15 Hz. Für die zufällige Belastung wurden zwei Varianten gewählt, deren Definitionen und Charakteristiken im nächsten Kapitel angeführt werden. Der zufällige Belastungsprozeß, bei dem die Verteilung, Größe und Frequenz von Belastungskräften gesteuert wurden, hatte zwei Varianten mit gemeinsamen grundlegenden Charakteristiken, nach denen der Prozeß in beiden Fällen als ein stationärer ergodischer zufälliger Prozeß mit einer normalen Verteilung der Spannungsamplituden definiert werden kann. Die Belastungssequenzen der ersten Variante (Bezeichnung V 1) wurden mittels eines Rauschgenerators erzeugt. Der angeführte generierte zufällige Prozeß kann als ein einseitig frequenz-begrenztes weißes Rauschen bezeichnet werden, das bei den angeführten gegebenen Parametern die obere Begrenzungsfrequenz $f_0 = 15$ Hz aufweist. Die ermittelte Schwingpielanzahl in einer Sequenz beträgt 820. Die zweite Variante des zufälligen Belastungsprozesses (Bezeichnung V 2) wurde mittels eines Rechners bei Eingabe der Extremwerte für 820 Schwingspiele in einer Sequenz generiert, die in 15 Klassenintervalle eingeteilt wurde. Im

ganzen Sequenzbereich wurde die Frequenz von 15 Hz vorgegeben.

Einer der Faktoren, bei dem auch vorausgesetzt werden könnte, daß er den Grenzzustand von Konstruktionswerkstoffen, eventuell die Lebensdauer der Maschinenteile beeinflussen kann, ist der Regellosigkeitskoeffizient des zufälligen Prozesses. Für die angeführten zufälligen Belastungsprozesse gilt im ersten Fall (V 1) der Regellosigkeitskoeffizient $i = 0,65$, im zweiten Falle (V 2) $i = 1,0$. Die graphische Aufnahme beider zufälliger Belastungsprozesse ist in Bild 1, im unteren Teil mit dargestellter Zeitbasis, angeführt. Der Korrelationskoeffizient und der Regellosigkeitskoeffizient stellen Größen dar, die sehr gut die zufälligen Prozesse charakterisieren, mit denen die Maschinenbauteile belastet wurden. Für die angeführten zufälligen Belastungsprozesse gilt im ersten Falle (V 1) der Korrelationskoeffizient $r = 0,182$, im zweiten Falle (V 2) $r = 0,07$.

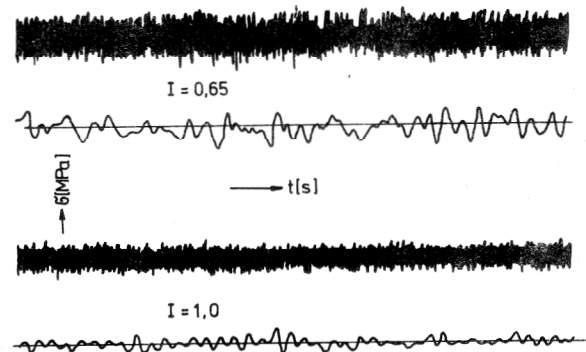


Bild 1
Belastungsprozesse V 1 und V 2 in zeitlichem Ablauf I – Regellosigkeitskoeffizient

Prinzipiell können zwei Methoden angegeben werden, die zur Lebensdauerberechnung von Maschinenbauteilen mit stochastischer Belastung geeignet sind. Es handelt sich erstens um eine Methode, die mit einem reduzierten Belastungsspektrum arbeitet. Die Lebensdauer wird erst nach Anhäufung der Ermüdungsschädigung berechnet, nachdem durch Diskreditieren des zufälligen Prozesses dieser durch einen Block harmonischer Belastungsamplituden ersetzt wurde. Die zweite Methode arbeitet mit stochastischen Charakteristiken des zufälligen Belastungsprozesses. Bei der ersten Methode kann als Vertreter die heute bereits klassische Palmgren-Miner- sowie Corten-Dolan-Methode, bei der zweiten die Rajcher-Methode [1], [2] genannt werden.

Experimentelle Ergebnisse

Zur Lebensdauerberechnung ist es nötig, zuerst den Belastungsverlauf zu bearbeiten, damit es möglich ist, charakteristische Größen zu bestimmen, die den zufälligen Prozess definieren und weiter bei der eigentlichen Lebensdauerberechnung oder Simulation der zufälligen Belastung unter Laborbedingungen ausgenutzt werden können. Die grundlegenden Angaben zur Lebensdauerberechnung beinhaltet dann die Lebensdauerlinie sowie deren Konstanten, die bei harmonischer Belastungsart festgelegt wurden. Um die eigentlichen bei zufälliger Belastungsart gewonnenen experimentellen Ergebnisse mit einer hypothetischen auf obige Art und Weise ermittelte Lebensdauer bei verschiedener Kombination von Festigkeitshypothesen und Methoden der Bearbeitung von Belastungsspektren des zufälligen Prozesses vergleichen zu können, wurden folgende bekannteste Hypothesen und Methoden ausgewählt:

Hypothese:	Methode:
Palmgren-Miner	relative Spitzenwerte
Corten-Dolan	absolute Spitzenwerte
Serensen-Kogajew	relative Schwingbreite
Rajcher	paarweise Schwingbreite (Rain flow)
SVUM	
Sedlacek	

Dadurch sind 30 mögliche Varianten und die gleiche Anzahl von hypothetischen Lebensdauerlinien entstanden. Die Bearbeitung einer solchen Datenmenge erforderte die Erstellung eines eigenen Rechnerprogrammes [3].

Bereits die Bearbeitung der ersten experimentellen Ergebnisse und deren Vergleich mit den erwähnten hypothetischen Lebensdauerlinien zeigte, daß die Lebensdauer durch eine Reihe von Faktoren, deren Wirkung in den Festigkeitshypothesen nicht berücksichtigt ist [2], beeinflusst wird. Ähnlich wie bei harmonischer Belastungsart, wo die Ermüdungsfestigkeit durch Werkstoffaktoren beeinflusst wird, kann erwartet werden, daß auch bei stochastischer Belastung die Reaktion des Werkstoffes auf diese Belastungsart von diesen Faktoren abhängig sein wird. In den Bildern 2 und 3 sind die im Ver-

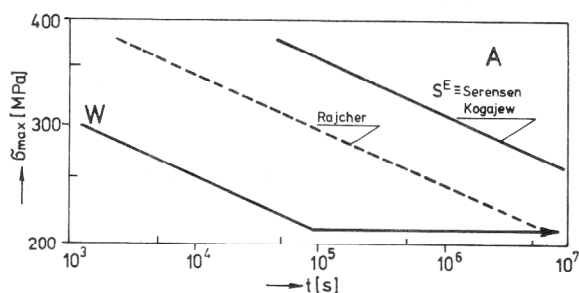


Bild 2
Lebensdauerlinien des Stahls A
W – Wöhler-Linie; S^E – experimentelle Linie; theoretische Linien nach Rajcher und Serensen – Kogajew

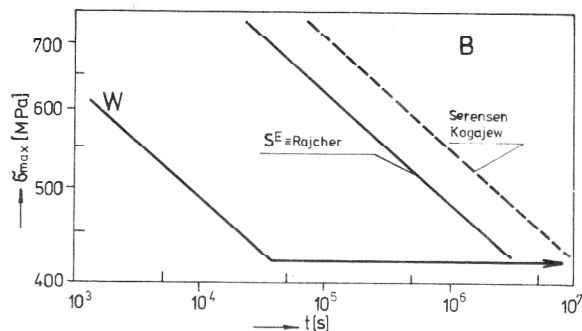


Bild 3
Lebensdauerlinien des Stahls B
W – Wöhler-Linie; S^E – experimentelle Linie; theoretische Linien nach Rajcher und Serensen – Kogajew

lauf der harmonischen (W) und zufälligen Beanspruchung (S^E) vom Typ VI der Stähle A und B ermittelten Lebensdauerlinien angeführt. Die in diesen Bildern dargestellten Lebensdauerlinien wurden anhand der Regressionsanalyse ermittelt. Die experimentellen Ergebnisse werden hier in Abhängigkeit der Spannung von der Zeit bis zum Bruch im doppelt-logarithmischen Koordinatensystem ausgedrückt. Bei zufälligem Belastungsprozess handelt es sich um die maximale Spannung, die in der Belastungssequenz vorkommt. Die Ergebnisse zeigen, daß bei beiden Stählen mit bedeutend unterschiedlichem Gefüge und mechanischen Eigenschaften die Steigung der Lebensdauerlinien der harmonischen und zufälligen Belastungsart unverändert bleibt. Der Unterschied zwischen der Verschiebung der Lebensdauerlinie der zufälligen Belastungsart und der Linie der harmonischen Belastungsart der Stähle A und B ist jedoch größer. Während beim A-Stahl die Lebensdauer bei der zufälligen Belastungsart um drei Ordnungen höher ist als bei harmonischer Belastung, beträgt sie beim B-Stahl nur zwei Ordnungen. Der Unterschied einer Ordnung in der Verschiebung der Lebensdauerlinie deutet eine unterschiedliche Reaktion der Stähle verschiedener Gefüge und eventuell mechanischer Eigenschaften auf die zufällige Belastungsart an. Daraus ergibt sich wahrscheinlich auch die Tatsache, daß eine bestimmte bei der Lebensdauerberechnung angewendete Festigkeitshypothese für verschiedene Stahlgattungen gültig ist und bei anderen [4] versagt. Als Beispiel werden experimentelle Ergebnisse und deren Vergleich mit einer hypothetischen Lebensdauerlinie bei Verwendung der geeignetsten Festigkeitshypothese für den gegebenen Fall angeführt. Im ersten Falle handelt es sich um die Serensen-Kogajew-Hypothese, die sich mit der Bearbeitung des Belastungsspektrums anhand der Methode paarweise Schwingbreite mit nicht angenommener Mittelspannung sowie mit der Null-Unempfindlichkeitsschwelle befaßt. Für den A-Stahl und die angeführte Lebensdauerberechnung sind die experimentellen (S^E) und theoretischen Lebensdauerlinien praktisch identisch (Bild 2). Für den B-Stahl (Bild 3), scheint die Rajcher-Hypothese mit der Bearbeitung des Belastungsverlaufs anhand der Rain-flow-Methode die geeignetste zu sein. Rajcher führt die Lebensdauerberechnung nach der Gleichung (1) durch:

$$T = \frac{A}{L(m) \left[\int_f G(f) \cdot f^{2/m} \cdot df \right]^{m/2}} \quad (1)$$

wobei $G(f)$ die Leistungsspektraldichte darstellt und die Werkstoffeigenschaften durch die Konstanten A und m der Wöhler-Linie vertreten werden. Die experimentellen (S^E) und theoretischen Lebensdauerlinien sind auch hier identisch. Beim A-Stahl führt diese Berechnungsart zu Ergebnissen, die auf der sicheren Seite mit Rücksicht auf experimentelle Werte liegen, wobei der Unterschied in der Lebensdauer eine Ordnung darstellt. Die Serensen-Kogajew-Hypothese ergibt beim B-Stahl eine Lebensdauer, die gegenüber den experimentellen Werten auf der unsicheren Seite liegt, und zwar etwa um eine halbe Ordnung. Es muß betont werden, daß es sich hier um keine Extreme handelt, die bei Kombination von bereits veröffentlichten Festigkeitshypothesen und Methoden der Bearbeitung von Belastungsspektren gewonnen wurden. Außerdem verliefen die experimentellen Arbeiten im Vergleich zu realen Maschinenteilen unter idealisierten Bedingungen, d. h. ohne Berücksichtigung des Einflusses einer Reihe von Faktoren, die unter Betriebsbedingungen vorkommen.

Die in der Literatur veröffentlichten Ergebnisse der experimentellen Arbeiten bestätigen jedoch den Einfluß des Regellosigkeitskoeffizienten bei zufälligem Belastungsprozeß auf die Lebensdauer von Konstruktionswerkstoffen nicht eindeutig [5], [6]. Gafner [5] verfolgte den Einfluß dieses Faktors während der zufälligen Belastung mit Regellosigkeitskoeffizienten von 0,3 bis 0,99. Die Probestäbe mit einer Formzahl $\alpha = 3,6$ wurden aus einer AlCuMg-Legierung gefertigt. In Bild 4 unten sind die Ergebnisse dieses Autors angeführt, aus denen ersichtlich ist, daß der Regellosigkeitskoeffizient des zufälligen Prozesses im Bereich 0,99 bis 0,7 die Lebensdauer nicht beeinflusst und daß eventuell alle Ergebnisse im Bereich der 80 % Zuverlässigkeit liegen. Die Absenkung des Regellosigkeitskoeffizienten auf den Wert 0,3 setzt die Lebensdauer nur an die untere Grenze des an-

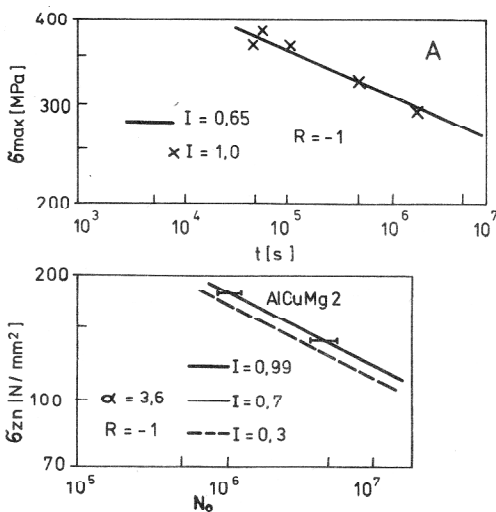


Bild 4
Einfluß des Regellosigkeitskoeffizienten auf die Lebensdauer Stahl A und Legierung AlCuMg2 [5]

geführten Zuverlässigkeitsbereiches herab. Die eigenen experimentellen Daten bestätigen diese Schlussfolgerungen auch für Stähle, in diesem Falle für den A-Werkstoff, siehe Bild 4 oben. Es kann festgestellt werden, daß die Reaktion des Werkstoffes auf die Änderung des Regellosigkeitskoeffizienten nicht besonders bedeutsam ist und mit Herabsetzung seiner Größe die Lebensdauer nur wenig sinkt. Es muß noch betont werden, daß es sich bei dem Regellosigkeitskoeffizienten $i = 0,65$ um den zufälligen Prozeß vom Typ V 1, beim Regellosigkeitskoeffizienten $i = 1,0$ um Typ V 2 handelte, so daß auch der unterschiedliche Charakter der Autokorrelationsfunktion sowie der Leistungsspektraldichte hier keine bedeutende Rolle spielt. Es scheint, daß in diesem Falle die Größe der maximalen Spannung im Belastungsspektrum die dominante Rolle spielt. Dieser Frage muß auch weiterhin Aufmerksamkeit gewidmet und umfangreiches experimentelles Material zur Bestätigung dieser Tatsache gesammelt werden. Größere Unterschiede in der Lebensdauer der durch den zufälligen Belastungsprozeß mit unterschiedlichem Regellosigkeitskoeffizienten beanspruchten Stähle führt Pfeiffer [6] an.

Aus dem Ausdruck (2) ergibt sich, daß die Änderung $G = s^2/f_0$ (2)

der Leistungsspektraldichte durch die Änderung des quadratischen Mittelwertes s^2 bei einer Begrenzungsfrequenz f_0 gegeben ist. Dies gilt für den Fall des einseitig begrenzten, weißen Rauschens, also für den zufälligen Belastungsprozeß V 1. Das betrifft die bereits dargestellten Lebensdauerlinien, die durch die Änderung der mittleren Abweichung des zufälligen Prozesses mit der oberen Begrenzungsfrequenz $f_0 = 15$ Hz gewonnen wurden. Im zweiten Fall kann die Größe der Leistungsspektraldichte durch die obere Begrenzungsfrequenz f_0 bei Einhaltung der mittleren Abweichung und dadurch auch die Größe der Spannungsamplituden in der Belastungssequenz geändert werden. Der Einfluß der Änderung der oberen Begrenzungsfrequenz auf die Lebensdauer kann als adäquat zur Änderung der Frequenz bei harmonischer Belastung bezeichnet werden. Zur Beobachtung der Einwirkung dieses Faktors wurden außer der bereits erwähnten Frequenz $f_{01} = 15$ Hz für den zufälligen Belastungsprozeß V 1 auch Frequenzen $f_{02} = 5$ Hz und $f_{03} = 1,5$ Hz verwendet. Für diese Etappe der experimentellen Arbeiten wurde der B-Stahl gewählt, weil dessen Lebensdauerlinie S^E (Bild 3) bei harmonischer Belastungsart sehr gut mit der theoretischen nach der Rajcher-Hypothese berechneten Lebensdauerlinie übereinstimmt. Dadurch kann der Einfluß der Änderung der oberen Begrenzungsfrequenz auf die Lage der experimentell ermittelten Lebensdauerlinien mit den nach besagter Hypothese theoretisch bestimmten Linien genauer verglichen werden. Die ermittelten experimentellen Daten sind graphisch im Bild 5 dargestellt, wobei W_1 , W_2 und W_3 die Wöhler-Linien sind, die den Frequenzen $f_1 = 15$ Hz, $f_2 = 5$ Hz und $f_3 = 1,5$ Hz entsprechen. Gleiche Indizes haben auch die Lebensdauerlinien S^E , die über die zufällige Belastungsart mit unterschiedlicher oberer Begrenzungsfrequenz ermittelt wurden, d. h. $f_{01} = 15$ Hz, $f_{02} = 5$ Hz, $f_{03} = 1,5$ Hz. Diese Ergebnisse zeigen, daß sich sowohl bei harmonischer, als auch

bei zufälliger Belastungsart die Lebensdauer mit der sinkenden Frequenz verlängert. Es muß jedoch auf die Tatsache aufmerksam gemacht werden, daß diese Feststellung nicht im Widerspruch zu der bekannten Erkenntnis steht, daß die durch die Anzahl der Schwingspiele bis zum Bruch charakterisierte Lebensdauer mit sinkender Frequenz kleiner wird. Das gilt auch in diesem Falle, wenn die Ergebnisse in Abhängigkeit Spannung – Schwingspiele bis zum Bruch, und zwar sowohl bei harmonischer als auch bei zufälliger Belastungsart vom Typ V 1 bearbeitet werden. Wird die Lebensdauer vom B-Stahl für die Frequenzen f_{02} und f_{03} nach Rajcher aus der Beziehung (1) bestimmt, so ist die experimentell ermittelte Lebensdauer niedriger als die theoretische, auch wenn die Übereinstimmung bei der Frequenz f_{01} sehr gut war, d. h. in dem Fall, wenn die A-Konstante aus der bei gleicher Frequenz ($f_w = f_o$) bestimmten Wöhlerlinie ermittelt wurde. Mit dieser Frage werden wir uns noch weiter befassen. Die bei harmonischer Belastung ermittelte Lebensdauerlinie kann bei gegebenem Koordinatensystem analytisch ausgedrückt werden, wobei t_w die Zeit bis zum Bruch und A_w und B Konstanten sind:

$$t_w = A_w \cdot \sigma^{-B} \quad (3)$$

Ähnlicherweise kann bei der zufälligen Belastungsart vorgegangen werden:

$$t^s = A^s \sigma_{\max}^{-B} \quad (4)$$

Die Verschiebung der Lebensdauerlinien (Bild 5) als Folge der Änderung der oberen Begrenzungsfrequenz f_o äußert sich durch die Änderung der Konstante A^s in der Gleichung (4), wobei die Konstante B den Anstieg der Wöhlerlinie ausdrückt. Wie sich das Verhältnis der Konstanten A für die harmonische Beanspruchung mit der Frequenz 15 Hz und die zufällige Belastungsart V 1 und damit auch das Verhältnis der Lebensdauer (Gleichung 3 und 4) mit der Änderung der oberen Begrenzungsfrequenz ändert, ist aus Bild 6 ersichtlich. Die angeführte Abhängigkeit hat im halblogarithmischen Koordinatensystem einen linearen Verlauf,

$$A^s/A_w = \alpha - \beta \lg f_o \quad (5)$$

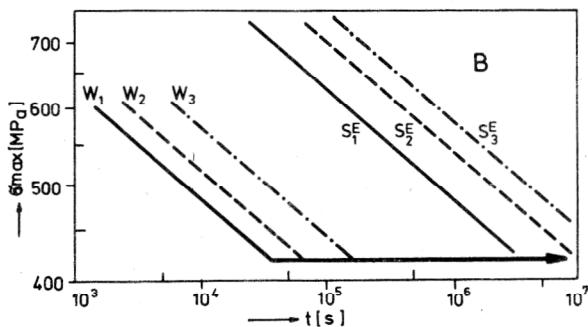


Bild 5
Einfluß der Änderung der oberen Begrenzungsfrequenz des weißen Rauschens auf die Lebensdauer
W – Wöhler-Linien; SE – experimentelle Linien Stahl B

wobei α und β Konstanten sind, die stark vom Material abhängig sind, wie aus dem Verlauf der Geraden der A- und B-Stähle im Bild 6 ersichtlich ist. Wird in die Gleichung (4) A^s aus dem Ausdruck (5) eingesetzt, so wird die Lebensdauer bei zufälliger Belastungsart nach Gleichung (6) berechnet:

$$t^s = \sigma_{\max}^{-B} \cdot A_w (\alpha - \beta \lg f_o) \quad (6)$$

f_o ist die obere Begrenzungsfrequenz. Zur Untersuchung der Ermüdungsrißbildung und des Einflusses einiger Faktoren auf den Mechanismus der Ermüdungsschädigung wird sehr häufig die Abhängigkeit der Wachstumsgeschwindigkeit des Ermüdungsrisse von der Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors verwendet:

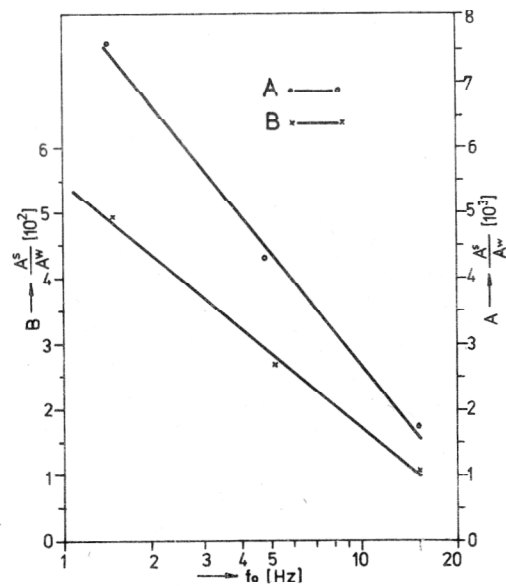


Bild 6

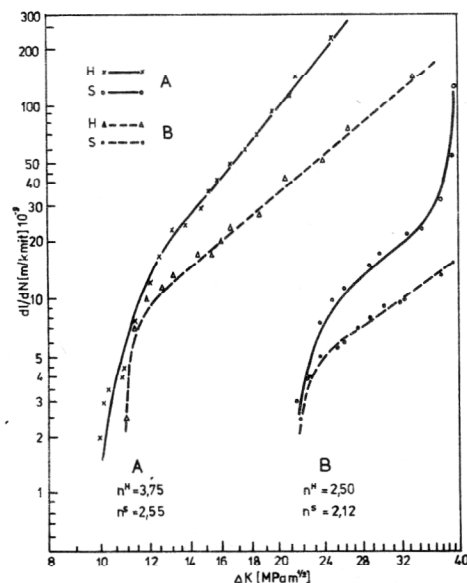


Bild 7

$$dl/dN = M \cdot \Delta K^n \quad (7)$$

Zur Berechnung der Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors wurde folgende Beziehung verwendet:

$$\Delta K = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} F(a/b) \quad (8)$$

Der anfängliche Riß vom Zentraltyp hatte seinen Ursprung in der Rundöffnung eines flachen Stabes. Die Kalibrierfunktion wurde der Literatur entnommen [7]. Bei zufälligem Belastungsprozeß vom Typ V 1 wurde für die Berechnung der Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors der maximale Spannungswert in der Sequenz genommen. Die graphische Bearbeitung der Meßergebnisse ist in Bild 7 angeführt, und zwar in der Abhängigkeit Rißwachstumsgeschwindigkeit von der Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors. Beim A-Stahl ist die Wachstumsgeschwindigkeit des Ermüdungsrisses sowohl bei harmonischer (H) als auch bei zufälliger Belastungsart (S) größer als beim B-Stahl. Der Exponent n in Gleichung (7) ist beim B-Stahl für beide Belastungstypen niedriger. Aus dem Vergleich der Wachstumsgeschwindigkeit des Ermüdungsrisses bei harmonischer und stochastischer Belastung ergibt sich, daß bei stochastischer Belastung die Geschwindigkeit mehrfach niedriger ist. Das gilt für beide Stähle. Diese Tatsache hängt mit der Berechnung für ΔK zusammen, weil ΔK beim zufälligen Prozeß auf die maximale Spannung für eine Sequenz bezogen wird.

Schlußfolgerung

Es wurde folgendes festgestellt:

1. Es besteht ein deutlicher Unterschied zwischen der Verschiebung der Lebensdauerlinie der zufälligen Belastungsart und der Linie der harmonischen Belastungsart von Stählen mit einem ferritisch-perlitischen und einem sorbitischen Gefüge. Beim Stahl mit ferritisch-perlitischem Gefüge ist die Lebensdauer bei der zufälligen Belastungsart um drei Ordnungen höher als bei harmonischer Belastung, beim Stahl mit sorbitischem Gefüge ist sie nur zwei Ordnungen höher. Dieser Unterschied deutet auf eine unterschiedliche Reaktion der Stähle verschiedener Gefüge bei zufälliger Belastung hin.
2. Für den Stahl mit ferritisch-perlitischem Gefüge und mittlerer Festigkeit sind die experimentellen und theoretischen Lebensdauerkurven nach der Serensen-Kogajew-Hypothese zusammen mit der Bearbeitung des Belastungsspektrums anhand der Methode paarweise Schwingbreite praktisch identisch. Für den Stahl mit sorbitischem Gefüge und höherer Festigkeit scheint die Rajcher-Hypothese in Verbindung mit der Bearbeitung des Belastungsverlaufes anhand der Rain-flow-Methode die geeignetste zu sein.
3. Es kann festgestellt werden, daß die Änderung des Regellosigkeitskoeffizienten im Bereich 0,65 bis 1,0 wenig Einfluß auf die Lebensdauer ausübt.

4. Die Ergebnisse zeigen, daß sich sowohl bei harmonischer als auch bei zufälliger Belastungsart die Lebensdauer (Zeit, nicht die Schwingspiele) mit sinkender Frequenz verlängert.
5. Beim Stahl mit ferritisch-perlitischem Gefüge ist die Wachstumsgeschwindigkeit des Ermüdungsrisses bei harmonischer als auch bei zufälliger Belastung größer als beim Stahl mit sorbitischem Gefüge. Die Wachstumsgeschwindigkeit bei stochastischer Belastung ist mehrfach niedriger als bei harmonischer Belastung.

LITERATUR

- [1] Vojtisek, J.: Vypocty a overovani zivotnosti strojnich casti namahanych nahodnym stacionarnim zatizenim. Disertation Plzen 1979. – VSSE.
- [2] Kermes, J.: Vliv materialovych faktorů na unavovou pevnost pri nahodnem zpusobu zatezovani. Strojirenstvi 28, 1978, c. 12.
- [3] Balda, M.: Cislicove zpracovani extremu nahodnych procesu. TIZ, Skoda Plzen, UVZU.
- [4] Vojtisek, J., Kermes, J., Proskovec, J.: Vypocty zivotnosti strojnich casti pomoci linearnich hypotez kumulace unavoveho poskozovani. Strojirenstvi, 30, 1980, c. 3.
- [5] Gassner, E., Lowak, H.: Bedeutung der Unregelmäßigkeit Gausscher Zufallsfolgen für die Betriebsfestigkeit. Z. Werkstofftechn. 1978, c. 7.
- [6] Pfeiffer, F.: Untersuchungen zum Einfluß regelloser Beanspruchungsfolgen auf die Bauteilermüdung. IFL Mitteilungen, 1976, c. 1/2.
- [7] Tada, H.: The stress analysis of cracks handbook del research corporation. Hellertown, Pena 1973.

Anschrift der Verfasser.

Doz. Dr. J. Kermes
Ing. CSc. J. Vojtisek
k.p. Skoda Plzen
UVZU, CSSR