

Begrenzung der Rißschadensakkumulation und Blockierung der Rißausbreitung in Körpern

J. Němec

Einführung

Wir stellen uns die Aufgabe einer aktiven Einflußnahme auf den Konstruktionsprozeß mit dem Ziel der Erhöhung der Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Erzeugnisse. Immer mehr Konstruktionen großer und bedeutender Industriebetriebe weisen eine nur geringe Restlebensdauer auf und immer öfter sehen wir uns vor die Aufgabe gestellt, nicht nur die Möglichkeit einer Weiterverwendung einer Konstruktion bei Ausschließung einer möglichen Havarie zu beurteilen, sondern auch das Funktionieren der Konstruktionen zu verlängern und ihre Betriebsparameter entsprechend dem Bedarf der Gesellschaft zu gestalten.

Die Barrierenbildung gegen Werkstoffbeschädigungen ist von der Art des Schädigungsprozesses und der Größe des betroffenen Volumens abhängig. Wir untersuchen Schädigungen aus Schwingungsbeanspruchungen, wie sie häufig im Maschinenbau und im Bauwesen auftreten. Was die räumliche Ausdehnung des geschädigten Werkstoffgebietes betrifft, so untersuchen wir Mikrovolumen im Korngrößenbereich von 10^{-4} bis 10^{-3} cm, weiterhin kleine Volumina im Bereich von 10^{-3} bis 10^{-1} cm und schließlich auch Makrovolumina im Zentimeterbereich und größer. Der Schädigungsprozeß führt zu natürlichen Barrieren, die sich durch die eigentliche Werkstoffalterung sowie die Bildung und Ausbreitung der Risse bis zum Bruch ergeben. Denkbar sind aber auch künstliche Barrieren, die analoge Eigenschaften wie die natürlichen haben, gegenüber diesen aber eine größere Intensität besitzen und in Abhängigkeit von Werkstoffart, Geometrie, Größe und Funktion des Körpers wirksamer und zielgerichteter sind. Diese Verfahren erwähnen wir deshalb, weil sie künftig Grundlage für die Wirtschaftlichkeit einer Konstruktion, den Havarieschutz und die Entwicklung neuer Werkstoffe sind.

Ermüdungsschädigungen lassen sich formal durch den Schädigungsgrad D in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl N bzw. der tatsächlichen Grenzbetriebsdauer t (Bild 1) ausdrücken. Kurve a entspricht der Rißbildung und -ausbreitung und beschreibt einen lokalisierten Prozeß in der Umgebung der Rißfront; Kurve b entspricht der Betriebsalterung (Degradation), die durch eine Energiedissipation beim Entstehen neuer freier Flächen im Körper oder durch Verminderung der kritischen Rißlänge und durch eine Verschiebung der Übergangstemperatur beim Bruch gekennzeichnet ist. Die Schädigung kann man je nach Art des Körpers und angewandter Meßmethode ausdrücken. Zum Beispiel läßt sich die Schädigung durch die relative Rißlänge $l/(l_{KR})_0$ oder durch die relative plastische Grenzdeformation, welche zur Schädigung des betroffenen Körpervolumens führt,

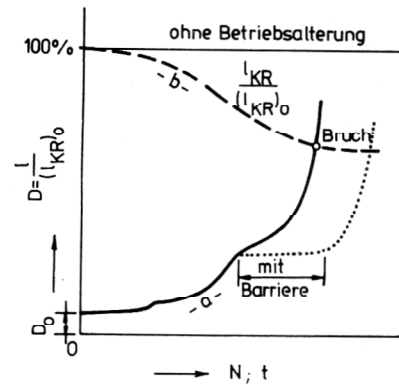


Bild 1
 Schematische Darstellung des Schädigungsprozesses durch Ermüdung in Körpern

definieren. Der entscheidende Parameter ist hierbei die

Geschwindigkeit der Schadensakkumulation $v_D = \frac{dD}{dN}$
 bzw. $\frac{dD}{dt}$. Dieser Parameter läßt sich z. B. durch die Än-

derung der Häufigkeit und Intensität der Emission eines akustischen Signals oder, im Falle eines Makrovolumens, direkt durch die Rißausbreitungsgeschwindigkeit bestimmen. Die Bildung natürlicher Barrieren ist von der Geschwindigkeit der Schadensakkumulation abhängig:

$$\frac{dB}{dt} = f(v_D) \quad (1)$$

Hieraus folgt, daß die Barrierenbildung an der Front des Ermüdungsrisse anders erfolgt als im Prozeß der Volumendegradation, z. B. durch Strukturalterung, Strahlungs- oder Korrosionsspannungsschädigung usw.

Barrieren gegen Mikrorissentstehung

Im Bereich der Mikrovolumina ist es vor allem notwendig, die *Oberflächenschichten* der Körper im Auge zu behalten. Der Grund hierfür ist der, daß aus der Sicht der Ermüdungsrißentstehung die Oberflächenschicht am wenigsten widerstandsfähig ist, da sie am stärksten technologischen und funktionellen Einflüssen (z. B. Reibung, Abnutzung, Erosion, Oberflächenkorrosion usw.) und der Einwirkung der aggressiven Umgebung unterliegt. In der Oberflächenschicht wirken normalerweise unter realen Bedingungen die höchsten Spannungen, die durch die betriebliche Belastung des Körpers entstehen. Hier treten die größten Spannungskonzentrationen, die durch konstruktiv und technologisch bedingte Kerben hervorgerufen werden, auf. Die Oberflächenschicht eines Werkstoffes hat in der Regel die geringste Beständigkeit

gegenüber plastischen Deformationen und sie zeigt den höchsten Grad einer ungünstigen Lokalisation plastischer Deformationen. Bei Metallen entstehen hier zuerst die plastischen Zonen, bei Polymeren entwickeln sich Kräuselungen.

Dem Entstehen von *Mikrorissen* gehen lokale plastische Deformationen voraus. Sie zeigen sich in dem Augenblick, wenn die geschädigte Zone eine kritische Größe erreicht, die bei einem gegebenen Spannungsniveau durch die Werkstoffart und den Zustand der Oberflächenschicht des Körpers bestimmt ist. Die plastische Deformation allein führt noch nicht zur kritischen Schädigung, wenn die räumliche Ausdehnung des geschädigten Gebietes nicht genügend groß und die Störungsdichte in der Werkstoffstruktur gering ist. Risse treten erst beim Erreichen einer kritischen Länge des geschädigten Gebietes und einer kritischen zyklischen Schädigung auf. Die kritische Länge beträgt etwa 10^{-4} cm. *Zyklische Schädigungen* werden durch lokale plastische Wechseldeformationen, auf die der Werkstoff mit einer zyklischen Verfestigung reagiert, hervorgerufen. Diese Verfestigung ist der grundlegende Schutz gegen Schädigungen in dieser Prozeßphase. Durch sie wird die Breite der Hysteresisschleife kleiner und der Energieanteil, der auf den betroffenen Werkstoffbereich entfällt, wird ebenfalls kleiner. Deshalb nimmt die Widerstandsfähigkeit gegen das Entstehen von Mikrorissen zu, je größer der Exponent der zyklischen Verfestigung ist.

Es kann aber geschehen, daß das betroffene Volumen nicht genügend homogen und mit Einschlüssen, die nicht plastisch deformierbar sind, durchsetzt ist. Dann kommt es auf Grund des höheren plastischen Umformgrades des Grundmaterials zur Abtrennung vom Einschlus und es entsteht ein Anfangsriß von Einschlusgröße. In diesem Fall ist die Kohäsionsfestigkeit an der Grenze beider Werkstoffkomponenten entscheidend, d. h. prozeßbestimmend sind die lokale zyklische Festigkeit und zyklische Zähigkeit des Grundmaterials.

Unter realen Bedingungen reagiert ein Werkstoff in der Regel so, daß Dislokationen an Deformationsbarrieren angehäuft werden und der Werkstoff sich zyklisch verfestigt. Andererseits wirkt ein zweiter Prozeß mit Hohlraum- und Porenbildung (Relaxationszentren), der das lokale Spannungsniveau herabsetzt. In allen diesen Fällen kann man nicht von einzelnen Dislokationen oder Hohlräumen sprechen, sondern von einem Prozeß des Erreichens einer kritischen Dichte dieser Störungen und von deren kritischer Konfiguration. Deshalb ist die Rißentstehung an mesoskopische Erscheinungen gebunden und alle bisherigen Theorien über Einzelstörungen können die Rißentstehung unter realen Bedingungen in Konstruktionswerkstoffen nicht erklären.

In allen Fällen ist die Entstehung der Anfangsrisse durch eine komplizierte Funktion, die folgende Hauptparameter enthält, gegeben:

$$N_0 = f(n^*, \sigma^*, \epsilon_p^*, \frac{q}{s}, \dots) \quad (2)$$

mit

n^* – Exponent der zyklischen Verfestigung des Grundwerkstoffes,

- σ^* – zyklische Festigkeit,
- ϵ_p^* – zyklische Zähigkeit,
- q – Korn- oder Strukturgröße der Werkstoffkomponenten,
- s – Dicke der Oberflächenschicht

Die Dicke der Oberflächenschicht ist außer durch die technologischen Parameter auch durch den kritischen Bereich der Schädigungszone definiert. Die Oberflächenschicht beinhaltet in der Regel eine große Anzahl von korngroßen Strukturelementen oder anderen Bauelementen des Werkstoffes. In dieser Schicht entsteht (vor allem an den Stellen technologisch und konstruktiv bedingter Kerben) nach Erreichen der kritischen Schädigung ein ganzes Netz von Mikrorissen, die sich in der nächsten Phase untereinander verbinden und einen Riß bilden, der in der Lage ist, weiterzuwachsen. Diese Erscheinung hat statistischen Charakter und ist vom Zustand der Oberflächenschicht und vom Einfluß der äußeren Umgebung abhängig. Die Natur hat uns gelehrt, daß der erste wichtigste Schutz gegen Rißentstehung die Korngrenzbarrieren sind und daß es unter normalen Bedingungen, bei denen Diffusionsprozesse keine große Rolle spielen, notwendig ist, kleine Korngrößen anzustreben. Das gleiche gilt für die Größe der Strukturkomponenten. Ein guter Strukturzustand eines Werkstoffes ist also der entscheidende Schutz gegen das Entstehen von Rissen. Später allerdings durchdringen die exponierten Zonen die Korngrenze und der Prozeß der Ermüdungsschädigung innerhalb des Korngrößenbereiches geht zu Ende. In dieser Prozeßphase ist die Ermüdungseigenschaft entscheidend, da zyklische Schädigungen Strukturbarrieren umgehen können. Als erster Schutz muß dann im betroffenen Gebiet eine genügend hohe Verfestigung durch Deformation erzeugt werden, die die gespeicherte Energie im geschädigten Gebiet senkt. In der Phase des Zusammenwachsens der Mikrorisse ist vor allem eine genügend hohe Plastizität des Werkstoffes von Bedeutung. Deshalb muß eine einseitige Erhöhung der Werkstoffhärte auf Kosten der Zähigkeit nicht zum Erfolg führen. Der Aufbau einer künstlichen Barriere in dieser Schädigungsphase stützt sich auf drei Grundgedanken:

- a) metallurgische Vollkommenheit des Werkstoffes und möglichst geringe technologische Schädigung der Oberflächenschicht;
- b) künstliche Verfestigung der Werkstoffoberflächenschicht (Polierwalzen, Kugelpolieren, Härten). Dabei ist eine einmalige Kaltdeformation effektiv, weil sie die während der zyklischen Beanspruchung in der Oberflächenschicht absorbierte Energie senkt.
- c) Aufbau einer Druckvorspannung in der Oberflächenschicht des Werkstoffes, die das Niveau der Schwingbreite der Druckspannung senkt, wodurch eine weitere Werkstoffschädigung und eine Verbindung der Mikrorisse verhindert wird.

Barrieren gegen Ausbreitung kleiner Risse

Hat sich ein Riß in der Größenordnung von 10^{-3} bis 10^{-2} cm gebildet, der in der Lage ist weiterzuwachsen, so ist sein Wachsen ein komplizierter Prozeß der Ermüdungsschädigung.

Betrachten wir die *kleinen Risse* näher. Während ihrer Entwicklung tritt eine Reihe von Effekten auf:

- Der Riß durchstößt die dünne Oberflächenschicht und die anfängliche Spannungskonzentration um den Defekt ändert sich;
- Es vollzieht sich eine Änderung des Charakters der lokalen Deformation;
- Schrittweise sinkt das Verhältnis zwischen der charakteristischen Länge der lokalen plastischen Schädigungszone und der Riflnge.

Bild 2 zeigt die Geschwindigkeitsänderung der Rißausbreitung in Abhängigkeit von der Zahl der Beanspruchungswechsel. Die Riausbreitungsgeschwindigkeit fllt zunächst in dem Maße ab, wie sich die Wurzel des Ermüdungsrisse von der Ausgangskerbe oder dem Einschluf entfernt. Je spitzer die Ausgangskerbe ist, um so größer ist der Gradient des Spannungsspitzenabfalls und um so intensiver erfolgt die Weiterentwicklung des Risses, um den sich noch keine wirkungsvolle Konzentration plastischer Deformationen herausbildet. Die Barrieren besitzen geometrischen Charakter. Um den Defekt wirkt ein Feld lokaler Spannungen, das zum Entstehen von Mikrorissen führt. Gleichzeitig ändert sich die örtliche Wechseldeformation, da sich ein schmaler Ermüdungsriß unter Druckeinwirkung schließt; die Riufer legen sich aufeinander und übertragen Kräfte.

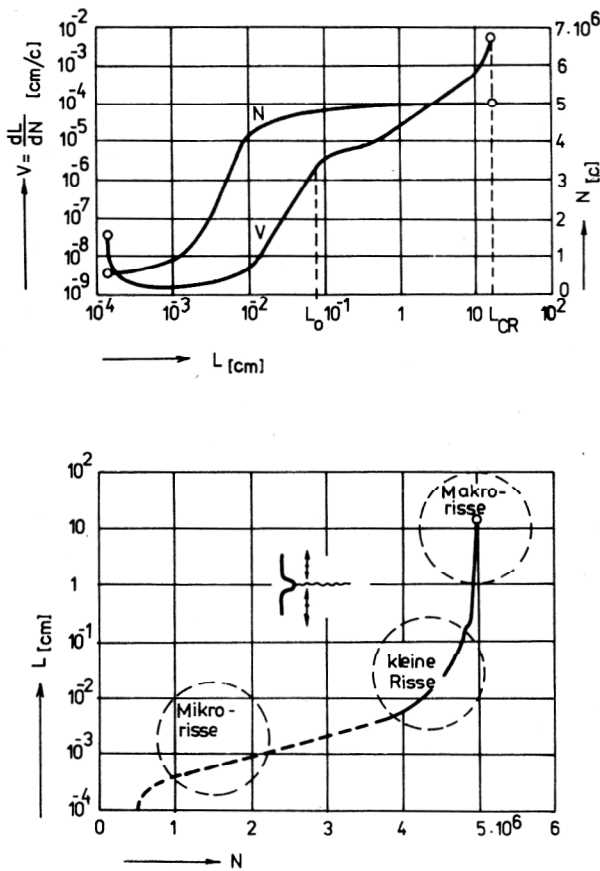


Bild 2
Entstehung kleiner Risse

Bild 3 zeigt die Änderungen im Deformationszyklus. Aus ihnen resultiert eine Senkung der zur Deformationsschdigung führenden Amplitude. Auf die geometrischen Barrieren haben vor allem die Körperform und der Zustand der Herstellungsdefekte Einfluß. Deshalb sollte eine grundsätzliche Aufgabe des Konstrukteurs darin bestehen, eine geeignete Form des Bauteils zu entwickeln. Die Phase der Ausbreitung kleiner Risse hat normalerweise einen bedeutenden Anteil an der Lebensdauer des Bauteils. Da die Risse im Verhältnis zur Abmessung des plastifizierten Bereiches klein sind und der gesamte Schdigungspro stark nichtlinear ist, kann die lineare Bruchmechanik hier keine Anwendung finden.

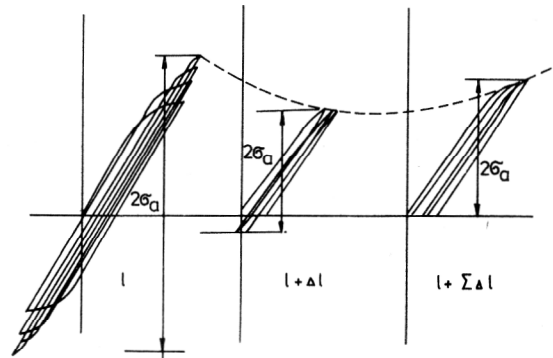


Bild 3
Änderungen des Deformationszyklus an der Rifront im Anfangsstadium der Rientwicklung

Sobald sich die Rißwurzel von der Entstehungsstelle um eine Größe entfernt, die gleich dem Krümmungsradius der konstruktiv oder technologisch bedingten Kerbwurzel ist, hat die Ausgangsstelle keinen wesentlichen Einfluß mehr auf die weitere Rientwicklung. Der Riß wird von der Schdigungsstufe an seiner Front beeinflusst, an der es auch nach der Bruchmechanik zur Herausbildung einer plastischen Zone kommt. Kurz gesagt: es kommt schrittweise zu einer „brüchigen“ Beschaffenheit der Riumgebung aus makroskopischer Sicht. Die Riausbreitungsgeschwindigkeit wächst dann wieder und ihre weitere Entwicklung hängt von der Art des Materials ab.

Im allgemeinen sind zwei Grenzfälle möglich. Im normalen ersten Fall kommt es zum Oberflächenwachstum des Risses mit einer zyklischen Abstumpfung seiner Wurzel. Der Riß breitet sich sprungartig aus und die Ausbreitungspausen sind durch Abstumpfung seiner Front infolge plastischer Deformation gekennzeichnet. Es entwickelt sich in der Regel ein magistraler Riß mit geringer Wechselwirkung mit den übrigen Werkstoffdefekten und niedriger Energiestreuung in die Umgebung. Der zweite Ausbreitungstyp ist von krebsartigem Charakter. Der Riß springt an einer schwächeren Übergangsstelle zu einem anderen Riß über. In seiner Umgebung entsteht eine Reihe von sekundären Nebenrissen und im allgemeinen eine starke Rißverzweigung. Dieser Ausbreitungstyp ist charakteristisch für stark inhomogene und brüchige Werkstoffe. Möglich ist auch der Übergang von einem Ausbreitungstyp zum anderen entsprechend dem Niveau

des Spannungsintensitätskoeffizienten, welches durch die Belastung und den Umgebungseinfluß bestimmt ist. Je stärker das Material zyklisch gealtert ist und je größer der Korrosionseffekt unter Einfluß der Umgebungsspannung ist, um so öfter kann man einen Übergang vom Plastizitäts- zum Zersetzungstyp (desintegralen Typ) der Ermüdungsrißausbreitung erwarten.

Barrieren gegen Makrorißentwicklung

Wir betrachten die Makrorißentwicklung in der Größenordnung von Zentimetern. Je nach dem Charakter der Ausbreitung bilden sich Barrieren gegen die Rißausbreitung. Beim gewöhnlichen Ausbreitungstyp eines einzigen zentralen Risses über dem Körperquerschnitt mit schrittweisen Abstumpfung der Rißwurzel und nach den Vorstellungen der Bruchmechanik existiert eine ausgedehnte Barriere infolge von Druckspannungen, die die geschädigte Zone an der Rißspitze abschließt. Experimentell wurde folgende Beziehung für diese Rißausbreitungsart bestätigt:

$$v = \frac{dl}{dN} = C_1 C_2 (K_a^\lambda - K_o^\lambda) \quad (3)$$

wobei C_1 vom Werkstofftyp, von der Temperatur und der Beanspruchungsart und C_2 von der Geometrie und der Größe des Körpers abhängen. Die Schädigungsamplitude des Spannungsintensitätskoeffizienten ist mit K_a bezeichnet, während die Barriere durch den Schwellwert des Spannungsintensitätskoeffizienten K_o ausgedrückt wird. Der Exponent λ ist von der Temperatur und der Werkstoffstruktur abhängig. Für unsere Überlegungen ist der Schwellwert des Spannungsintensitätskoeffizienten K_o sehr wichtig. Dieser kann auf Grundlage von Überlegungen über die entscheidende Bedeutung der hervorgerufenen Spannungen in folgender Form dargestellt werden

$$K_o = K_o^* \left(\frac{K_a}{K_o^*} \right)^\alpha \quad (4)$$

wobei K_o^* ein vom Werkstofftyp abhängiger Grundfaktor ist. Der Exponent α liegt bei Stählen im Bereich zwischen 0,5 und 0,7.

Diese Formulierung zeigt folgendes. Je höher die Schädigungsbelastung durch äußere Kräfte ist, um so größer ist auch die Druckspannung, die durch den Prozeß vor dem Riß hervorgerufen wird. Darauf beruht auch eine Möglichkeit des Rißausbreitungsstops durch eine einmalige Vorbelastung, die zwar keinen merklichen Beitrag zum Schädigungsprozeß liefert, aber ein intensives Druckspannungsfeld erster Art vor der Rißspitze hervorruft. Die plastische Zone an der Rißspitze setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Zum einen aus einer kleinen inhärenten Zone am Rißwurzelende, die mit Poren und Rissen der vorhergegangenen Ermüdungsschädigung durchzogen ist. Diese Unterzone ist von einer durch plastische Deformation verfestigten und von dem elastischen äußeren Werkstoff zusammengedrückte Zone niedrigen Schädigungsgrades umgeben. Künstliche Barrieren können wir dadurch schaffen, daß wir diese Zone vergrößern und ihre Druckspannung erhöhen. Je höher

die einmalige Vorbelastung liegt, um so höher steigt die Fließgrenze des Werkstoffes an und um so wirkungsvoller wird die Barriere. Es handelt sich um typische Prozesse der Rißverriegelung durch Vorbelastung wie z. B. bei der Überdruckbelastungsprobe von Druckgefäßen oder der Selbstverfestigung (autofretage) von Rotoren. Durch Glühen des Körpers können diese Barrieren beseitigt werden. Außer den Belastungsspannungen erster Art (im Makrovolumen) können sich auch konzentrierte Druckspannungen zweiter Art, die an Stellen erhöhter Werkstoffhärte infolge technologischen Einflusses auftreten, günstig auswirken. Auch eine lokale Erwärmung vor der Rißwurzel mit nachfolgender starker Abkühlung kann eine ausreichende Spannungsbarriere im Körper hervorrufen.

Im Fall des Zersetzungstypes der Makrorißausbreitung ist die plastische Zone an der Rißspitze klein und die technologische Eigenspannung kann hinreichend wirksam sein. Es kommt hierbei zu einer Rißverzweigung und zur Bildung einer energieabsorbierenden Barriere aus der Gesamtfläche aller Sekundärrisse. Je größer die Anzahl der Rißverzweigungen ist, um so niedriger ist ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit über den Querschnitt. Die Bruchdynamik lehrt uns, daß es bei jeder Rißverzweigung zu einem Absinken der Geschwindigkeit und zum Absorbieren eines hohen Energieanteils kommt (vgl. Bild 4).

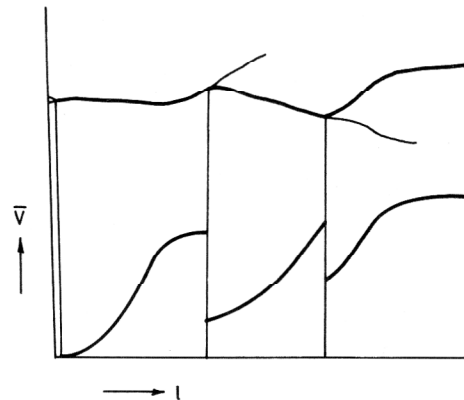


Bild 4
Änderungen der Rißgeschwindigkeiten bei Verzweigung

Zur Dynamik der Rißausbreitung

Es ist eine Tatsache, daß sich alle Risse ständig mit sehr stark veränderlichen Geschwindigkeiten ausbreiten. Alle Kurven, die die Rißausbreitung charakterisieren, sind idealisiert und drücken nur Durchschnittswerte über die Zeit aus. In Wirklichkeit schwankt die Ausbreitungsgeschwindigkeit stark und es werden elastische Wellen emittiert, deren Fronten Energie übertragen. Es sind dies Wellen, die das Körperinnere und seine Oberfläche in Längs- und Querrichtung durchlaufen.

Das momentane Spannungsfeld ist völlig anders als nach statischen Vorstellungen. Eine künftige Problemanalyse wird zeigen, weshalb Risse an Körperparrändern bei Annä-

herung der Risffront an Hindernisse wie Änderungen der Körperform, Rippen usw. gebremst werden. Außer den technologisch bedingten Spannungen können bei Makrorissen auch geometrische Barrieren wirksam werden. Über ihr Wesen wird uns künftig die sich entwickelnde Bruchdynamik aufklären.

Einfluß des Maßstabsfaktors

Aus der Praxis ist bekannt, daß der Charakter der Schädigung von der Größe des Körpers abhängt. Je größer ein Körper und seine im Werkstoff gespeicherte Energie ist, um so schneller breiten sich die Risse aus, d. h. um so kleiner ist die kritische Rißlänge des sich formierenden Bruches. Die Übergangstemperatur t_{KR} der Brüchigkeit ändert sich mit der Körpergröße (vgl. Bild 5). Deshalb

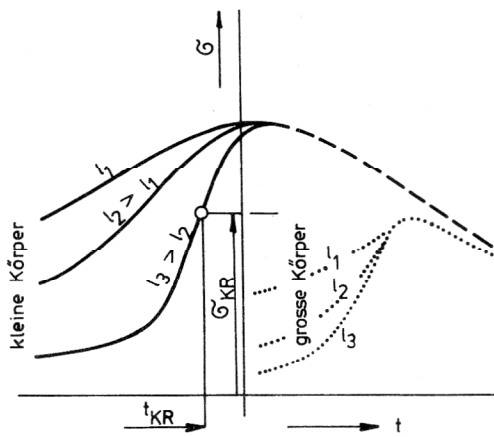


Bild 5
Änderung der kritischen Temperatur t_{KR} beim Übergang zur Zersetzungsschädigung

endet die Entwicklung von Ermüdungsrisse in großen Körpern eher. Außer der Größe des Gesamtvolumens spielt auch das Verhältnis der Dicke der Oberflächenschicht des Werkstoffes zur Gesamtdicke eine Rolle. Deshalb sind dünnwandige Konstruktionen vorteilhafter, weil von der Oberfläche auf Grund der hier eher eintretenden Plastifizierung größere Energieanteile während der Rißausbreitung absorbiert werden. Schematisch zeigt das Bild 6. Der Maßstabsfaktor beeinflusst alle Phasen der Rißentwicklung. Die Wahrscheinlichkeit des

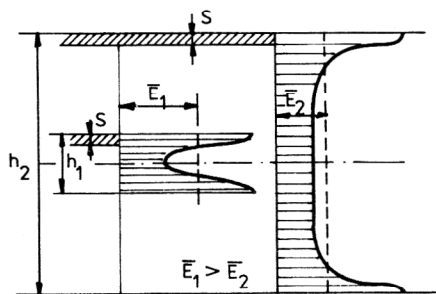


Bild 6
Änderung der Energieverteilung an der Riszwurzel bei verschiedenen Wanddicken

Vorkommens einer größeren Anzahl technologisch bedingter Schädigungen erhöht sich und die Initiationsphase wird verkürzt. Ein hoher Maßstabsfaktor erleichtert die Energiebereitstellung für den Schädigungsprozess durch Freigabe elastischer Spannungsenergie bei der Ausbreitung kleiner Risse. Desweiteren – wie schon angeführt – sinkt die kritische Länge des sich entwickelnden Ermüdungsrisse. Diese Länge können wir dadurch beeinflussen, daß wir die Betriebsalterung z. B. durch Glühen (s. Abb. 1) beseitigen, bzw. die Zugspannungen abbauen, welche bei dicken und massiven Körpern durch Erwärmung auf die Übergangstemperatur und durch eine Überbelastung mit einhergehender Umverteilung der Spannungsspitzen entstehen. Je nach Gestalt und Typ der Körper können wir eine Reihe vorteilhafter Einzeloperationen verwirklichen, welche die Barrieren gegen das Anwachsen der Schädigung und der Formierung eines Bruches erhöhen.

Schlußbemerkungen

Früher vernachlässigte technologische Faktoren werden heute bei der Abschätzung der Betriebszuverlässigkeit berücksichtigt. Es sind dies vor allem der Struktureinfluß, der Einfluß der Eigenspannungen unterschiedlicher räumlicher Ausdehnung und verschiedenen Charakters und der Einfluß der Oberflächenschicht des Körpers, die am stärksten von der Herstellungstechnologie abhängen. Der steigende Einfluß der Umgebungsaggressivität ist entscheidend für die Beständigkeit der Oberflächenschicht der Maschinenteile und Konstruktionen, da in dieser Schicht zumeist die Schädigungen beginnen und der Prozess durch Aggressivität der Umgebung stark gefördert wird.

Dieser Artikel soll neue Möglichkeiten zeigen, wie Schädigungen ökonomisch und zweckmäßig zu begrenzen sind und die Lebensdauer der Maschinen und Konstruktionen zu verlängern ist. Den hier diskutierten Verfahren gehört die Zukunft!

LITERATUR

- [1] J. Němec, J. Sedlaček: Statistické základy pevnosti konstrukci – 1, Academia, Praha 1982.
- [2] Я. Немец: Представления о прочности и надежности конструкции, разработанные в СССР – „Успехи механики“ том 7 выпуск 2, 1984.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. sc. Němec
Ustav teoreticke a
aplikovane mechaniky
CSAN 128–49 Praha 2