

EINFLUSS DES KUGELSTRAHLENS AUF DIE SCHWINGFESTIGKEIT VON FEDERSTAHL BEI UNTERSCHIEDLICHER RANDENTKOHLUNG UND VERSCHIEDENEN REINHEITSGRADEN

K. H. Kloos und B. Kaiser

*Institut für Werkstoffkunde, Technische Hochschule Darmstadt,
Bundesrepublik Deutschland*

ZUSAMMENFASSUNG

Die Dauerhaltbarkeitseigenschaften von Bauteilen werden entscheidend durch den Zustand der Randzone beeinflusst. Als sehr wirksame und gleichzeitig wirtschaftliche oberflächentechnische Maßnahme zur Erhöhung der Schwingfestigkeit von hochbeanspruchten Federn wird seit längerer Zeit das Kugelstrahlen angewendet, wodurch vorteilhafte Druckeigenspannungssysteme in der Randzone erzeugt werden und die nachteilige Wirkung kleinerer Oberflächenfehler gemildert oder ganz aufgehoben werden kann. Außer geometrischen bzw. mikrogeometrischen Oberflächenfehlern können größere nichtmetallische Einschlüsse in Randnähe sowie Gefügeveränderungen infolge Randentkohlung und -oxidation die Schwingfestigkeitseigenschaften insbesondere von hochfesten Federn und Federstählen beeinträchtigen.

Die hier vorgelegten Ergebnisse aus insgesamt etwa 800 Torsionsschwellversuchen und zahlreichen begleitenden Untersuchungen an dem Federstahl 55 Cr 3 (Werkstoff-Nr. 1.7176) zeigen, daß durch Kugelstrahlen die Schwingfestigkeit gerade von Proben mit größeren nichtmetallischen Einschlüssen oder entkohlten Randzonen beträchtlich verbessert werden kann.

SCHLAGWORTE

Federstahl; Kugelstrahlen; Schwingfestigkeit; Randentkohlung; Randoxidation; nichtmetallische Einschlüsse; Reinheitsgrad; Zeitfestigkeitszahl.

EINLEITUNG

Die Einflüsse unterschiedlicher Reinheitsgrade bzw. verschiedener Einschlußgrößen und -typen auf das Ermüdungsverhalten von Stählen wurden in zahlreichen Arbeiten diskutiert (z.B. Buch, 1965; Cummings, Stulen und Schulte, 1958; Frith, 1955; Hempel, 1960; Tauscher und Fleischer, 1963), wobei übereinstimmend eine mit steigender Zugfestigkeit zunehmende Beeinträchtigung der Schwingfestigkeitseigenschaften durch nichtmetallische Einschlüsse beobachtet wurde.

In mehreren Untersuchungen wurde versucht, einen quantitativen Zusammenhang zwischen Reinheitsgrad und Dauerfestigkeit zu ermitteln (Atkinson, 1960; Cummings, Stulen und Schulte, 1957, 1965; Fisher und Sheehan, 1959), eine allgemeingültige Beziehung dafür konnte bisher nicht gefunden werden, was auf die Vielzahl der Einflußfaktoren und die unterschiedliche Bewertung der Einschlüsse zurückzuführen

sein dürfte. Bei der Beurteilung der Wirkung nichtmetallischer Einschlüsse wird die Meinung vertreten, daß Einschlüsse erst ab einer bestimmten Größe als Ausgangspunkte von Dauerbrüchen angesehen werden können, wobei diese kritische Größe von Cummings, Stulen und Schulte (1957, 1958, 1965) mit 10-15 μm , von Duckworth (1964) mit 15 μm , von Buch (1965) mit 10 μm und von Shih und Araki (1973) mit 20 μm angegeben wird.

Weiter nimmt Buch (1967) an, daß die Dauerhaltbarkeit von Bauteilen vor allem durch einzelne größere nichtmetallische Einschlüsse $\geq 30 \mu\text{m}$ nachteilig beeinflusst wird. Duckworth (1964) schlägt Kugelstrahlen oder Oberflächenrollen als Verfahren vor, um die Wirkung randnaher Einschlüsse auf die Ermüdungseigenschaften aufzuheben.

Auf die ebenfalls mit höher werdender Zugfestigkeit zunehmenden ungünstigen Einflüsse einer Randentkohlung wurde bereits häufig hingewiesen (Austin, 1931; Hankins und Becker, 1931; Jackson und Pochapsky, 1947; Lipsitt und Horne, 1957; Spiegler, Weiss und Taub, 1964; Spretnak und Wells, 1950), wobei die Tiefe der entkohlten Schicht bei biege- oder torsionsbeanspruchten Bauteilen von geringerer Bedeutung ist als der Zustand der äußersten Randzone.

De Belin und Riddihough (1931) sowie Watkinson (1956) führen die schädigende Wirkung der Randentkohlung auf die drei Einzelursachen Kohlenstoffverarmung, Korngrenzenoxidation und Ausbildung eines spröden Netzwerkes in der Randzone zurück. Buch und Chodorowsky (1967), Gassner (1979), Linhart (1968), Serensen (1954) und Watkinson (1956) beschreiben den günstigen Einfluß des Kugelstrahlens auf die Schwingfestigkeit randentkohlter Bauteile, wobei Watkinson verschiedene Gefügestände ohne und mit Kugelstrahlbehandlung untersucht und vor allem für Proben mit Netzwerk oder Korngrenzenoxidation enorme Verbesserungen durch das Strahlen erhält.

UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS DES KUGELSTRAHLENS AUF DIE SCHWINGFESTIGKEIT DES FEDERSTAHL 55 Cr 3 MIT UNTERSCHIEDLICHEM REINHEITSGRAD

Versuchsbedingungen

Für diese Untersuchungen standen drei im Siemens-Martin-Ofen erschmolzene Varianten des Federstahles 55 Cr 3 mit unterschiedlichem Reinheitsgrad zur Verfügung. Die mikroskopische Reinheitsgradbestimmung nach Stahl-Eisen-Prüfblatt 1570/71 ergab folgende Mittelwerte der Summenkennzahl für Oxide am Rundmaterial mit 36 mm ϕ : Variante A (guter Reinheitsgrad): 1,1 (K1), Variante B (mittlerer Reinheitsgrad): 1,7 (K1) und Variante C (schlechter Reinheitsgrad): 281 (K3).

Während die Varianten A und B unverändert aus Schmelzchargen gewonnen wurden, wurde die Variante C durch eine bewußt verschlechternde Sonderbehandlung erzeugt, die bereits beim Walzen dieses Materials erheblichen Ausschuß bedingte.

Aus den angelieferten Rundstababschnitten (3 m lang, 36 mm ϕ) wurden Torsionsproben mit 14₂ mm Prüfdurchmesser hergestellt, vergütet auf eine Zugfestigkeit von 1850 N/mm², geschliffen und entweder mechanisch poliert oder kugelgestrahlt.

Das Kugelstrahlen erfolgte unter den für warmgeformte Federn üblichen Betriebsbedingungen in einer Strahlanlage der Bauart Wheelabrator mit arrondiertem Stahldrahtkorn 0,8 mm ϕ und einer Almenintensität A2 = 0,52 mm.

Die etwa 400 Torsionsschwellversuche dieser Untersuchung wurden auf zwei Flachbiege- und Torsionsmaschinen (Bauart Schenck) bei 1500 Schwingspielen/min durchgeführt.

Die Mittelspannung betrug hierbei 500 N/mm² für polierte Proben und 550 N/mm² für kugelgestrahlte Proben.

Neben den Schwingversuchen wurden metallografische und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen vorgenommen, mit deren Hilfe die Art und die Größe der vorhandenen und eventuell bruchauslösenden nichtmetallischen Einschlüsse ermittelt und so eine Interpretation der Schwingergebnisse ermöglicht wurden.

Versuchsergebnisse

Vorversuche an polierten Proben zeigten, daß die Varianten A und B trotz des etwas besseren Reinheitsgrades von A gleiche Schwingfestigkeitswerte besitzen, während C deutlich schlechtere Ergebnisse mit großen Unterschieden zwischen den einzelnen Rundstababschnitten aufweist.

Für das Hauptversuchsprogramm wurden nur die Varianten B und C herangezogen, wobei zur Berücksichtigung der Reinheitsgrad-Unterschiede innerhalb der Variante C die Stangenabschnitte jeweils in gleich viele polierte und kugelgestrahlte Proben aufgeteilt wurden. Die Ergebnisse des Hauptprogramms sind in Abb. 1 dargestellt. Sowohl für die polierten als auch für die kugelgestrahlten Proben der Variante B ergaben sich übliche Streubänder, die mit Hilfe des arcsin-Verfahrens statistisch ausgewertet wurden (Zeitfestigkeitsbereich) und die hier durch die gestrichelt eingezeichneten Linien gleicher Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}} = 99, 50$ und 10% wiedergegeben sind. Aufgrund der weitaus größeren Streuung innerhalb der Variante C war eine sinnvolle statistische Auswertung nicht möglich, so daß hier nur die einzelnen Versuchspunkte für polierte bzw. kugelgestrahlte Proben eingetragen sind. Zur Auswertung dieser stark streuenden Schwingergebnisse und zur Ableitung von Beziehungen zwischen diesen Werten und den jeweils maßgebenden Einschlüssen wurde versucht, eine Zeitfestigkeitszahl zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit wechselnd beanspruchter Proben aus der Kombination von Beanspruchungshöhe und Bruchschwingspielzahl zu formulieren. Die verwendete Beziehung $Z = \tau_a \cdot \lg N$ hat zwar den Nachteil, daß Linien gleicher Zeitfestigkeitszahl bei der Eintragung in das Wöhler-Schaubild keine Geraden, sondern Hyperbeln ergeben. Aber ein Vergleich zwischen den an vergüteten und polierten Proben der Variante B statistisch ermittelten Linien gleicher Überlebenswahrscheinlichkeit und den mit $Z = \tau_a \cdot \lg N$ errechneten Linien gleicher Zeitfestigkeitszahlen zeigte, daß beide im interessierenden Bereich fast gleiche Steigungen besitzen und daher die Abweichungen vernachlässigbar sind (siehe ebenfalls Abb. 1). Aufgrund dieser Tatsache und der bereits vorliegenden guten Erfahrungen bei anderen Auswertungen wurde dieser Ansatz auch hier benutzt.

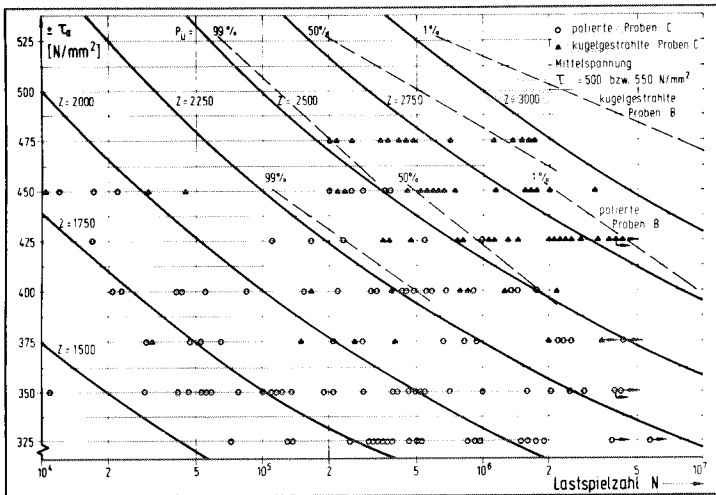


Abb. 1. Ergebnisse der Schwingversuche an polierten bzw. kugelgestrahlten Proben unterschiedlicher Stahlreinheit und Linien gleicher Zeitfestigkeitszahl

Mit der Zeitfestigkeitszahl Z lassen sich durchschnittliche Werte für Probengruppen ermitteln und so auch die Stangenabschnitte untereinander vergleichen. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Zeitfestigkeitszahlen für polierte und für kugelgestrahlte Proben der Varianten B und C zeigt Abb. 2, die daher auch einen direkten Vergleich zwischen polierten und kugelgestrahlten Proben aus dem gleichen Stangenabschnitt zuläßt. Bei der Variante B beträgt die durchschnittliche Steigerung der Zeitfestigkeitszahl durch das Kugelstrahlen 5 - 16 %, wobei an diesen Proben keine bruchauslösenden Einschlüsse an den Bruchausgängen ermittelt werden konnten. Die im polierten Zustand vergleichsweise schlechten Proben der Variante C mit größeren oxidischen Einschlüssen werden durch Kugelstrahlen in der Zeitfestigkeitszahl um 35 - 53 % verbessert. An fast allen Bruchausgängen dieser Proben wurden oxidische Einschlüsse mit Durchmessern ab 30 μm aufwärts nachgewiesen. An den Proben der Abschnitte C4 und C6 traten von Mangansulfidzeilen mit ca. 30 μm Durchmesser ausgehende Brüche auf, im polierten Zustand lagen diese Proben deutlich unterhalb der Variante B, im kugelgestrahlten Zustand jedoch sind sie mit B vergleichbar. Die Verbesserung der Zeitfestigkeitszahl dieser Proben betrug 21 bzw. 24 % durch das Kugelstrahlen.

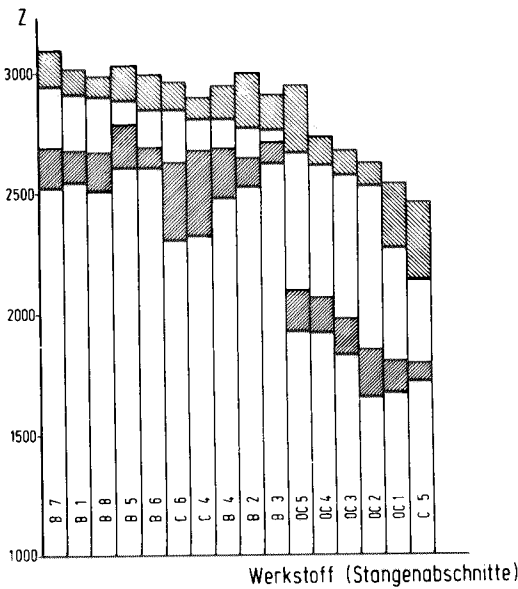


Abb. 2. Mittelwerte und Standardabweichungen der Zeitfestigkeitszahl nach Stangenabschnitten.
 poliert =

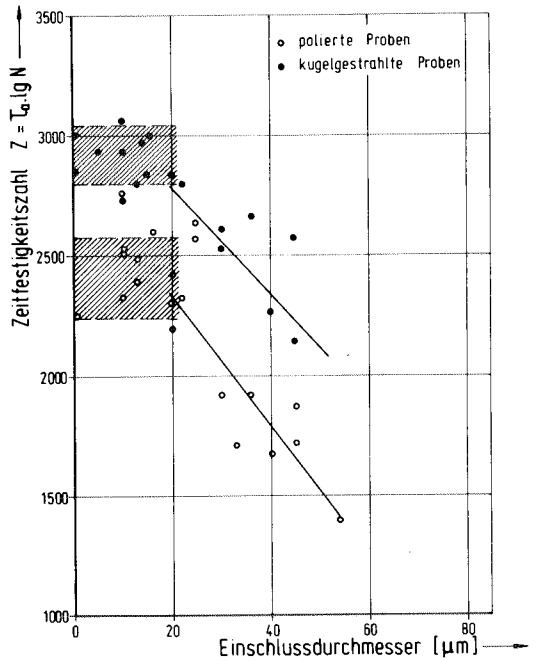


Abb. 3. Zeitfestigkeitszahlen und Einschlußdurchmesser polierter und kugelgestrahlter Proben

Stellt man eine Beziehung zwischen den aus den Schwingversuchen ermittelten Zeitfestigkeitszahlen und der Größe der jeweils bruchauslösenden Einschlüsse her, erhält man Abb. 3. Sie zeigt, daß unterhalb einer Einschlußgröße von 20 μm keine Abhängigkeit der Schwingfestigkeitseigenschaften von der Größe der nichtmetallischen Einschlüsse vorliegt, während mit zunehmender Einschlußgröße die Zeitfestigkeitszahlen oberhalb von 30 μm deutlich abnehmen.

UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS DES KUGELSTRAHLENS AUF DIE
SCHWINGFESTIGKEIT DES FEDERSTAHLSES 55 Cr 3 BEI VERSCHIE-
DENER RANDENTKOHLUNG

Versuchsbedingungen

Als Versuchswerkstoff diente die oben genannte Variante B (mittlerer Reinheitsgrad) des Werkstoffs 55 Cr 3. Die Randentkohlungsbehandlungen wurden in einer Eigenbaulaborglühanlage in einem feuchten Gemisch aus 80 % Stickstoff und 20 % Wasserstoff durchgeführt. Im ersten Versuchsabschnitt wurden 10, 30 und 90 min entkohlte und direkt aus der Entkohlungstemperatur vergütete Proben mit salzbadvergüteten Proben verglichen, wobei jeweils ein Teil der Proben mit $A_2 = 0,52$ kugelgestrahlt wurde. Im zweiten Versuchsprogramm wurden 20, 50 und 90 min entkohlte Proben an Luft abkühlen lassen, zur Entfernung von Randoxidation leicht poliert und zusammen mit nicht entkohlten Proben in einem gasbeheizten Muffelofen austenitisiert. Anschließend wurde die Mehrzahl dieser Proben kugelgestrahlt, wobei drei verschiedene Werte der Almenintensität eingestellt wurden ($A_2 = 0,42$, $0,52$ und $0,60$). Die übrigen Versuchsbedingungen entsprachen den oben beschriebenen, wobei die Dauerfestigkeitswerte aus 20 bzw. 10 Ergebnissen je Wöhlerkurve als 50 % - Werte geschätzt wurden; die Auswertung der Zeitfestigkeitsergebnisse konnte auch hier mit der Zeitfestigkeitszahl erfolgreich vorgenommen werden.

Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse des ersten Versuchsabschnittes sind in Abb. 4 dargestellt. Bei den nicht kugelgestrahlten Proben zeigt sich bereits eine deutliche Verringerung der Dauerfestigkeit von dem salzbadvergüteten und schlußpolierten Zustand zu dem nur salzbadvergüteten sowie eine weitere Abnahme bei dem 10 min entkohlten Zustand, dessen Dauerfestigkeit allerdings auch von den länger entkohlten Proben erreicht wird. Eine Erklärung dieser Ergebnisse ist vor allem durch metallografische Unter-

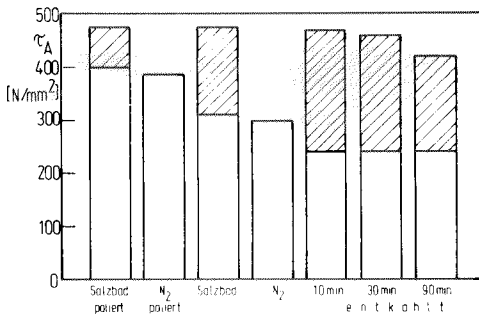


Abb. 4. Dauerfestigkeitswerte des ersten Versuchsabschnittes
 = kugelgestrahlt

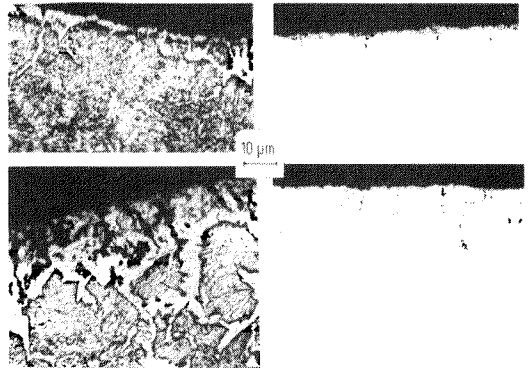


Abb. 5. Randgefüge (links) und -oxidation bei 10 min (oben) und 90 min entkohlten Proben

suchungsbefunde möglich (siehe Abb. 5). Während die salzbadvergütete Probe praktisch frei von Randoxidation und Gefügeveränderungen ist, sind bereits bei der 10 min entkohlten Probe von den Korngrenzen ausgehende ferritische Bezirke bis zu 25 µm Tiefe und Korngrenzenoxidation bis 10 µm Tiefe zu beobachten. Mit zunehmender Entkohlungszeit nimmt zwar die Tiefe dieser Zonen zu, wodurch aber die Dauerfestigkeit nicht weiter vermindert wird.

Bei kugelgestrahlten Proben wird die Schwingfestigkeit durch vorausgegangene Ent-

kohlung vergleichsweise wenig beeinflusst, bei starker und tiefreichender Entkohlung allerdings wird der Dauerfestigkeitsabfall auch für kugelgestrahlte Proben erkennbar. Die Verbesserung durch das Kugelstrahlen betrug hier in der Reihenfolge der Abb. 4 von links beginnend: 19, 51, 96, 92 und 75 %.

Die Dauerfestigkeitswerte des zweiten Versuchsabschnittes sind in Abb. 6 dargestellt, wobei die nicht vorentkohlten und nicht kugelgestrahlten Proben sich schon deutlich schlechter verhalten als die salzbadvergüteten Proben der ersten Versuche. Demgegenüber weisen die 20 min entkohlten Proben eine kaum niedrigere, die 50 und 90 min entkohlten Proben eine doch deutlich geringere Schwingfestigkeit auf.

Die Ergebnisse kugelgestrahlter Proben zeigen keine klare Abhängigkeit zur Kugelstrahlintensität. Durch Kugelstrahlen ergaben sich Verbesserungen von 75 % (nicht entkohlt), 80 % (20 min entk.), 87 % (50 min entk.) und 85 % (90 min entk.).

Die niedrige Dauerfestigkeit des nicht vorentkohlten Zustandes des 2. Versuchsabschnittes ist auf eine Netzwerkbildung in der Randzone zurückzuführen (siehe Abb. 7), die durch die relativ lange Verweilzeit der Proben in dem gasbeheizten Ofen verursacht worden sein dürfte.

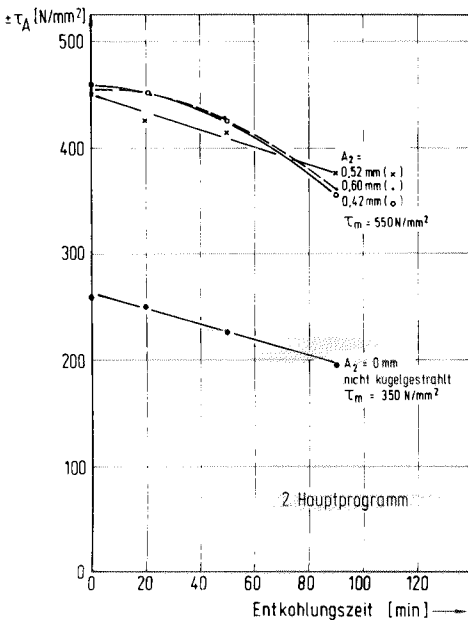


Abb. 6. Dauerfestigkeitswerte unterschiedlich entkohlter und oberflächenbehandelter Proben

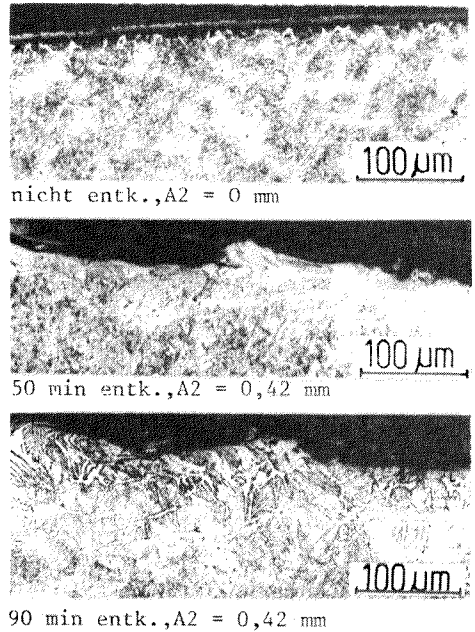


Abb. 7. Randgefüge unterschiedlich entkohlter und oberflächenbehandelter Proben

Insgesamt ist festzustellen, daß durch Kugelstrahlen die Schwingfestigkeit von Proben mit geringer Entkohlung auf das Niveau nicht entkohlter kugelgestrahlter Proben heraufgesetzt werden, stärker entkohlte Proben werden zwar durch das Kugelstrahlen wesentlich verbessert, erreichen aber nicht den Vergleichswert nicht entkohlter kugelgestrahlter Proben. Die Oberflächenrauheit der Proben nimmt durch das Strahlen deutlich zu, die Rauhtiefe wird mit zunehmender Entkohlung (abnehmende Randhärte) größer. Bei höheren Strahlintensitäten ist aufgrund der vergrößerten Strahlmittelmenge und des erhöhten Bedeckungsgrades eine Einebnung zu beobachten.

SCHLUSSBEMERKUNGEN

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse zeigen, daß das Kugelstrahlen in allen untersuchten Fällen zu einer Verbesserung der Schwingfestigkeitseigenschaften führt und insbesondere bei Proben mit entfestigten Randzonen oder Spannungsspitzen im randnahen Bereich sehr hohe Steigerungsbeträge ermöglicht. Daher kommt diesem Verfahren gerade für die Oberflächenbehandlung von Schraubenfedern eine große Bedeutung zu, weil bei der fertigen warmgeformten Schraubenfeder grundsätzlich nicht von einer polierten Oberfläche, sondern von einer technisch und wirtschaftlich vertretbaren Randzone mit kleinen geometrischen und Gefüge-Fehlern ausgegangen werden muß.

Die positive Wirkung des Kugelstrahlens bei Proben mit größeren randnahen Einschlüssen ist in erster Linie mit der Ausbildung eines günstigen Druckeigenspannungssystems in der Randzone zu erklären, das die Spannungsspitzen dieser Einschlüsse kompensiert. Einschlüsse, die unterhalb dieser Druckeigenspannungszone bzw. in der Nähe des Nulldurchganges des Eigenspannungsverlaufes liegen, können daher im kugelgestrahlten Zustand zu Ausgangspunkten von Ermüdungsbrüchen bei wesentlich höheren ertragbaren Schwingbeanspruchungen als im nicht gestrahlten Zustand werden. Die bei der vorgelegten Untersuchung beobachteten Brüche kugelgestrahlter Proben mit größeren Einschlüssen gingen fast alle von einem Einschluß in einer Tiefe von 400 bis 600 µm unter der Oberfläche aus.

Bei stärker randentkohlten Proben führt das Kugelstrahlen neben der Druckeigenspannungsbildung zu einer meßbaren Randverfestigung, wodurch die Wirkung der Kohlenstoffverarmung zumindest teilweise kompensiert wird. Weiterhin führt die oft gleichzeitig mit der Entkohlung auftretende innere Oxidation bzw. die Netzwerkbildung zu Mikro-Spannungsspitzen in der Randzone, die sich im nicht gestrahlten Zustand sehr nachteilig auf die Schwingfestigkeitseigenschaften auswirken können. Die durch das Kugelstrahlen erzeugten Druckeigenspannungen führen auch hier zu einer weitgehenden Kompensation dieser Kerbwirkung, wobei jedoch die im Einzelfall vorliegenden Entkohlungs- bzw. Werkstoffzustände und die Strahlbedingungen von großem Einfluß auf die erreichbare Schwingfestigkeit sind.

- - - - -

Die vorliegenden Untersuchungen wurden durch Mittel der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) und des Verbandes der Deutschen Federnindustrie unterstützt, wofür an dieser Stelle herzlich gedankt wird.

SCHRIFTTUM

- Atkinson, M. (1960). The influence of non-metallic inclusions on the fatigue properties of ultra-high-tensile steels. J. ISI, 195, 64-74.
- Austin, C.R. (1931). Effect of surface decarburization on fatigue properties of steel. Metals and alloys, 117-119.
- Buch, A. (1965). Die Verbindung zwischen der Stahlreinheit, den Querzugwerten und der Anisotropie der Dauerfestigkeit. Materialprüfung 7, 1-5.
- Buch, A. (1967). Einfluß der Stahlreinheit und Stahlhärte auf die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften von Schmiedestücken. IfL-Mitt. 6, 402-408.
- Buch, A. und J. Chodorowsky (1967). Einige Untersuchungen über den Einfluß der Oberflächenbehandlung auf die Ermüdungseigenschaften der Stähle. HTM-Mitt. 22, 157-159.

- Cummings, H.N., F.B. Stulen und W.C. Schulte (1957). Relation of inclusions on the fatigue properties of SAE 4340 steel. Trans. ASM 49, 482-516.
- Cummings, H.N., F.B. Stulen und W.C. Schulte (1958). Tentative fatigue strength reduction factors for silicate-type inclusions in high-strength steels. Proc. ASTM 58, 505-514.
- De Belin, G.A. und M. Riddihough (1931). Diskussionsbeitrag zu Hankins und Becker (1931). J. ISI 124, 445-448.
- Duckworth, W.E. (1964). The achievement of high fatigue strength in steel. Metallurgia 69, 53-55.
- Fisher, J.J. und J.P. Sheehan (1959). Effect of metallurgical variables on the fatigue strength of AISI 4340. Steel Armour Research Foundation, Wright Air Development Center, Techn. Rep., Febr. 1959, 58-289.
- Frith, P.H. (1955). Fatigue test on rolled alloy steels made in electric and open-hearth-furnaces. J. ISI 180, 26-33.
- Gassner, R.H. (1979). Update on AMEC's decarburization Program. Metal Progress, 51-55.
- Hankins, G.A. und M.L. Becker (1931). The effect of surface conditions produced by heat treatment on the fatigue resistance of steels. J. ISI 124, 387-460.
- Hempel, M. (1960). Über einige technologische Einflüsse auf die Dauer-schwingfestigkeit von Stählen. Draht 11, 589-601.
- Jackson, L.N. und J.E. Pochapsky (1947). The effect of composition on the fatigue strength of decarburized steels. Trans. ASM 39, 45-60.
- Linhart, V. (1968). Zum Einfluß der Entkohlung auf die Ermüdungsfestigkeit von Federstahl. IfL-Mitt. 7, 268-276.
- Lipsitt, H.A. und G.T. Horne (1957). The fatigue behavior of decarburized steel. Proc. Amer. Soc. f. Test. Mat., Vol. 57, 587-600.
- Serensen, S.W. (1954). Höhere Gestaltfestigkeit durch Oberflächenverfestigung. Verlag Technik, Berlin.
- Shih, T. und T. Araki (1973). The effect of non-metallic inclusions and microstructures on the fatigue crack initiation and propagation in high strength carbon steels. Trans. ISIJ 13, 11-19.
- Spiegler, B., B.Z. Weiß und A. Taub (1964). Influence of decarburization on the fatigue properties and the propagation of cracks in silicon steels. J. ISI 509-517.
- Sprentak, J.W. und C. Wells (1950). An engineering analysis of the problem of quench cracking in steel. Trans. ASM 42, 233-269.
- Stulen, F.B., H.N. Cummings und W.C. Schulte (1965). Relation of inclusions to the fatigue Properties of high-strength steels. Proc. Intern. Conf. on Fatigue of Metals, 439-444.
- Tauscher, H. und H. Fleischer (1963). Einfluß der Vakuum-Umschmelzung auf die Eigenschaften des hochfesten Vergütungsstahles 40 SiCrNi 7 5. Neue Hütte 8, 326-329.
- Watkinson, J. (1956). The influence of some surface factors on the torsional fatigue strength of spring steels. Proc. of the Intern. Conf. on Fatigue of Metals, 1956, 445-458.