

KUGELSTRAHLEN UND DAUERSCHWINGVERHALTEN

H. Wohlfahrt

*Institut für Werkstofftechnik, Universität-Gesamthochschule Kassel,
Bundesrepublik Deutschland*

KURZFASSUNG

Grundsätzliche Betrachtungen zum Einfluß von Kugelstrahlbehandlungen auf das Dauerschwingverhalten, Zusammenstellung verschiedener Einflußfaktoren und Diskussion des Rauheits-, Eigenspannungs- und Verfestigungseinflusses. Beispiele für die Auswirkung verschiedenartiger Strahlbehandlungen auf die Wechselfestigkeit und auf die Lebensdauer glatter Schwingproben von Stählen in verschiedenen Festigkeitsstufen. Ursache für die Ribentstehung unter der Probenoberfläche. Kugelstrahl einfluß auf die Wechselfestigkeit gekerbter Stahlproben. Auswirkung von Strahlbehandlungen auf die Schwingfestigkeit von Aluminium- und Titanlegierungen.

STICHWORTE

Schwingfestigkeit von Stählen, Aluminium- und Titanlegierungen nach Kugelstrahlen. Oberflächenzustand nach Kugelstrahlen. Einfluß von Eigenspannungen. Ribbildung, Rißausbreitung.

EINLEITUNG

Es ist allgemein bekannt, daß durch Kugelstrahlen das Dauerschwingverhalten vieler metallischer Werkstoffe verbessert werden kann. Aus der Fülle der Einzelveröffentlichungen zu diesem Thema, die z.B. in (1) und (43) zusammengefaßt sind, geht jedoch deutlich hervor, daß schon eine allgemeingültige Antwort auf die Frage, welche Strahlbedingungen für ein bestimmtes Bauteil aus einem bestimmten Werkstoff optimal sind, schwierig ist. Eine allgemeingültige Antwort auf die Frage, welche Schwingfestigkeitsverbesserungen mit den optimalen Strahlbedingungen erzielbar sind, gibt es praktisch noch nicht. Die Angaben im Schrifttum sind häufig zu unterschiedlich, und es ist vielfach nicht erkennbar, warum in bestimmten Fällen große, in anderen Fällen nur geringe Schwingfestigkeitsverbesserungen beobachtet werden. Dies rührt daher, daß das Ausmaß der Schwingfestigkeitsverbesserungen offenbar stark abhängig ist von der Bauteilform und -größe, vom Werkstoffzustand und von der Art der schwingenden Beanspruchung. Dadurch ergeben sich komplizierte wechselseitige Abhängigkeiten, die zu überblicken allerdings allmählich gelingt. Der vorliegende Beitrag soll

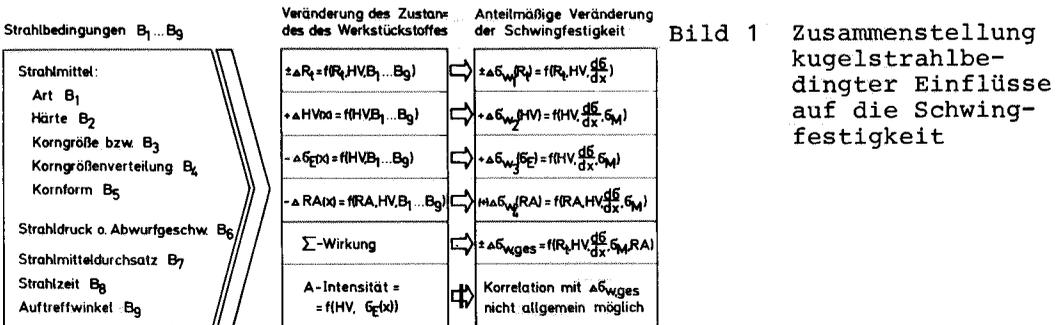
deshalb weniger ein neuer Überblick über die Vielzahl von Einzelveröffentlichungen sein. Es soll vielmehr versucht werden, die Mechanismen, die zu Verbesserungen oder Verschlechterungen des Dauerschwingverhaltens führen, herauszuarbeiten und dadurch zu möglichst allgemeingültigen Aussagen zu kommen, die in der Anwendung auf weitere Einzelberichte das Verständnis erleichtern.

KUGELSTRAHLBEDINGTE WERKSTOFFVERÄNDERUNGEN. BEISPIELE IHRER ABHÄNGIGKEIT VOM WERKSTOFFZUSTAND UND VON DEN STRAHLBEDINGUNGEN

Kugelstrahlen kann unter Variation zahlreicher Parameter erfolgen, die in der 1. Spalte von Bild 1 als Strahlbedingungen B₁ bis B₉ aufgeführt sind. Kugelstrahlen beeinflusst den Zustand der oberflächennahen Schichten gestrahlter Werkstücke. Im einzelnen können folgende Veränderungen eintreten:

- Aufreißen oder Beseitigung von Oberflächendeckschichten, z.B. von Oxidschichten,
- Änderung der Oberflächenfeingestalt z.B. in Form einer Änderung der Rauhtiefe ΔR_t oder des arithmetischen Mittenrauhwertes,
- Ver- oder Entfestigungen in oberflächennahen Schichten, die z.B. als Härteänderungen ΔHV feststellbar sind,
- Eigenspannungsänderungen in oberflächennahen Schichten Δσ_E infolge Erzeugung einer bestimmten Druckeigenspannungsverteilung in einer Schicht bestimmter Dicke,
- Phasenumwandlungen in oberflächennahen Schichten, z.B. Restaustenitumwandlungen ΔRA bei gehärteten Stählen,
- Rißbildungen im Fall des Strahlens mit zu hoher Intensität (Überstrahlen).

Das Ausmaß der Veränderung der verschiedenen Kenngrößen des Oberflächenzustandes hängt außer von den Strahlbedingungen vom Werkstoffzustand und natürlich auch von den Ausgangswerten der betreffenden Kenngrößen vor dem Strahlen ab. Dies soll die zweite Spalte in Bild 1 in kurzer Symbol-Schreibweise ausdrücken.



R_t = Rauhtiefe als vereinfachendes Maß für Oberflächenfeingestalt, σ_E(x) = Eigenspannungsverlauf
 x = Abstand von der Werkstückoberfläche, RA(x) = Restaustenitverlauf, A = Wert der Almenintensität, σ_w = Schwingfestigkeit, dσ/dx = Lastspannungsgradient, σ_M = Mittelspannung

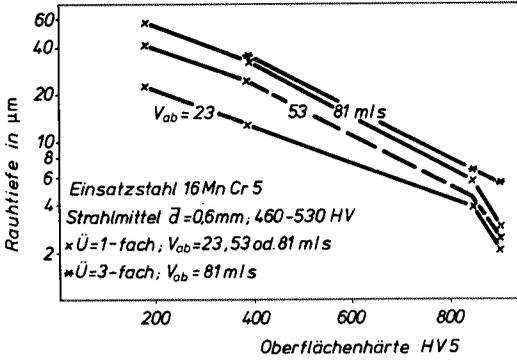


Bild 2 Durch Kugelstrahlen unter verschiedenen Strahlbedingungen erzeugte Rauhtiefenwerte als Funktion der Werkstoffhärte

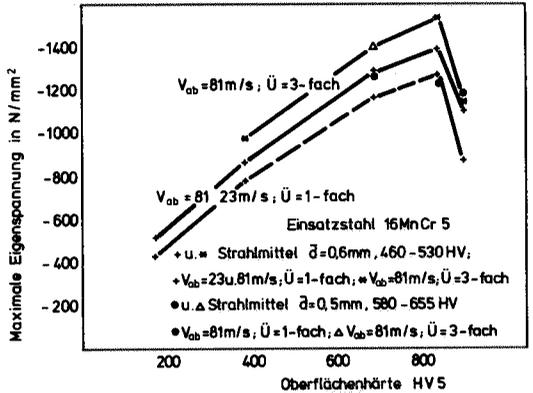
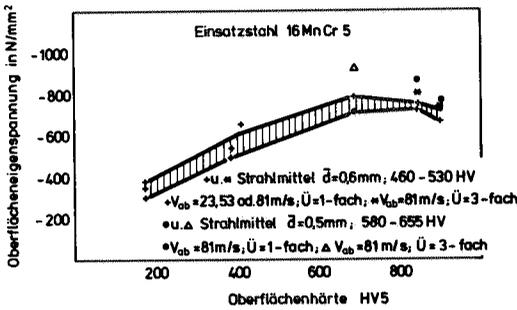


Bild 3a u. 3b Durch Kugelstrahlen unter verschiedenen Strahlbedingungen erzeugte Eigenspannungen als Funktion der Werkstoffhärte

- a) Oberflächeneigenspannungen
- b) Maximalbeträge der Eigenspannungen

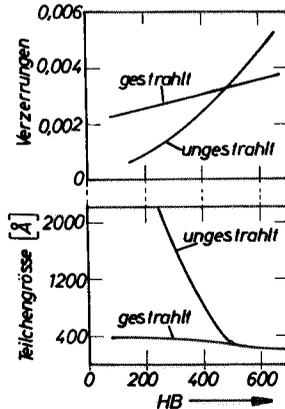
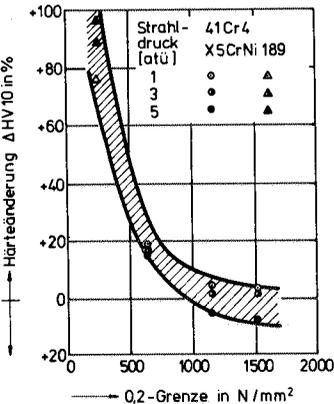


Bild 4a Durch Kugelstrahlen unter verschiedenen Strahlbedingungen erzeugte Härtesteigerungen als Funktion der 0,2%-Dehngrenze (2)

Bild 4b Durch Kugelstrahlen erzeugte Gitterverzerrungen (mittlere Verzerrungsquadrate) und Änderungen der Größe kohärent streuender Bereiche als Funktion der Werkstoffhärte (3).

Als Beispiele zeigen die Bilder 2 bis 4 verschiedene Kenngrößen des Zustandes oberflächennaher Schichten von Stählen, wie sie nach dem Strahlen mit unterschiedlichen Strahlbedingungen vorliegen, als Funktion der Werkstoffhärte. Aus den Bildern geht deutlich hervor, daß die sich beim Kugelstrahlen einstellenden Oberflächenkennwerte stark von der Werkstoffhärte abhängen. Die durch Variation der Strahlparameter bedingten Veränderungen der Oberflächenkennwerte einer Härtestufe sind vergleichsweise gering.

Bild 2 ist zu entnehmen, daß die strahlbedingten Rauhtiefenwerte bei weichen Werkstoffen denen gehobelter Proben entsprechen, jedoch bei harten Werkstoffzuständen recht klein und mit der Rauhtiefe geschliffener oder geläppter Proben vergleichbar sind. Voraussetzung ist dabei eine hinreichend kleine Ausgangsrauhtiefe (1). Innerhalb einer Härtestufe nimmt die Rauhtiefe mit der Abwurfgeschwindigkeit des Strahlmittels zu. Der Einfluß eines durch Verlängern der Strahlzeit auf das Dreifache gegenüber 98%iger Überdeckung gesteigerten Überdeckungsgrades $\bar{U} = 3 \cdot t_{98\%}$ ist nur bei der größten untersuchten Härte erwähnenswert.

Aus den Bildern 3a und 3b geht hervor, daß sowohl die Beträge der durch Kugelstrahlen erzeugten Oberflächen-Druckeigenspannungen als auch der in tieferen Schichten auftretenden maximalen Druckeigenspannungen mit der Härte des Werkstoffzustandes zunehmen. Erst bei der größten untersuchten Werkstoffhärte, die schon weit über der Härte des Strahlmittels lag, ergab sich ein Wiederabfall der Druckeigenspannungsbeträge. Anstieg und auch Wiederabfall der Beträge ist bei den maximalen Eigenspannungen ausgeprägter als bei den Oberflächeneigenspannungen. Bei den maximalen Eigenspannungen nahmen die Beträge mit wachsender Abwurfgeschwindigkeit und mit einer Steigerung des Überdeckungsgrades zu. Die Beträge der Oberflächeneigenspannungen zeigen keine eindeutige Abhängigkeit von der Abwurfgeschwindigkeit und lassen sich bei Proben hoher Härte am besten durch Anwendung eines härteren Strahlmittels vergrößern.

Als Beispiel für die Abhängigkeit der Ver- oder Entfestigung vom Werkstoffzustand sind in Bild 4a die prozentualen Änderungen der Oberflächenhärte aufgetragen, die sich beim Kugelstrahlen zweier unterschiedlicher Stähle in verschiedenen Festigkeitsstufen - hier ausgedrückt durch die 0,2%-Dehngrenze - ergaben (2). Wie man sieht, nimmt die kugelstrahlbedingte Härtesteigerung mit wachsender 0,2%-Dehngrenze sehr stark ab. Bei Dehngrenzen über 1000 N/mm^2 werden sogar Härteabnahmen - also Entfestigungen - beobachtet. (3) hatte schon früher anhand der röntgenographisch ermittelten mittleren Verzerrungsquadrate nachgewiesen, daß beim Kugelstrahlen von Stählen bis zu einer Werkstoffhärte von etwa 500 Brinelleinheiten eine Verfestigung, bei höheren Werkstoffhärten aber eine Entfestigung in oberflächennahen Schichten eintritt (Bild 4b).

AUSWIRKUNG DER KUGELSTRAHLBEDINGTEN WERKSTOFFVERÄNDERUNGEN AUF DIE SCHWINGFESTIGKEIT. BEISPIELE FÜR DIE ABHÄNGIGKEIT DER AUSWIRKUNGEN VOM WERKSTOFFZUSTAND

Jede der Veränderungen im Oberflächenzustand wirkt sich in eigener Weise auf das Dauerschwingverhalten, z.B. auf die Schwingfestigkeit σ_w aus. Dabei ist das Ausmaß der Wirkung je nach Werkstofftyp und Werkstoffzustand, Art der Schwingbeanspruchung und Lastspannungsgradient unterschiedlich. Dies ist in der dritten Spalte im Bild 1

zum Ausdruck gebracht.

Unter der vereinfachenden Annahme, daß die durch die einzelnen Einflußfaktoren bedingten Schwingfestigkeitsveränderungen sich additiv überlagern, kann man den gesamten Sachverhalt durch die folgende Gleichung veranschaulichen:

$$\pm \Delta \sigma_{w, ges} = -\Delta \sigma_{w,1} (+\Delta R_1) + \Delta \sigma_{w,2} (+\Delta HV) + \Delta \sigma_{w,3} (-\Delta \sigma_E) + \Delta \sigma_{w,4} (-\Delta RA)$$

Es wird damit deutlich, wie infolge vielfältiger Einflußmöglichkeiten eine insgesamt sehr komplizierte Abhängigkeit der Schwingfestigkeitszunahme von den Strahlbedingungen entsteht. Die optimalen Strahlbedingungen können deshalb je nach Werkstofftyp und -zustand, Bauteilform und -größe sowie Beanspruchungsart sehr unterschiedlich sein.

Zur Auswirkung von Oberflächenrauigkeiten, Eigenspannungen und Oberflächenverfestigungen auf die Wechselfestigkeit von Stählen in verschiedenen Festigkeitsstufen gibt es quantitative Angaben. Der Einfluß verschieden großer Oberflächenrauigkeiten auf die Wechselfestigkeit wurde mehrfach untersucht (z.B. 12 bis 15). In Bild 5 sind die Ergebnisse zweier neuerer Arbeiten zusammengefaßt, bei denen streng darauf geachtet wurde, daß der Einfluß der Rauhtiefe separiert von anderen Einflußgrößen vorlag (1,4,6). Die auf die Rauhtiefenzunahme bezogene Wechselfestigkeitsabnahme wird mit zunehmender Werkstoffhärte stärker und bei sehr hohen Härtewerten ≈ 800 HV, wie sie in der Arbeit von (1) erfaßt wurden, ergab sich entsprechend der hohen Kerbempfindlichkeit solcher Werkstoffzustände eine beträchtliche Wechselfestigkeitsminderung durch den Rauigkeitseinfluß. Die angegebenen Zahlenwerte können zur Beurteilung des Rauhtiefeneinflusses nach dem Kugelstrahlen herangezogen werden.

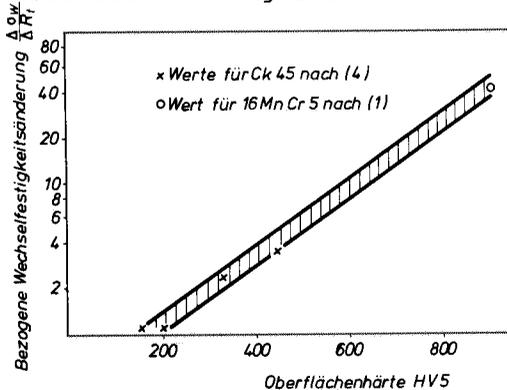


Bild 5 Rauhtiefeneinfluß auf die Wechselfestigkeit als Funktion der Werkstoffhärte

Auch zum Einfluß von Eigenspannungen auf die Wechselfestigkeit von Stählen liegen viele Untersuchungen vor (z.B. 3, 4, 8, 9, 10, 11), wobei ein zusammenfassender Überblick in (16) und (17) gegeben wird. Dabei wurde teilweise auf eine strenge Separation des Eigenspannungseinflusses von anderen Einflußgrößen geachtet (3, 4, 8, 10, 11) und zum Teil ergab sich durch Einbeziehen einer hinreichenden Zahl von Einzelergebnissen eine offenbar ausreichende Ausmittelung unterschiedlicher Störeinflüsse (9). Bei der Mehrzahl der Untersuchungen wurden zur Kennzeichnung des Eigenspannungszustandes die Oberflächeneigenspannungen herangezogen; in der Arbeit (9), die sich ausschließlich

mit Schleifeigenspannungen befaßt, der unterhalb der Oberfläche festgestellte Eigenspannungsmaximalbetrag. Die so gewonnenen Zahlenwerte für die Größe $\Delta\sigma_W/\Delta\sigma_E$ fallen bei Auftragung über der Werkstoffhärte, wie in Bild 6 zu sehen, in ein Streuband, das mit zunehmender Werkstoffhärte ansteigt.

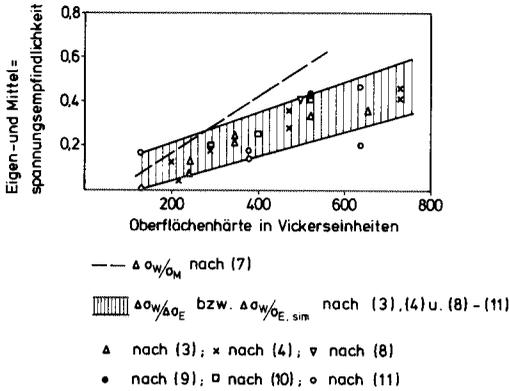


Bild 6 Eigenspannungseinfluß auf die Wechselfestigkeit als Funktion der Werkstoffhärte

Die auf die Eigenspannungsänderung bezogene Wechselfestigkeitsänderung $\Delta\sigma_W/\Delta\sigma_E$ kann man auch als Eigenspannungsempfindlichkeit der Wechselfestigkeit bezeichnen. Die dieser Größe entsprechende Mittelspannungsempfindlichkeit ist in Bild 6 wie von (7) ermittelt als Gerade mit eingetragen. Die Mittelspannungsempfindlichkeit steigt offenbar mit wachsender Werkstoffhärte etwas steiler als die Eigenspannungsempfindlichkeit. Als eine wesentliche Ursache für die unterschiedliche Wirksamkeit von Eigenspannungen in harten und weichen Werkstoffzuständen ist der Eigenspannungsabbau durch Schwingbeanspruchungen zu betrachten. Bei weichen Werkstoffen werden bei der Spannungsamplitude der Wechselfestigkeit hinreichend hohe Eigenspannungen viel stärker verringert als bei harten Werkstoffen. Einzelheiten und eine Begründung hierzu finden sich in (16) und (17). Die Zahlenwerte in Bild 6 sind nach bisherigen Erfahrungen zur Abschätzung des Eigenspannungseinflusses auf die Wechselfestigkeit uneingeschränkt anwendbar, wenn der Maximalbetrag der Eigenspannungen an der Oberfläche oder nur wenige Hundertstel Millimeter darunter liegt. Bei kugelgestrahlten Werkstoffen mittlerer Härte ($350 \lesssim HV \lesssim 500$) ist, wie die Untersuchungen von (1, 19) zeigen, für die Wechselfestigkeitssteigerung außer dem Oberflächenwert der Druckeigenspannungen auch der Maximalbetrag von Bedeutung, der bis zu einigen Zehntel Millimeter unter der Oberfläche liegen kann. Dies ist darauf zurückzuführen, daß auch bei der dauerhaft ertragenen Spannungsamplitude von der Oberfläche ausgehende Risse vorliegen können, deren weitere Ausbreitungsfähigkeit jedoch vom Maximalbetrag der Druckeigenspannungen unterhalb der Oberfläche abhängt (16). (Mit anderen Worten heißt dies, daß die Eigenspannungen die Rißausbreitung beeinflussen und die Wechselfestigkeit als die Grenzspannung aufzufassen ist, unterhalb der sich vorhandene Risse nicht mehr ausbreiten können). Die Auswirkung des Druckeigenspannungsmaximalbetrages wird dann aber geringer sein als die Auswirkung eines direkt an der Oberfläche liegenden Druckeigenspannungsmaximums. Deshalb überschätzt man, wie in (16) sinngemäß ausgeführt, bei Stählen in einem mittelharten Zustand die Wirkung kugelstrahlbedingter Druckeigenspannungen, wenn man deren Maximalbetrag mit dem $\Delta\sigma_W/\Delta\sigma_E$ -Wert aus Bild 6 multipliziert. Andererseits unterschätzt man den Druckeigenspannungseinfluß in der Regel, wenn man den $\Delta\sigma_W/\Delta\sigma_E$ -Wert nach Bild 6 mit dem Oberflächenbetrag der

kugelstrahlinduzierten Eigenspannungen multipliziert. Die Bild 6 zu entnehmenden Werte für die Eigenspannungsempfindlichkeit können im Fall kugelgestrahlter mittelharter Zustände von Stählen aber immerhin zur Eingrenzung des Eigenspannungseinflusses benutzt werden. Völlig unbrauchbar sind die Zahlenwerte jedoch für gehärtete und kugelgestrahlte Stähle, wo wie in Abschnitt 5 beschrieben wird, der Rißausgangsort unter der Oberfläche liegt.

Von (4, 5) wurde für einen Vergütungsstahl in verschiedenen Wärmebehandlungszuständen der Verlauf der Wechselfestigkeit als Funktion der Oberflächenhärte bei konstanter Rauhtiefe und konstanten Eigenspannungen ermittelt. Aus diesen Ergebnissen läßt sich - in Analogie zu den Größen $\Delta\sigma_w/\Delta R_t$ und $\Delta\sigma_w/\Delta\sigma_E$ - die auf die Härteänderung bezogene Wechselfestigkeitsänderung $\Delta\sigma_w/\Delta HV$ bestimmen und als Funktion der Oberflächenhärte für verschiedene Rauhtiefen auftragen (Bild 7).

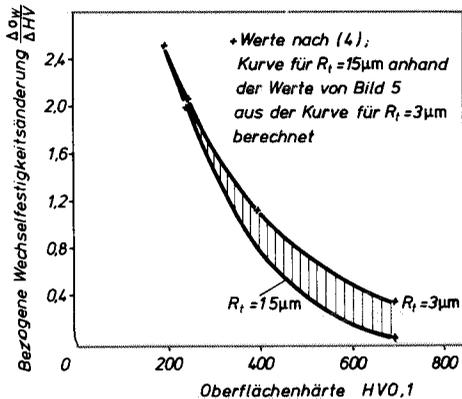


Bild 7 Verfestigungseinfluß auf die Wechselfestigkeit als Funktion der Werkstoffhärte für zwei Rauhtiefen R_t

Die Größe $\Delta\sigma_w/\Delta HV$ nimmt mit zunehmender Oberflächenhärte umso stärker ab, je größer die Rauhtiefe ist. Die Bild 7 zu entnehmenden Werte sind, wie sich in Abschnitt 4 zeigen wird, zur Beschreibung des Verfestigungseinflusses beim Kugelstrahlen brauchbar.

Zahlreiche Befunde (18, 25) sprechen dafür, daß Verfestigungen die Rißbildungsphase verlängern, während Eigenspannungen - wie erwähnt - die Rißausbreitung, und zwar im Stadium II (26), beeinflussen.

DIE AUSWIRKUNG VON STRAHLEBEHANDLUNGEN BEI WEICHEN UND MITTELHARTEN ZUSTÄNDEN VON STÄHLEN

Wenn keine weiteren der in Abschnitt 2 genannten Einflußfaktoren wirksam sind, bestimmen die Rauhtiefenzunahme, die Eigenspannungsänderung und die Verfestigung oberflächennaher Schichten gemeinsam die Wechselfestigkeitszunahme durch Kugelstrahlen. Zum Vergleich und zur Deutung unterschiedlicher Versuchsergebnisse ist es aber vielfach nützlich, die Wirkung dieser drei besonders wichtigen Einflußfaktoren jeweils für sich getrennt zu betrachten. Die in den Abschnitten 2 und 3 aufgeführten Ergebnisse lassen hierzu die folgenden pauschalen Aussagen zu:

In weichen Werkstoffzuständen, wie sie bei normalisierten Stählen vorliegen ($150 \lesssim HV \lesssim 250$), ergeben sich - falls von Teilen mit hinreichend kleiner Ausgangsrauhtiefe ausgegangen wird - starke, kugelstrahlbedingte Rauhtiefenzunahmen (Bild 2), deren Wirksamkeit dem kleinen $\Delta\sigma_w/\Delta R_t$ -Wert entsprechend allerdings relativ gering ist (Bild 5). Der Eigenspannungseinfluß dürfte in weichen Zuständen fast vernachlässigbar klein sein, da nur verhältnismäßig niedrige Druckeigen-

spannungsbeträge erzeugt werden (Bild 3a und 3b), denen zudem eine geringe Wirksamkeit zukommt (Bild 6). Das Kugelstrahlen bewirkt in solchen Werkstoffzuständen jedoch beträchtliche Verfestigungen oberflächennaher Schichten (Bild 4a und 4b), die sehr stark wirksam sind (Bild 7). Man kann demgemäß davon ausgehen, daß bei weichen Werkstoffen und Werkstoffzuständen die Oberflächenverfestigung den Hauptteil kugelstrahlbedingter Wechselfestigkeitszunahmen ausmacht.

Mit zunehmender Werkstoffhärte werden die Rauhtiefenzunahmen geringer (Bild 2), ihre Wirksamkeit aber gleichzeitig stärker (Bild 5), so daß je nach Strahlbedingungen die rauheitsbedingte Wechselfestigkeitsminderung abnehmen, zunehmen oder in etwa gleich bleiben kann. Der Eigenspannungsanteil an kugelstrahlbedingten Wechselfestigkeitssteigerungen wird mit ansteigender Werkstoffhärte zunehmen, da nicht nur zunehmend größere Druckeigenspannungsbeträge erzeugt werden (Bild 3a und 3b), sondern sich auch deren Wirksamkeit verstärkt (Bild 6). Demgegenüber ist anzunehmen, daß der Verfestigungsanteil an Wechselfestigkeitssteigerungen abnimmt, weil die auftretenden Verfestigungen mit zunehmender Härte geringer werden (Bild 4a und 4b) und gleichzeitig ihre Wirksamkeit nachläßt (Bild 7).

Nach diesen allgemeinen Aussagen soll anhand eines konkreten Beispiels verdeutlicht werden, wie groß die verschiedenen Anteile an kugelstrahlbedingten Wechselfestigkeitsänderungen bei unterschiedlichen Werkstoffzuständen und Strahlbedingungen sind. In Bild 8 sind für den normalisierten und den blindgehärteten Zustand des Einsatzstahls 16 Mn Cr 5 experimentell ermittelte, kugelstrahlbedingte prozentuale Biegewechselfestigkeitsänderungen (1, 19, 20) aufgeteilt in den durch die Rauhtiefenzunahme, den durch die Druckeigenspannungserzeugung und den durch Verfestigungen bedingten Anteil. Dazu wurden die in den Bildern 5 und 7 aufgezeichneten Zusammenhänge zwischen ΔR_t und $\Delta \sigma_w$ sowie ΔHV und $\Delta \sigma_w$ benutzt. Man sieht, daß - wie schon angeführt - im weichen, normalisierten Zustand die Wechselfestigkeitszunahme hauptsächlich durch Verfestigung bedingt ist. Diese ist bei größerer Abwurfgeschwindigkeit betragsmäßig höher zu veranschlagen als bei kleiner Abwurfgeschwindigkeit. Da aber auch die Rauftiefe mit der Abwurfgeschwindigkeit stark zunimmt, ergibt sich insgesamt im normalisierten Zustand eine von der Abwurfgeschwindigkeit unabhängige Wechselfestigkeitszunahme. Der Eigenspannungseinfluß ist wie zu erwarten, relativ gering.

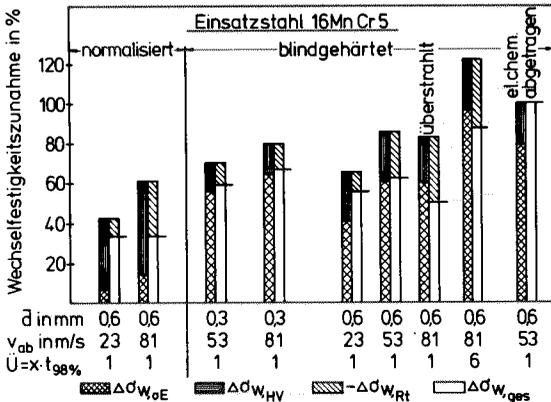


Bild 8 Prozentuale Wechselfestigkeitszunahmen durch Kugelstrahlen des Einsatzstahles 16 Mn Cr 5 in normalisiertem Zustand und blindgehärtetem Zustand mit unterschiedlichen Strahlbedingungen (1, 18, 19)

In dem mittelharten, blindgehärteten Zustand machen die Druckeigenspannungen den weitaus größten Anteil an der Wechselfestigkeits-

steigerung aus. Dieser Anteil beträgt beim Strahlen mit Korn des kleinen Durchmessers \bar{d} von 0,3 mm und einer Abwurfgeschwindigkeit v_{ab} von 81 m/s ca. 65% und infolge der starken Wirksamkeit der Druckeigenspannungen ist auch die Wechselfestigkeitszunahme insgesamt mit 67% relativ groß. Der eigenspannungsbedingte Anteil an der Wechselfestigkeitszunahme läßt sich beim Strahlen mit Korn des größeren Durchmessers von 0,6 mm und einfacher, d.h. 98%iger Überdeckung nicht weiter steigern. Wie Bild 9 ausweist, stimmen z.B. für eine Abwurfgeschwindigkeit von 53 m/s Oberflächenbetrag und auch Maximalbetrag der Druckeigenspannungen bei den Strahlkorndurchmessern 0,3 und 0,6 mm praktisch überein. Der verfestigungsbedingte Anteil an der Wechselfestigkeitszunahme ist dagegen bei dem größeren Strahlkorn größer. Da das gröbere Korn aber auch eine verstärkte Rauhtiefenzunahme bewirkt, kann keine größere Biegewechselfestigkeit als mit dem feineren Korn erreicht werden und bei der Abwurfgeschwindigkeit von 81 m/s ist beim größeren Korn schon ein rauhtiefenbedingtes Überstrahlen gegeben, d.h. eine gegenüber der kleineren Abwurfgeschwindigkeit von 53 m/s verminderte Wechselfestigkeit. Erst ein Erhöhen des Überdeckungsgrades auf über 100% führt bei nur wenig weiter vergrößerter Rauhtiefe zu einer zusätzlichen eigenspannungsbedingten Wechselfestigkeitszunahme. Die größte Anhebung der Biegewechselfestigkeit ergibt sich jedoch durch elektrolytisches Abtragen einer Oberflächenschicht nach Kugelstrahlen. Damit wird die recht geringe Ausgangsrauhtiefe von 3 μm wieder erreicht und das Druckeigenspannungsmaximum in die Oberfläche verschoben, so daß die hohen Druckeigenspannungen ihre maximal mögliche Wirkung gemäß Bild 6 entfalten können.

Während für die Wechselfestigkeitszunahme bei mittelhartem Werkstoffzustand der Oberflächenbetrag und / oder der Maximalbetrag der Kugelstrahlbedingten Druckeigenspannungen maßgebend ist, wird die Lebensdauerverlängerung im Zeitfestigkeitsbereich durch die Beträge der Druckeigenspannungen und die Dicke der eigenspannungsbehafteten Schicht bestimmt. Anhand der Eigenspannungsverläufe blindgehärteter und kugelgestrahlter Proben in Bild 9 sowie der entsprechenden Wöhlerlinien in Bild 10 läßt sich zeigen, wie mit zunehmender Dicke der mit Druckeigenspannungen beaufschlagten Schicht die Lebensdauer auf den in die Untersuchung einbezogenen Spannungshorizonten anwächst. Eine Abwurfgeschwindigkeit von 53 m/s ergibt bei Korndurchmessern von 0,3 und 0,6 mm praktisch gleiche Maximalwerte der Druckeigenspannungen, jedoch recht unterschiedliche Druckeigenspannungsschichtdicken (Bild 9). Dementsprechend führen Biegewechselversuche auf eine erheblich unterschiedliche Lebensdauer im Zeitfestigkeitsbereich, jedoch auf fast dieselbe Wechselfestigkeit für beide Strahlbedingungen (Bild 10). Umgekehrt bringt das elektrochemische Abtragen nach dem Strahlen zwar wie erwähnt eine erhebliche Steigerung der Biegewechselfestigkeit, jedoch keine Verlängerung der Lebensdauer gegenüber den mit gleichen Parametern gestrahlten ($v_{ab} = 53 \text{ m/s}; \bar{d} = 0,6 \text{ mm}$) und anschließend nicht elektrochemisch abgetragenen Proben. Dies ist in Anbetracht der durch das elektrochemische Abtragen verminderten Schichtdicke verständlich.

Neueren Ergebnissen zufolge (21, 22) hat bei Stählen im Zustand mittlerer Härte der z.B. durch die Biegehöhe gegebene Lastspannungsgradient keine entscheidende Bedeutung für den durch Kugelstrahlen erzielbaren Wechselfestigkeitsgewinn. Durch Versuche unter Zug-Druckbeanspruchung müßten hier noch zusätzliche Kenntnisse gewonnen werden.

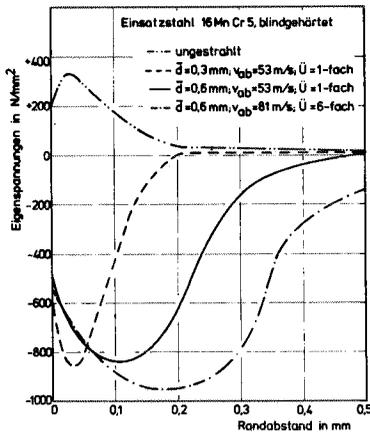


Bild 9 Tiefenverläufe der Eigenspannungen blindgehärteter und unterschiedlich kugelgestrahlter Proben aus Einsatzstahl 16 Mn Cr 5

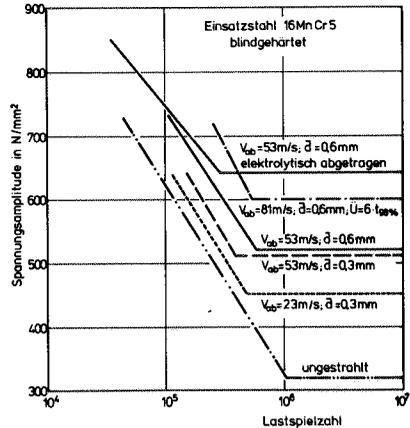


Bild 10 Wöhlerlinien blindgehärteter und unterschiedlich kugelgestrahlter Proben aus Einsatzstahl 16 Mn Cr 5

DIE AUSWIRKUNG VON STRAHLBEHANDLUNGEN BEI HARTEN ZUSTÄNDEN VON STÄHLEN

Es ist bekannt, daß zwischen der Zugfestigkeit und der Wechselfestigkeit von Stählen in einem relativ weiten, von der Form und dem Oberflächenzustand der Prüfstäbe abhängigen Festigkeitsbereich ein etwa linearer Zusammenhang besteht. Oberhalb eines ebenfalls von Probenform und Oberflächenzustand abhängigen Grenzwertes der Zugfestigkeit flacht jedoch der Anstieg der Wechselfestigkeit ab oder es tritt sogar ein Wiederabsinken der Wechselfestigkeit bei weiter zunehmender Zugfestigkeit ein (4,23,24). Abflachen des Wechselfestigkeitsanstiegs und Wiederabsinken sind auf ungünstige Oberflächenzug-eigenspannungen und auf die vergrößerte Kerbempfindlichkeit bei sehr hoher Härte oder Zugfestigkeit zurückzuführen. Man ist deshalb seit langem bestrebt, durch Einbringen von Druckeigenspannungen mittels geeigneter Wärmebehandlungen wie Einsatzhärten das Abflachen des Wechselfestigkeitsanstiegs zu mildern und so im Bereich höchster Zugfestigkeiten z.B. eine optimale Biegeschwingfestigkeit zu erzielen (24).

Bei den hochfesten Zuständen gehärteter Stähle lassen sich durch geeignete Strahlbehandlungen besonders große Druckeigenspannungsbeiträge erzielen (Bilder 3a und 3b). Damit ergeben sich bei Proben mit hinreichend steilem Lastspannungsgradienten, also z.B. bei dünnen Biegeproben oder bei Kerbproben, Wechselfestigkeitssteigerungen, die so groß sind, daß das Abflachen oder gar Wiederabfallen der Zugfestigkeits-Wechselfestigkeitskurve bei höchsten Zugfestigkeits- oder Härtewerten vermieden oder zumindest stark gemildert wird. Im folgenden muß kurz erläutert werden, warum sich dieser vorteilhafte Effekt des Kugelstrahlens beim Vorliegen von Lastspannungsgradienten, die im Vergleich zu den Eigenspannungsgradienten sehr flach sind, nicht mehr oder zumindest nicht mehr voll ausnutzen läßt.

Die Dicke der Schicht, die beim Kugelstrahlen hochfester Werkstoffzustände mit betragsmäßig großen Druckeigenspannungen beaufschlagt wird, ist verhältnismäßig gering. Das hat zur Folge, daß sich bei

hochfesten, kugelgestrahlten Proben bei nicht zu hohen Spannungen Schwingungsrisse bevorzugt in Schichten unter der Oberfläche bilden und ausbreiten, in denen nur noch geringe Druckeigenspannungen vorliegen oder schon Zugeigenspannungen wirksam sind. Für die sich einstellende Wechselfestigkeit ist dann der gesamte Eigenspannungsverlauf, insbesondere auch in tieferen Schichten, im Vergleich zum Lastspannungsverlauf von Bedeutung. In verschiedenen Arbeiten (16, 21, 27, 28) wird gezeigt, wie man aus Eigen- und Lastspannungsverlauf die mögliche Tiefenlage lebensdauerbestimmender Anrisse und damit die erreichbaren Wechselfestigkeitswerte ermitteln kann. Auf diese Weise lassen sich anschauliche Erklärungen für die Wirkung unterschiedlicher Strahlbehandlungen geben (28) und es läßt sich zeigen, daß die kugelstrahlbedingten Wechselfestigkeitsgewinne bei gehärteten Stählen stark von der Biegehöhe der Proben, also vom Lastspannungsgradienten abhängig sind (22).

In hochfesten Werkstoffzuständen können die sich in tieferen Schichten ausbreitenden Risse die relativ kurze kritische Rißlänge, ab der instabile Rißausbreitung einsetzt, erreichen, ohne in die Gebiete mit großen Druckeigenspannungsbeträgen hineinlaufen zu müssen. Im Gegensatz zu Werkstoffzuständen mittlerer Härte, wo die von der Oberfläche ausgehenden Risse die mit betragsmäßig großen Druckeigenspannungen behaftete Schicht durchlaufen müssen, bewirkt deshalb bei hochfesten Werkstoffen eine zunehmende Druckeigenspannungsschichtdicke nicht zwangsläufig größere Lebensdauer im Zeitfestigkeitsbereich. Diesbezügliche Hinweise über praktisch gleichbleibende Lebensdauerwerte bei unterschiedlicher Schichtdicke der mit verschiedenen Strahlbehandlungen induzierten Druckeigenspannungen liegen im Schrifttum vor (28, 1). Allerdings sind bei dünnen Biegeproben in den Schichttiefen der Rißentstehung und -ausbreitung schon merklich geringere Lastspannungen als an der Oberfläche vorhanden. Auch Lastspannungssteigerungen fallen in diesen tieferen Schichten geringer aus als die Randspannungszunahme angibt. Da in Wöhlerdiagrammen aber Randspannungsamplituden aufgetragen werden, muß dieser Sachverhalt zwangsläufig zu um so steileren Zeitfestigkeitsästen der Wöhlerlinien führen, je tiefer unter der Oberfläche das Rißgeschehen abläuft. Entsprechende Beobachtungen sind in den Arbeiten von (1, 29) und (21, 22) enthalten. Bild 11 zeigt als Beispiel wie bei unterschiedlichen Strahlbedingungen, die eine zunehmend dickere druckeigenspannungsbehaftete Schicht bewirken, die Zeitfestigkeitsäste der Wöhlerlinien tatsächlich zunehmend steiler werden.

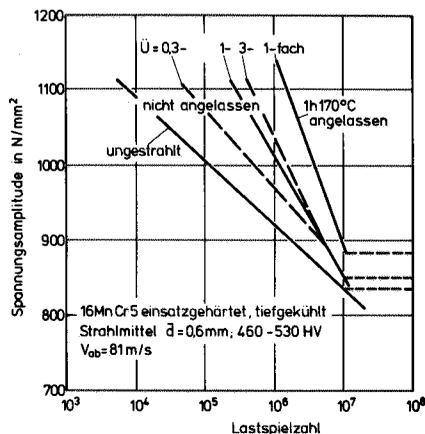


Bild 11 Wöhlerlinien einsetzgehärteter und tiefgekühlter bzw. einsetzgehärteter, tiefgekühlter und angelassener Flachproben aus Einsatzstahl 16 Mn Cr 5 nach Kugelstrahlen mit unterschiedlichen Überdeckungsgraden

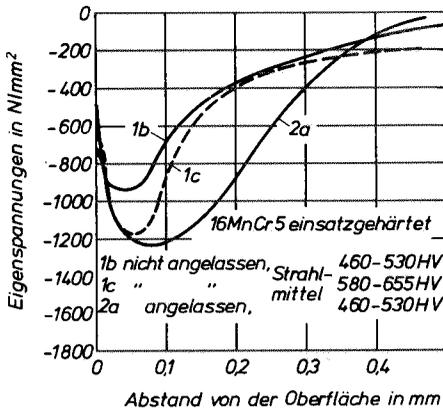


Bild 12 Tiefenverläufe der Eigenspannungen ein- und angelasener Proben aus Einsatzstahl 16 Mn Cr 5 nach dem Kugelstrahlen mit Strahlkorn unterschiedlicher Härte

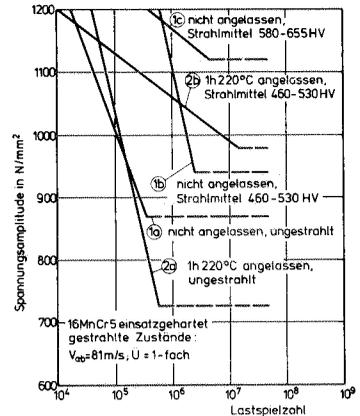


Bild 13 Wöhlerlinien ein- und angelasener Proben aus Einsatzstahl 16 Mn Cr 5 nach dem Kugelstrahlen mit Strahlkorn unterschiedlicher Härte

Um optimale Tiefenverläufe der Eigenspannungen und damit größtmögliche Wechselfestigkeitszunahmen zu erzielen, müssen die harten Werkstoffzustände mit etwa gleich hartem Strahlmittel gestrahlt werden. In den Bildern 12 und 13 läßt sich die Auswirkung zweier unterschiedlicher Strahlmittelhärten auf den Eigenspannungs-Tiefenverlauf (Bild 12) und auf die Wöhlerlinie (Bild 13) von ein- und angelasener Proben des Stahles 16 Mn Cr 5 erkennen (30). Die Proben mit einer Härte von 820 HV wurden zum Teil mit einem Strahlmittel der Härte 460 - 530 HV und zum anderen Teil mit einem Strahlmittel der Härte 580 - 655 HV gestrahlt. Zum Vergleich ist der Eigenspannungs-Tiefenverlauf und die Wöhlerlinie mit angegeben, die sich beim Strahlen ein- und angelasener Proben desselben Stahles mit dem etwas weicheren Strahlmittel ergaben. Die ein- und angelasenen Proben mit einer Härte von ca. 700 HV haben eine deutlich geringere Ausgangswechselfestigkeit im ungestrahlten Zustand als die nicht angelassenen Proben. Wie man Bild 12 entnimmt, läßt sich bei angelasenen Proben auch mit dem etwas weicheren Strahlmittel ein Eigenspannungsverlauf erzielen, der in einer dickeren Schicht betragsmäßig höhere Druckeigenspannungen aufweist als die Eigenspannungsverläufe der nicht angelassenen Proben. Dieser günstige Eigenspannungsverlauf führt dazu, daß die angelasenen Proben trotz ihrer geringeren Ausgangswechselfestigkeit nach dem Kugelstrahlen die nicht angelassenen und mit dem weicheren Strahlmittel gestrahlten Proben in der Wechselfestigkeit übertreffen. Allerdings ergibt sich für die angelasenen Proben ein sehr flacher Zeitfestigkeitsast, so daß bei sehr hohen Spannungsamplituden eine Verringerung der Lebensdauer gegenüber den nicht angelassenen, gestrahlten Proben eintritt. Offenbar bewirken sehr hohe Spannungsamplituden bei dem weicheren, angelasenen Zustand schon einen merklichen Abbau der Druckeigenspannungen. Das Strahlen nicht angelassener Proben mit dem härteren Strahlmittel ergibt Druckeigenspannungsbeträge, die nicht ganz so hoch wie die im angelasenen Zustand erreichten sind. In Verbindung mit der größeren Ausgangswechselfestigkeit der nicht angelassenen

Proben wird damit aber der höchste Wechselfestigkeitswert erreicht. Zur Ausnützung der großen Festigkeit hochharter Zustände für das Dauerschwingverhalten müssen also entsprechend harte Strahlmittel zur Verfügung stehen.

Beim Verfahren des Kugelstrahlens mit Zugvorspannung der zu strahlenden Teile ("strain peening") lassen sich den Angaben im Schrifttum zufolge (8) größere Druckeigenspannungsbeträge erzeugen als beim üblichen Strahlen und auch entsprechend große Wechselfestigkeitsgewinne erzielen. Inwieweit dieses Verfahren bei hochfesten Werkstoffzuständen auch mit dem Strahlmittel der üblichen Härte von ca. 460 - 530 HV zu betragsmäßig größeren Druckeigenspannungen führt als das Strahlen ohne Vorspannung ist nicht bekannt.

Insgesamt wird also die Biege-wechselfestigkeit kugelgestrahlter Stahlproben hoher Härte praktisch ausschließlich durch den Tiefenverlauf der erzeugten Druckeigenspannungen bestimmt. Geringe Entfestigungen in Oberflächennähe und die sich einstellende Rauhtiefenzunahme haben bei Rißbildung unterhalb der Oberfläche keine oder nur untergeordnete Bedeutung für die Wechselfestigkeitssteigerung durch Kugelstrahlen.

DIE AUSWIRKUNG VON STRAHLBEHANDLUNGEN BEI GEKERBTEN UND BEI RISSBEHAFTETEN STRAHLPROBEN HOHER HÄRTE

Durch Kerben fällt gerade bei hochfesten Werkstoffzuständen die Wechselfestigkeit gegenüber glatten Proben sehr stark ab, weil die kerbbedingten Lastspannungsspitzen kaum oder nicht durch Plastifizierungen im Kerbgrund abgebaut werden können. Es ist daher von besonderem Interesse, welche Wechselfestigkeitssteigerungen sich bei Kerbproben durch Kugelstrahlen erzielen lassen. Dabei muß sichergestellt sein, daß sich unter Verwendung eines hinreichend feinen Strahlkorns auch im Kerbgrund der erforderliche Überdeckungsgrad erzielen läßt.

Eigenspannungsmessungen an einsatzgehärteten Proben der in Bild 14 mit angegebenen Form zeigen, daß Kugelstrahlen-offenbar als Folge der Fließbehinderung im Kerbgrund - in Schichten unterhalb des Kerbgrundes etwa um den Kerbfaktor größere Maximalbeträge der Druckeigenspannungen bewirkt als in Schichten unterhalb gleichgestrahlter glatter Oberflächen. An der Kerbgrundoberfläche selbst werden allerdings geringere Beträge der Druckeigenspannungen beobachtet als an der gleichgestrahlten glatten Oberfläche (31, 32). In Bild 14 sind die Wöhlerlinien für einsatzgehärtete Kerbproben im ungestrahlten und im gestrahlten Zustand eingezeichnet. Zusätzlich ist die Wöhlerlinie für glatte gestrahlte Proben mit aufgenommen (31). Wie man sieht, läßt sich durch Kugelstrahlen der Kerbe die Biege-wechselfestigkeit auf den Wert der ungekerbten und gestrahlten Proben anheben. Offenbar kann durch die kugelstrahlinduzierten Druckeigenspannungen die Last-Zugspannungsspitze im Kerbgrund, die mit steilem Gradienten zu tieferen Schichten hin abfällt, voll abgefangen werden. Diesselben Aussagen gelten auch für durchgekohlte und gehärtete Kerbproben, deren Wöhlerlinien für den gestrahlten und den ungestrahlten Zustand ebenfalls in Bild 14 eingetragen sind.

Proben des Vergütungsstahls Ck 45, die nach dem Einbringen von Schwingungsrissen gehärtet werden (845 HV), kommt in etwa die geringe Wechselfestigkeit des normalisierten Zustandes zu (vgl. 11). Durch Kugelstrahlen läßt sich nicht nur die Lebensdauer solcher rißbehafteter und gehärteter Proben verlängern, sondern auch die Biege-wechselfestigkeit beträchtlich anheben, und zwar durch Strahlen mit

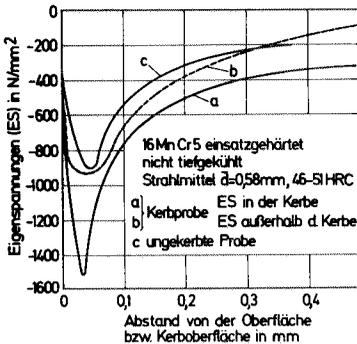
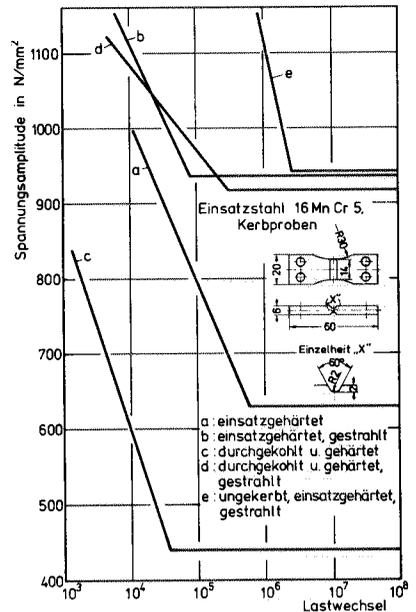


Bild 14a
Eigenspannungs-
Tiefenverläufe
glatter und ge-
kerbter einsetz-
gehärteter Proben
aus 16MnCr5

Bild 14b
Wöhlerlinien
glatter und ge-
kerbter einsetz-
gehärteter Proben
sowie gekerbter,
durchgekohlter
und gehärteter
Proben aus
16 MnCr5



Korn der üblichen Härte von ca. 500 HV auf einen Wert der um etwa 120 N/mm^2 unter der Wechselfestigkeit rißfreier, gehärteter Proben liegt und durch Strahlen mit hartem Korn von ca. 670 HV auf einen Wert der um fast 200 N/mm^2 über der Wechselfestigkeit rißfreier, gehärteter Proben liegt. Durch das Strahlen mit dem harten Korn wird die Ausbreitung der von vornherein vorhandenen Schwingungsrisse vollständig unterbunden, wenn deren Länge kleiner als 0,65 mm ist. Bei Spannungsamplituden oberhalb der Wechselfestigkeit erfolgt der Bruch solcher Proben völlig unabhängig von den ursprünglich vorhandenen Rissen durch neue Anrisse, die sich unterhalb der Probenoberfläche bilden (33).

DIE AUSWIRKUNG VON STRAHLEBEHANDLUNGEN BEI ALUMINIUM UND TITAN- LEGIERUNGEN

Man kann davon ausgehen, daß die aufgezeigten Grundmechanismen der Wirkung von Kugelstrahlbehandlungen auch bei anderen Legierungen als Stählen gelten. Die Auswirkung der wichtigen Einflußfaktoren Rauhtiefe, Eigenspannungen und Verfestigung wird zwar betragsmäßig eine andere sein, hängt aber ebenfalls von der Festigkeitsstufe, in der die betreffende Legierung vorliegt, ab. Außerdem gibt es Hinweise, daß die Prozesse Anrißbildung und Rißausbreitung und deshalb der Eigenspannungs- und Verfestigungseinfluß stark vom Gefügezustand abhängig sind. Zur Deutung und Bewertung der Auswirkung von Kugelstrahlbehandlungen ist deshalb die genaue Kennzeichnung des Gefügezustandes der betrachteten Legierung besonders wichtig.

Für verschiedene Aluminiumlegierungen ist gesichert, daß Stahlkugelstrahlen mit oder ohne nachträgliches Glasperlenstrahlen Lebensdauererweiterungen von glatten oder abgesetzten Proben im Zeitfestigkeitsbereich bewirkt und zwar sowohl bei Biege- (34, 35, 36) als auch bei Zug-Druck-Bearbeitung (26, 36). Während (36) jedoch nachweist, daß Kugelstrahlen auch die Biege-Wechselfestigkeit glatter Proben steigert, sind die Verbesserungen des Schwingverhaltens bei Zug-Druck-Bearbeitung auf hohe Spannungsamplituden im Zeitfestigkeitsbereich beschränkt. Im Bereich großer Lebensdauerwerte kann

nach (26) und (36) bei Zug-Druck-Bbeanspruchung kein Unterschied zwischen kugelgestrahlten und ungestrahlten glatten Proben aus den betreffenden Aluminiumlegierungen festgestellt werden, insbesondere ergibt sich keine Erhöhung der Zug-Druck-Wechselfestigkeit. Im Zusammenhang mit der Beobachtung von (26) und (36), daß sich bei kugelgestrahlten Proben Schwingungsrisse unter der Oberfläche bilden, lassen sich diese Befunde aus spannungsmechanischer Sicht analog zu den Befunden bei Stählen verstehen. In diese Betrachtungsweise paßt auch, daß bei Proben mit gestrahlter scharfer Kerbe eine Erhöhung der Zug-Druck-Wechselfestigkeit durch das Kugelstrahlen gefunden wird (26). Die besonders bei hohen Spannungsamplituden merkliche Lebensdauererweiterung glatter Proben wird der langsameren Rißausbreitung im Vakuum, wie sie bei Rissen unter der Oberfläche vorliegt, und dem größeren Anteil, den die Rißausbreitung bei hohen Spannungsamplituden an der Lebensdauer einnimmt, zugeschrieben (36). Andererseits stellt (35) fest, daß beim Aufbringen betriebsnaher Lastkollektive kugelstrahlbedingte Druckeigenspannungen schon nach 2% der Lebensdauer abgebaut sind und trotzdem eine Lebensdauererweiterung eintritt. Deshalb geht (35) ebenso wie (34) davon aus, daß die kugelstrahlbedingte Verfestigung oberflächennaher Schichten bei den benutzten Aluminiumlegierungen für die Lebensdauererweiterung verantwortlich ist. Bei der weiteren Diskussion zum Kugelstrahleinfluß bei Aluminiumlegierungen ist zu berücksichtigen, daß den Ergebnissen von (37) zufolge Druckeigenspannungen auch die Anrißbildung beeinflussen können, wenn sie durch innere Kerbwirkung an Ausscheidungen erfolgt. Neueren Ergebnissen hierzu darf mit Interesse entgegengesehen werden.

Auch für Titanlegierungen liegt eine Reihe von Arbeiten zum Eigenspannungs- und zum Kugelstrahleinfluß auf das Dauerschwingverhalten vor. Bei der Titanlegierung Ti 6 Al 6 V 2 Sn wird konstant kugelstrahlbedingte Druckeigenspannungen bei Belastung mit einem betriebsnahen Kollektiv und dementsprechend eine erheblich stärkere Lebensdauererweiterung als bei einer Aluminiumlegierung gefunden (35). (38) gibt als Eigenspannungsempfindlichkeit für die Legierung Ti 6 Al 4 V im lösungsgeglühten Zustand einen Wert von 0,1 an. Dagegen ermittelt man aus Ergebnissen von (9) einen $\Delta\sigma_w/\Delta\sigma_E$ -Wert von 0,4. (39) berichtet über die Entstehung von Rissen unter der Oberfläche bei verschiedenen Strahlbedingungen. Besonders gravierend wirkt sich bei der Titanlegierung Ti 6 Al 4 V - offenbar auch im lösungsgeglühten Zustand - die starke Kerbempfindlichkeit aus. Bei dieser Legierung müssen deshalb die Strahlbedingungen besonders sorgfältig ausgewählt werden, um solche herauszufinden, die zu einer Wechselfestigkeitszunahme gegenüber dem üblichen gefrästen Zustand führen (40, 41). Gefräste Proben weisen in der Regel schon merkliche Druckeigenspannungen in oberflächennahen Schichten auf (41, 42). Bild 15 zeigt als Beispiel die in Biegewechselversuchen an unterschiedlich gestrahlten Proben gewonnenen Wöhlerlinien im Vergleich zur Wöhlerlinie gefräster Proben. Wie man sieht, bringt reines Stahlkugelstrahlen eine Absenkung der Biegewechselfestigkeit gegenüber dem gefrästen Zustand, die mit zunehmender Strahlintensität und damit ansteigender Rauhtiefe größer wird. Durch zusätzliches Glasperlenstrahlen läßt sich die Oberfläche so weit glätten, daß eine Biegewechselfestigkeitssteigerung um 25% gegenüber gefrästen Proben möglich wird (41).

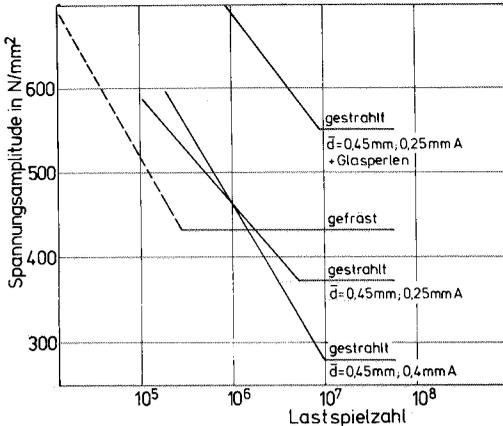


Bild 15 Wöhlerlinien für Flachproben aus der Legierung Ti 6 Al 4 V im gefrästen sowie im gefrästen und unterschiedlich kugelgestrahlten Zustand

ZUSAMMENFASSUNG

1. Wichtige Kenngrößen des Oberflächenzustandes sind die Oberflächenfeingestalt, vereinfachend gekennzeichnet durch die Rauhtiefe, sowie die Eigenspannungen und der Verfestigungszustand in oberflächennahen Schichten. Alle drei Kenngrößen werden durch Kugelstrahlen verändert. Das Ausmaß ihrer Veränderung hängt von den Strahlbedingungen und insbesondere von der Festigkeit des Werkstoffzustandes ab.
2. Der Zustand oberflächennaher Schichten ist für das Dauerschwingverhalten von entscheidender Bedeutung. Veränderungen wichtiger Kenngrößen des Oberflächenzustandes wirken sich als Veränderungen des Dauerschwingverhaltens aus. Das Ausmaß dieser Auswirkungen ist ebenfalls von der Festigkeit des Werkstoffzustandes abhängig, aber z.B. auch vom jeweils vorliegenden Lastspannungsgradienten.
3. Wegen der Punkte 1. und 2. sind zum Zusammenhang zwischen Strahlbedingungen und Dauerschwingverhalten keine pauschalen Aussagen möglich. Die im Hinblick auf bestmögliches Dauerschwingverhalten optimalen Strahlbedingungen sind je nach Werkstoff, Werkstoffzustand, Bauteilform und Art der Beanspruchung verschieden.
4. Bei Stählen ist zur Beurteilung der Auswirkung von Kugelstrahlbehandlungen eine Grobunterteilung in die drei Festigkeitsstufen "weich" ($150 \lesssim \text{HV} \lesssim 250$), "mittelhart" ($350 \lesssim \text{HV} \lesssim 500$) und "hart" ($650 \lesssim \text{HV}$) nützlich.
 - a) Bei weichem Werkstoffzustand sind Wechselfestigkeitssteigerungen hauptsächlich durch die Verfestigung oberflächennaher Schichten bedingt. Der wechselfestigkeitsmindernde Rauhtiefeneinfluss ist zu beachten.
 - b) Bei mittelhartem Zustand von Stählen werden die kugelstrahlbedingten Wechselfestigkeitszunahmen vorwiegend durch die Druckeigenspannungen in oberflächennahen Schichten bewirkt. Verfestigungs- und Rauhtiefeneinfluss kompensieren sich häufig weitgehend.
 - c) Bei sehr harten Werkstoffzuständen ist der gesamte Tiefenverlauf der kugelstrahlinduzierten Druckeigenspannungen im Vergleich zum Lastspannungs-Tiefenverlauf von Bedeutung für die

Wechselfestigkeit. Bei Spannungsamplituden im Bereich der Wechselfestigkeit können sich die lebensdauerbestimmenden Anrisse unter der Oberfläche bilden. In solchen Fällen ist der Einfluß der erzeugten Oberflächenrauigkeit und Oberflächenverfestigung allenfalls von untergeordneter Bedeutung. Die Anrißbildung unterhalb der Oberfläche hat eine ausgeprägte Biegehöhenabhängigkeit der kugelstrahlbedingten Wechselfestigkeitszunahmen zur Folge.

5. Kugelstrahlen ist besonders wirksam zur Verbesserung der Schwingfestigkeit
 - a) von Proben oder Bauteilen mit ungünstigen Oberflächenkennwerten wie Rauhtiefenspitzen durch Kratzer, betragsmäßig großen Zügeigenspannungen oder Entfestigungen in Oberflächenschichten z.B. durch Randoxidation oder Randentkohlung
 - b) von gekerbten Proben oder Bauteilen
 - c) von hochfesten Proben oder Bauteilen, wenn deren Schwingfestigkeit durch die starke Kerb- und Eigenspannungsempfindlichkeit hochfester Werkstoffzustände stark beeinträchtigt ist.
6. Zur Erzielung eines größtmöglichen Wechselfestigkeitsergebnisses müssen hochfeste Zustände von Stählen mit Strahlmitteln entsprechend großer Härte gestrahlt werden.
7. Bei Stählen sind Strahlbedingungen, die auf Wechselfestigkeitsminderungen gegenüber dem ungestrahlten Zustand führen, selten beobachtet worden (1) und relativ einfach zu vermeiden. Bei der Titanlegierung Ti 6 Al 4 V dagegen bewirken nur ausgewählte Strahlbedingungen eine Wechselfestigkeitssteigerung gegenüber dem üblichen gefrästen Zustand.

SCHRIFTTUM

- (1) Schreiber, R. (1976). Dr.-Ing. Dissertation Universität Karlsruhe (TH).
- (2) Wiegand, H. und P. Strigens (1970). Ind.-Anz. 92, 235-240.
- (3) Evans, W.P., R.E. Ricklefs und J.F. Millan (1964). Fatigue an interdisciplinary approach. Proc. 10th Sagamore Conf., Hrsg. J.J. Burke, N.L. Reed und V. Weiss, Syracuse. 273-278.
- (4) Syren, B. (1975). Dr.-Ing. Dissertation Universität Karlsruhe (TH).
- (5) Syren, B., H. Wohlfahrt und E. Macherauch (1976). Proc. 2nd Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials. Boston, Mass. 807-811.
- (6) Schreiber, R., H. Wohlfahrt und E. Macherauch (1978). Arch. Eisenhüttenwes. 49, 207-210.
- (7) Schütz, W. (1967). Z. Flugwissenschaften, 15, 407-419.
- (8) Mattson, R.L. und J.G. Roberts (1960). Internal stresses and fatigue in metals. New York, 337-360.
- (9) Koster, W.P. und J.T. Cammett (1980). Vortrag 109th AIME Annual Meeting, Las Vegas, Nevada sowie Bulletin 677-1 Metcut Res. Associates Inc.
- (10) Morrow, J.D., A.S. Ross und G.M. Sinclair (1960). Soc. Automotive Engrs. Trans., 68, 40-48.

- (11) Wiegand, H. und G. Tolasch (1967). Härterei-Techn. Mitt., 22, 213-220
- (12) Lehr, E. (1928). Z. Metallkunde, 20, 78.
- (13) Siebel, E. und M. Gaier (1956). VDI-Z., 98, 1715-1723.
- (14) VDI-Richtlinie 2226 (1965). VDI, Düsseldorf, 13.
- (15) Bühler, H. und E.v. Finckenstein (1972). Arch. Eisenhüttenwesen 43, 61-65.
- (16) Wohlfahrt, H. (1977). Verhalten von Stahl bei schwingender Beanspruchung. Hrsg. W. Dahl. Verlag Stahleisen m.b.H., Düsseldorf, 141-164.
- (17) Macherauch, E. (1980). Eigenspannungen. Deutsche Gesellschaft f. Metallkunde, Oberursel, 41-68.
- (18) Kloos, K.H., B. Fuchsbauer, W. Magin und D. Zankov (1979), VDI-Berichte Nr. 354, 59-72.
- (19) Schreiber, R., H. Wohlfahrt und E. Macherauch (1977). Arch. Eisenhüttenwes., 48, 653-657.
- (20) Schreiber, R., H. Wohlfahrt und E. Macherauch (1977). Arch. Eisenhüttenwes., 48, 649-652.
- (21) Starker, P. (1981). Dr.-Ing. Dissertation Universität Karlsruhe (TH).
- (22) Starker, P., H. Wohlfahrt und E. Macherauch (1981). 1st Int. Conf. on Shot Peening, Paris. Pergamon Press, 613-623.
- (23) Hempel, M. und E. Hillnhagen (1965). Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 1492, Westdeutscher Verlag, Köln-Opladen.
- (24) Wiegand, H. und G. Tolasch (1967). Härterei-Techn. Mitt., 22,.
- (25) Wohlfahrt, H. (1970). Dr.-Ing. Dissertation Universität Karlsruhe (TH).
- (26) de Graaf, A.B., R.J.H. Wanhill und A.V. de Koning (1975). Aluminium, 51, 514-519.
- (27) Starker, P., H. Wohlfahrt und E. Macherauch (1980). Eigenspannungen. Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, Oberursel, 319-330.
- (28) Starker, P., H. Wohlfahrt und E. Macherauch (1979). Fatigue of Engineering Materials and Structures, 1, 319-327.
- (29) Schreiber, R., H. Wohlfahrt und E. Macherauch (1978). Arch. Eisenhüttenwes., 49, 37-41.
- (30) Schreiber, R., H. Wohlfahrt und E. Macherauch (1977). In "Forschungsreport 1977". Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt/Main.
- (31) Schreiber, R., H. Wohlfahrt und E. Macherauch (1978). In "Forschungsreport 1978". Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt/Main.
- (32) Wohlfahrt, H. (1981). Vortrag 28th Sagamore, Lake Placid, N.Y. Veröffentlichung in Proc. 28th Sagamore Conf. demnächst.
- (33) Heeschen, J. (1979). Diplomarbeit Institut für Werkstoffkunde I, Universität Karlsruhe (TH).
- (34) Sarh, Engelking (1974). Persönliche Mitteilung.
- (35) Schrader, P. und W. Schütz (1977). Forschungsbericht aus der Wehrtechnik BMVg-FBWT 77-23, Dokumentationszentrum der Bundeswehr, Bonn.
- (36) Was, G.S. und R.M. Pelloux (1979). Metallurgical Transactions A, 10 A, 656-658.

- (37) James, M.R. (1981). Vortrag 28th Sagamore Conf., Lake Placid, N.Y., Veröffentlichung in Proc. 28th Sagamore Conf., demnächst.
- (38) Reed, E.C. und J.A. Viens (1960). Trans. ASME, 76-78.
- (39) Lütjering, G. (1980). Vortrag 109th AIME Annual Meeting, Las Vegas, Nevada.
- (40) Broichhausen, J. und H. van Kann (1977). Maschinenmarkt, 83, 537-539.
- (41) Heyl, G. (1977). Diplomarbeit Institut für Werkstoffkunde I, Universität Karlsruhe (TH).
Adam, P., P. Esslinger, R. Scharwächter, G. Heyl, H. Wohlfahrt und E. Macherauch, Veröffentlichung demnächst.
- (42) Franz, H.E. (1979). Härtereitechn. Mitt., 34, 24-37.
- (43) Verpoort, C., (1980). Dr.-Ing. Dissertation Ruhr-Universität Bochum.