

# BEGINNENDE ZERSTÖRUNG VON METALLOBERFLÄCHEN DURCH WASSERSTRAHLSCHLAG

Von

F. VASVÁRI

(Lehrstuhl für elektrotechnische Werkstofftechnologie)

(Eingegangen am 22. August 1961)

## Einleitung

Metalle werden unter der Einwirkung von wiederholten Wasserstrahlschlägen zerstört. Der Charakter der Zerstörung durch Wassersschlag ist der Kavitation ähnlich. Bei den Forschungen werden im Hinblick auf diese Ähnlichkeit statt der langwierigen Untersuchung der Kavitationszerstörungen die einfachen Untersuchungen mit Hilfe des Wasserstrahlschlages (Wasserschlag) vorgenommen, obwohl die Fachliteratur der Werkstoffzerstörung durch Wasserschlag eine qualitativ andere Beschaffenheit zuschreibt. Die Brauchbarkeit der Prüfung durch Wassersschlag ergibt sich daraus, daß die Reihenfolge der Widerstandsfähigkeit der verschiedenen Metalle und Legierungen gegen Wasserschlag und Kavitation erfahrungsgemäß die gleiche ist.

Im folgenden soll über einen Teil einer umfangreicheren Forschungsarbeit [1], d. h. über die Wirkung des Wasserstrahlschlages auf die Werkstoffoberfläche berichtet werden. Im Verlauf dieser Untersuchungen wurden von den Materialoberflächen, die einer kurz andauernden Zerstörung durch Wasserschlag und Magnetostriktion ausgesetzt worden waren, elektronenmikroskopische Aufnahmen mit einer 5000—20000fachen Vergrößerung angefertigt, die einen tieferen Einblick in den Mechanismus der Zerstörung durch Wasserschlag sowie in den Mechanismus der Zerstörung durch Kavitation vermittelten. Im vorliegenden Aufsatz wollen wir die Wirkung des Wasserstrahlschlages auf die Materialoberfläche behandeln.

Die beiden Arten der Untersuchung deckten einige gemeinsame Züge auf, die die qualitative Übereinstimmung der Oberflächenzerstörung durch Wasserschlag und Kavitation erklärlich machen.

## II. Versuchsanordnung, Untersuchungsmethode und Stoffkonstanten

Die Zerstörung durch Wasserschlag an Prüfkörpern verschiedener Stoffstruktur wurde mit der Wasserschlagzerstörungsanlage der Maschinenfabrik GANZ-MÁVAG durchgeführt. Diese Vorrichtung besteht aus einer Scheibe, die durch einen Motor mit einer Drehzahl von 2 930 U/min angetrieben wird.

Am Umfang der Scheibe sind drei Einspannköpfe angeordnet, in denen die Prüfkörper befestigt werden, die mit ihrer Stirnfläche nach jeder halben Umdrehung auf einen achsparallel zugeführten Wasserstrahl aufschlagen. Das Wasser für den Wasserstrahl wird aus einem unter der Vorrichtung befindlichen Sammelbecken durch eine Pumpe in einen Behälter mit Überlauf hochgepumpt.

Der Überlauf ist 7,2 m hoch über der Düse angeordnet. Die beiden Düsen — mit Durchmessern von 8 mm — sind an einem um die Welle der rotie-

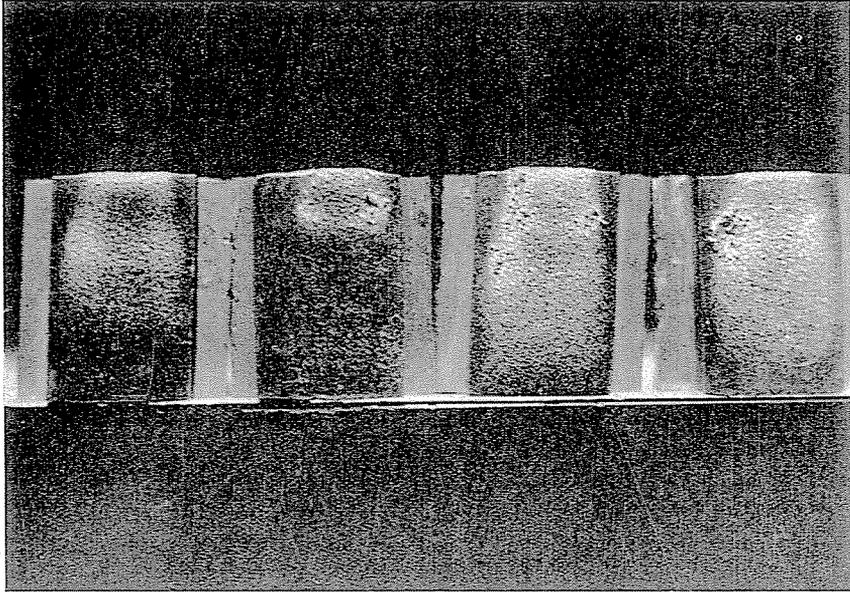


Abb. 1. Wasserschlag-Prüfkörper (1,5×)

renden Scheibe gezogenen Kreis mit einem Durchmesser von 628 mm, gegeneinander um 180 Grad verstellt.

Die gleichzeitig der Zerstörung unterzogenen drei Probekörper erhalten bei jeder Umdrehung zwei Wasserschläge, somit 97 Wasserschläge je Sekunde. Als Prüfdauer wurden 5—10 Sekunden gewählt. Während dieser Zeitspanne erhielten die Prüfkörper mithin 500—1 000 Wasserschläge, die an der Oberfläche eine mit freiem Auge noch nicht erkennbare Veränderung verursachten.

Die Abmessungen der Probekörper betragen  $20 \times 20 \times 9$  mm; an beiden Rändern der Prüfkörper war je eine Arbeitsleiste von 3 mm Dicke zum Einspannen abgearbeitet, so daß die Breite der der Zerstörung ausgesetzten Oberfläche auf 14 mm verringert war. Eine Reihe stark zerstörter Prüfkörpern ist in Abb. 1 dargestellt. Die der Zerstörung unterzogene Oberfläche war zuvor auf Hochglanz poliert worden. Nach der Zerstörungsprüfung wurde die Ober-

fläche unverzüglich mit Alkohol abgewaschen und gegen Oxidation mit einem Kolloidüberzug versehen.

Von den zerstörten Oberflächen wurden auf der mikromorphologischen Abteilung des Institutes für Technische Physik der Ungarischen Akademie der Wissenschaften elektronenoptische Aufnahmen angefertigt. Es wurden verschiedene Stoffstrukturen untersucht, um Gesetzmäßigkeiten feststellen zu können, die von den Kennzahlen der einzelnen Stoffarten unabhängig sind. Insgesamt wurden zwei reine Metalle, u. zw. Aluminium mit einer Reinheit von 99,7% und Elektrolytkupfer, weiters vier verschiedene Werkstoffe, Bronzeguß Br. ö. 12, Gußeisen mit Steaditnetzgefüge Ö. v. 22, (C = 3,29—3,31%, Si = 1,44—1,68%, Mn = 0,66—1,06%, P = 0,393—0,684%), ferner chrom-nickellegierter rostfreier Stahl Kor. 5.18/8 und schließlich 0,5% C enthaltender Stahl A 60.11, untersucht.

### III. Untersuchungsergebnisse

An den angeführten Stoffen konnten folgende charakteristische Erscheinungen beobachtet werden:

#### 1. Aluminium (Abb. 2—4).

An der Oberfläche können ringsum eingerissene Vertiefungen beobachtet werden, deren Durchmesser zwischen 0,5 und 2,0  $\mu\text{m}$  liegt. Die Risse um die Spuren sind im allgemeinen 0,1  $\mu\text{m}$  breit. Außerdem können noch kleinere 0,2—0,5  $\mu\text{m}$  große Vertiefungen beobachtet werden. An einzelnen Stellen neben den Rissen weist die Oberfläche eine kugelförmige Schmelzform auf.

#### 2. Elektrolytkupfer (Abb. 5—7).

An zwei Aufnahmen der kupfernen Prüfkörper können ringsum eingerissene, 0,3—2,0  $\mu\text{m}$  messende Stellen mit glatter Innenfläche beobachtet werden, die gleich den am Aluminium beobachteten Rissen eine unregelmäßige Form zeigen. Auch die Größe der Risse ist nahezu die gleiche.

Abb. 7 zeigt eine neue Form, u. zw. eine Wellung an der Oberfläche mit einem dem Kaltfließen ähnlichen Gleitliniennetz des Stoffgefüges und an einer Stelle mit einem 0,2  $\mu\text{m}$  breiten Riß. Auf dieser Aufnahme sieht auch das Innere der ringsum rissigen und aller Wahrscheinlichkeit nach in der ersten Phase der Zerstörung entstandenen Spuren narbig aus, während sich der Riß nahe daran auf 0,5  $\mu\text{m}$  verbreitet.

#### 3. Bronzeguß (Abb. 8—10).

An der Oberfläche des Werkstoffes lassen sich wie bei den bereits erwähnten reinen Werkstoffen ringsum rissige Spuren, die für das Kaltfließen charakteristischen Gleitlinien sowie die Wellung beobachten.



Abb. 2

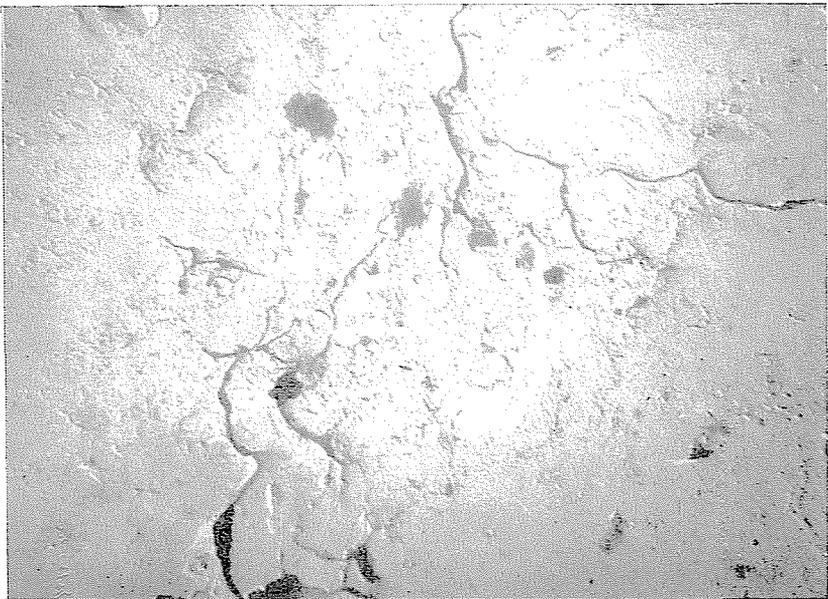
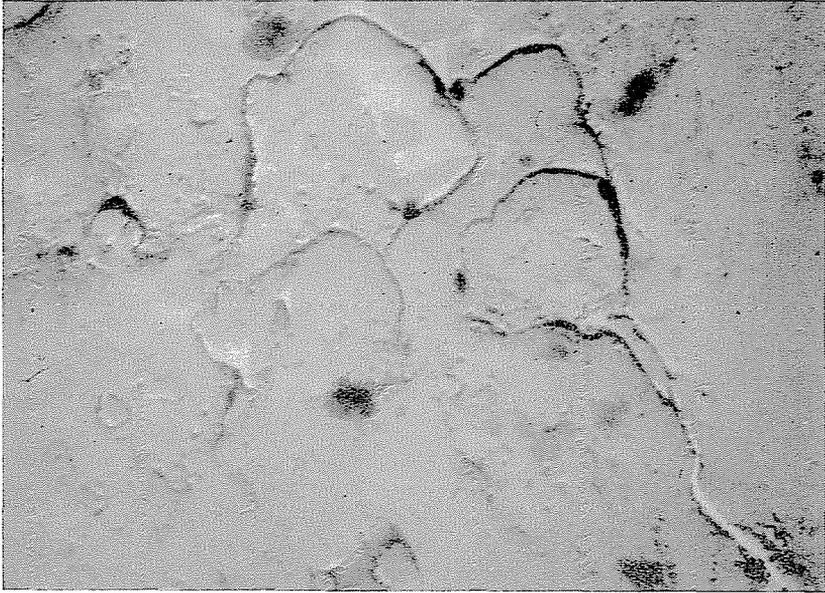
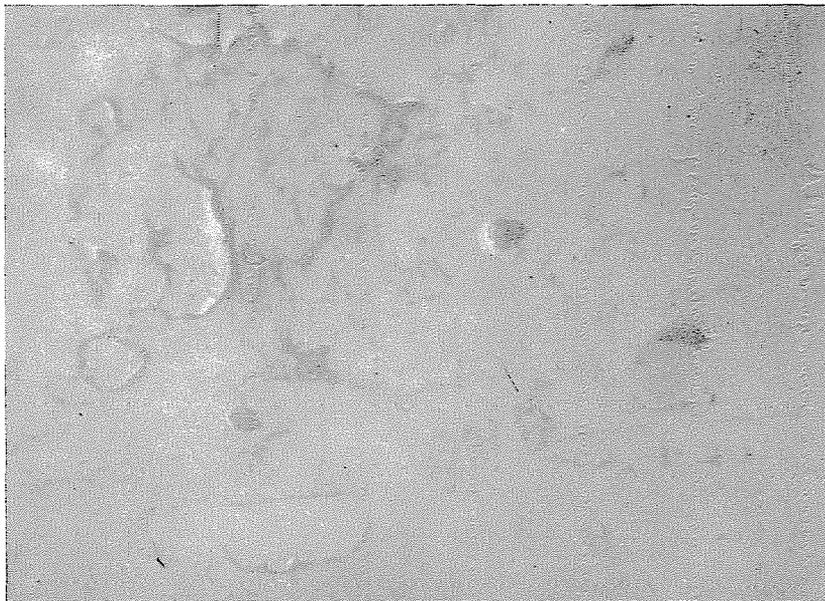


Abb. 3

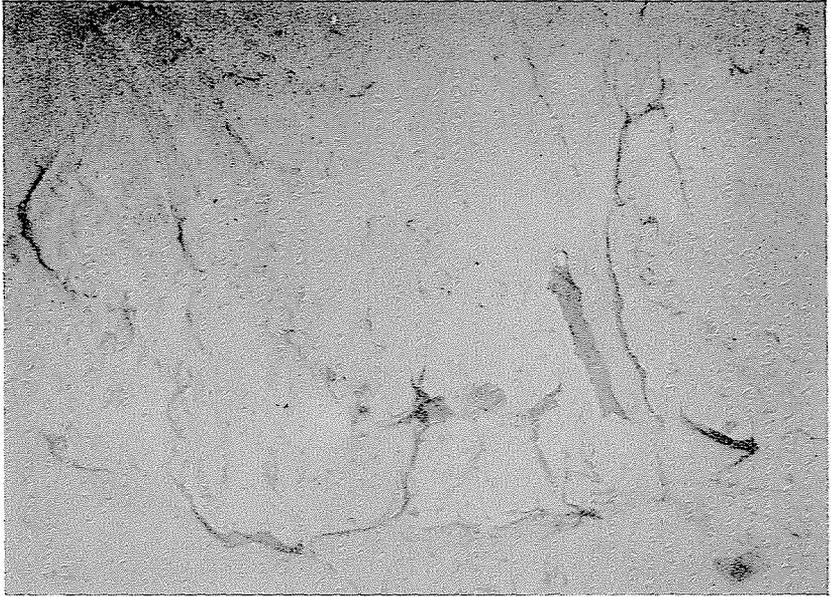
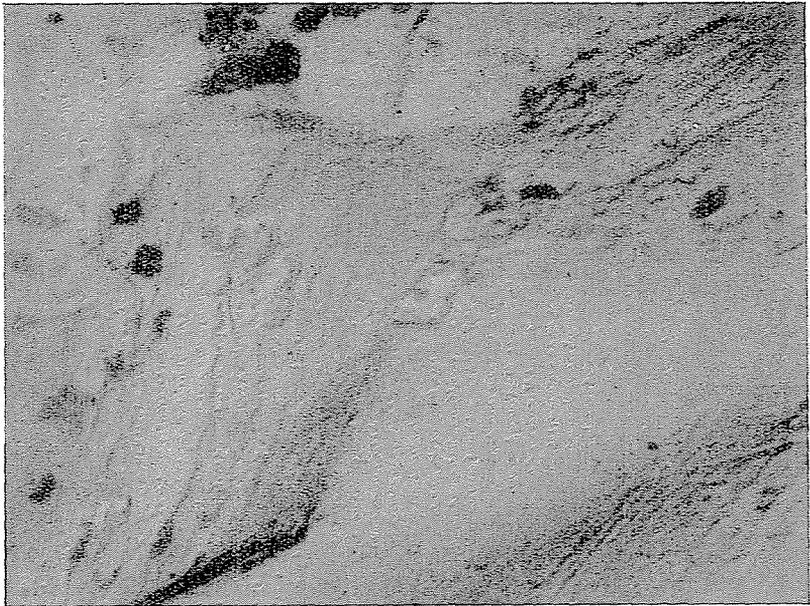


*Abb. 4*

*Abb. 2-4.* Aluminium, 5 Sekunden der Beanspruchung durch Wasserschlag ausgesetzt  
(Vergrößerung 11 000  $\times$ , 5400  $\times$  bzw. 11 000  $\times$ )



*Abb. 5*

*Abb. 6**Abb. 7*

*Abb. 5–7.* Oberfläche von Kupfer, 10 Sekunden der Beanspruchung durch Wasserschlag  
(Vergrößerung 10 600 $\times$ , 11 000 $\times$  bzw. 10 000 $\times$ )

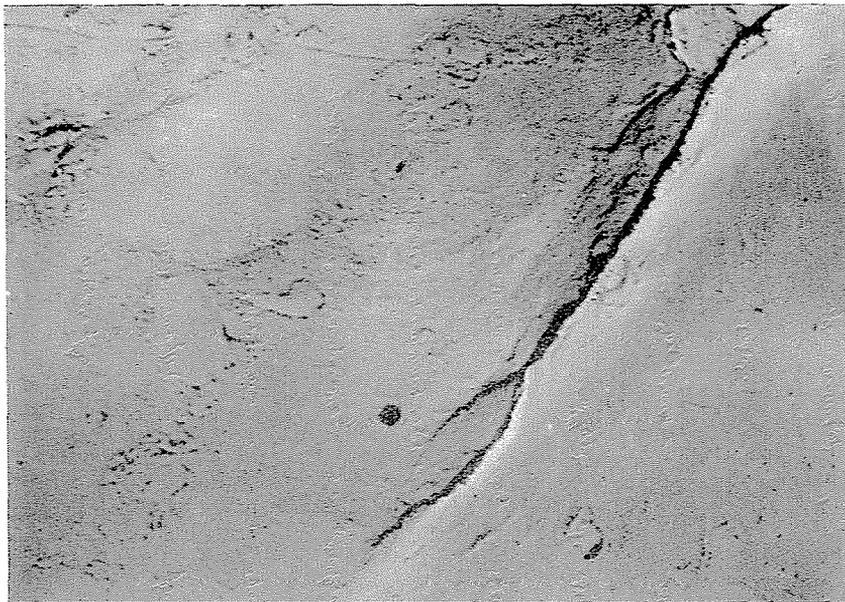


Abb. 8

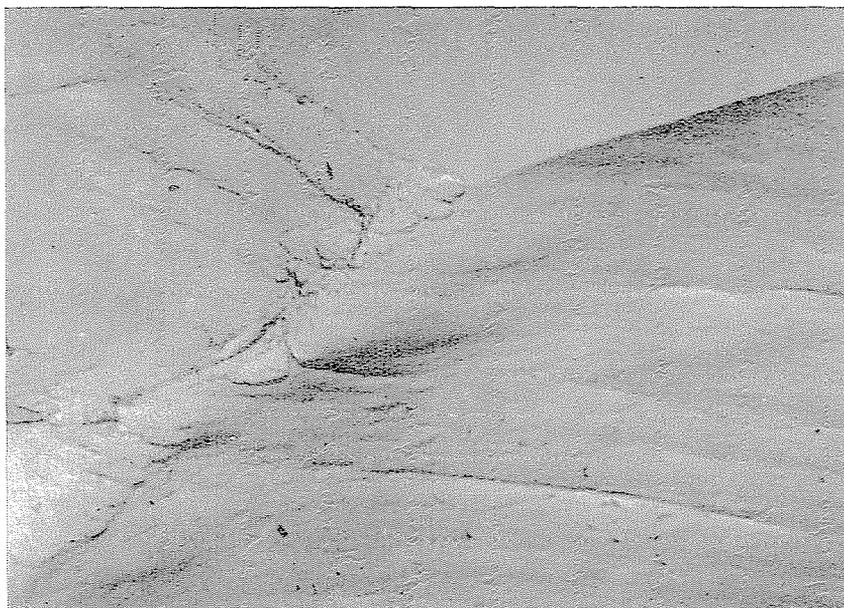


Abb. 9

Die einzelnen Aufnahmen zeigen aber auch lange gerade Risse mit punktartigen Unebenheiten in ihrer Nachbarschaft. Es kann angenommen werden, daß sich diese an der weicheren Komponente der Bronze (*Sn*) bilden, während die härteren Kristalle (*Cu*) tafelartig im Kreis rissig werden. Die an der Oberfläche dieser Kristalle erscheinenden Gleitlinien weisen auf die Erscheinung des Kaltfließens hin.



Abb. 10

Abb. 8—10. Oberfläche von Bronze, 10 Sekunden lang der Beanspruchung durch Wasserschlag ausgesetzt. (Vergrößerung 12 600 $\times$ )

#### 4. Gußeisen (Abb. 11—14).

Aus den Abbildungen 11 und 14 geht deutlich hervor, daß die beginnenden Risse der Kristallgrenze entlang entstehen. Die winzigen Kreisrisse mit einem Durchmesser von etwa 0,2—2,0  $\mu\text{m}$  an der Oberfläche der Kristalle sind auch hier deutlich erkennbar. Da Gußeisen spröder ist als Kupfer, konnten keine Gleitlinien zustande kommen. Als Folge der Sprödigkeit sind auch die winzigen unregelmäßigen Risse der Oberfläche zu deuten (Abb. 13). An der Oberfläche ist ein interessantes Gebilde sichtbar: vermutlich handelt es sich hierbei um die Zerstörung eines Graphit- oder Oxydkorns. Die elektronenmikroskopische Reproduktionstechnik ist zwar noch nicht geeignet, dies genau nachzuweisen, doch lassen die dunkleren Flecke am Präparat auf die Gegenwart von Graphit oder Oxyd schließen, die sich später bei der weiteren

Beanspruchung von der Oberfläche des Stoffes abscheiden und im Kolloidpräparat haften bleiben. Die Risse und die linienartige Aderung des Stoffgefüges weicht von diesen oxydischen und graphitischen Spuren stark ab.

5. *Rostfreier Stahl Kor. 5.* (Abb. 15—16).

An der Oberfläche dieses Werkstoffes, der für seine Kavitationsfestigkeit allgemein bekannt ist, lassen sich die ringsum rissigen Spuren mit feiner Innenfläche gleichfalls beobachten, doch finden sich auf diesen Aufnahmen keine Spuren einer plastischen Verformung, ein Umstand, der auf die hohe Festigkeit und das feine Korngefüge zurückgeführt werden kann. An Stelle

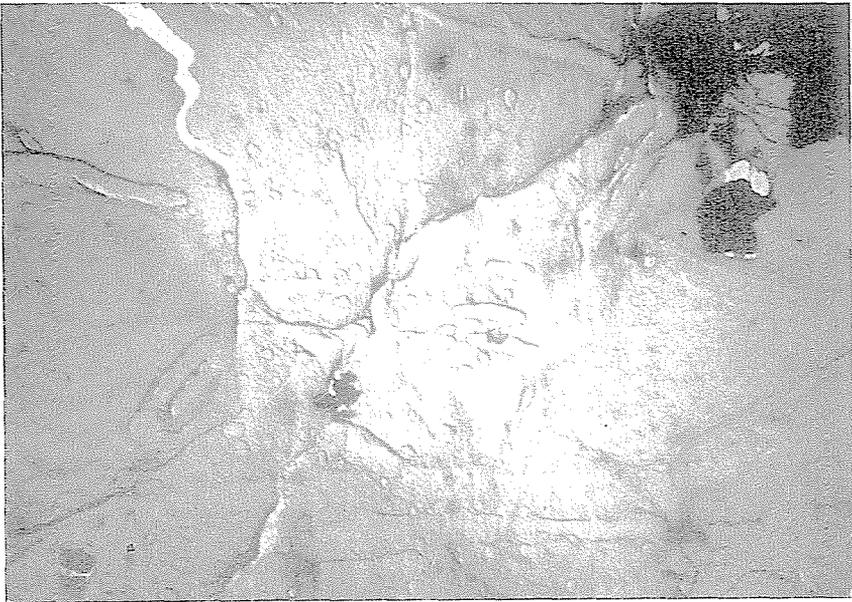


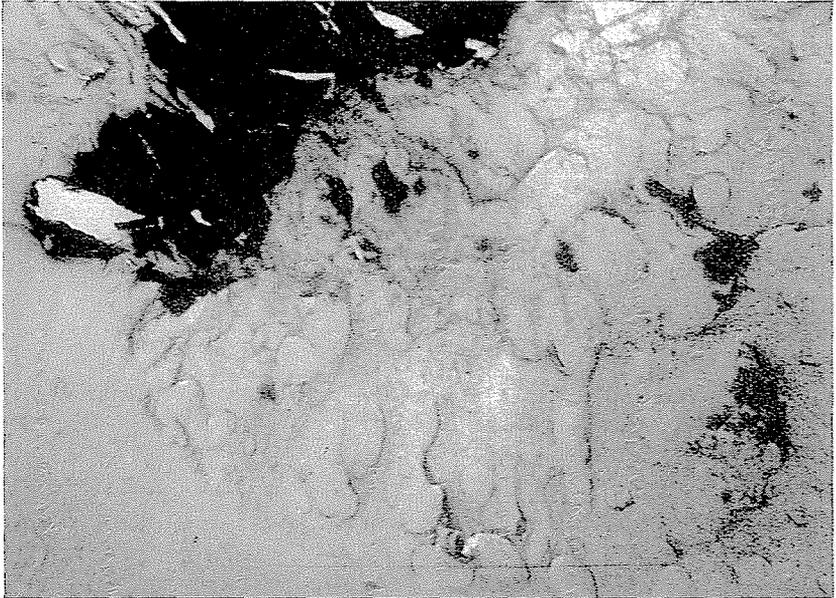
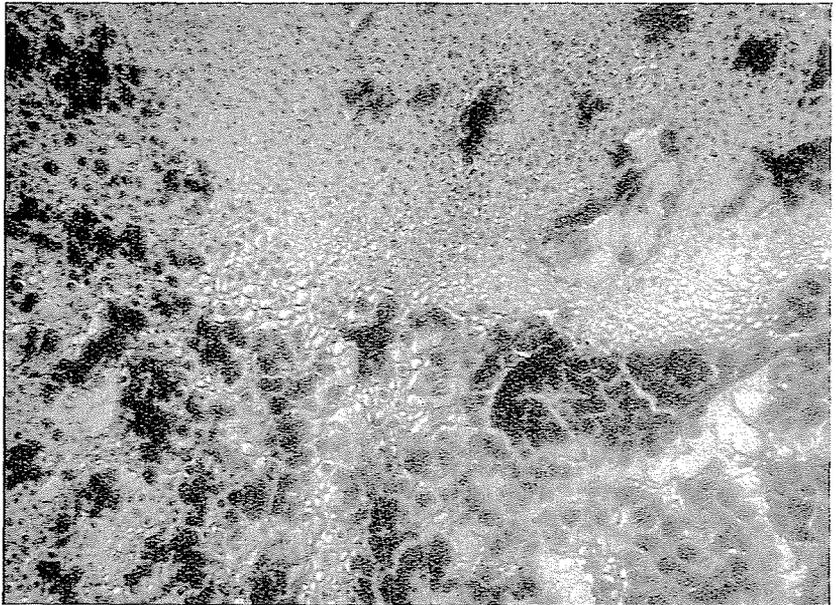
Abb. 11

der Linien des Kaltfließens wird hier die Kristallstruktur selbst sichtbar, als wäre der Werkstoff geätzt worden.

Der Kristallitgrenze entlang sowie in der Mitte der einzelnen Kristallite sind kreisförmige Risse zu entdecken.

6. *Stahl mit 0,5% C* (Abb. 17—19).

An der Oberfläche des Werkstoffes können auch hier wie bei geätzten Präparaten die Kristallite beobachtet werden, doch sind hier an den größeren Kristalliten auch die charakteristischen Gleitlinien des Kaltfließens erkennbar.

*Abb. 12**Abb. 13*

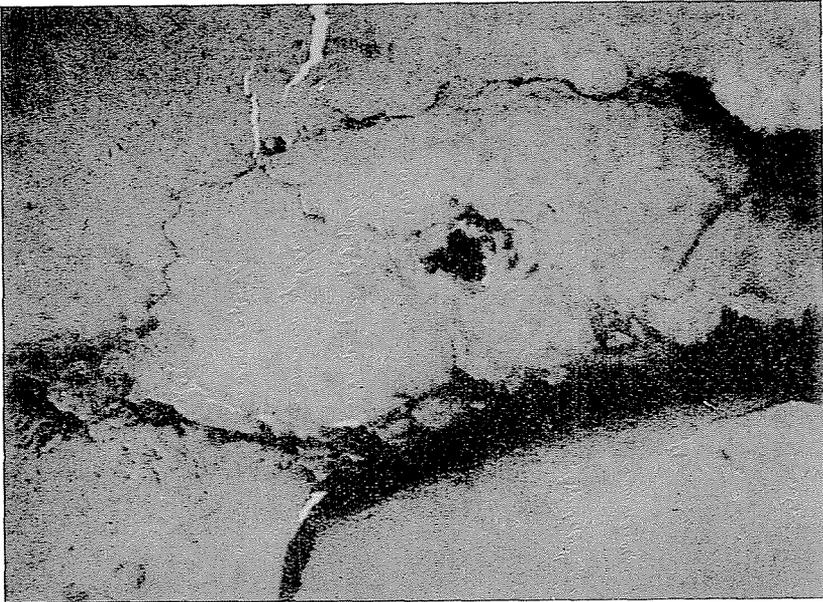


Abb. 14

Abb. 11–14. Oberfläche von Gußeisen, 8 Sekunden lang der Beanspruchung durch Wasserschlag ausgesetzt. (Vergrößerung 5500 $\times$ , 5500 $\times$  bzw. 7800 $\times$ )

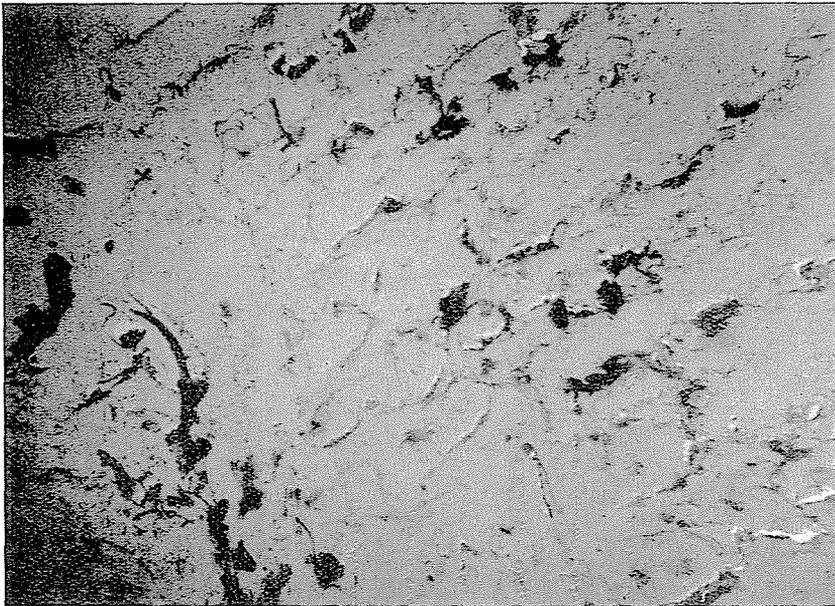
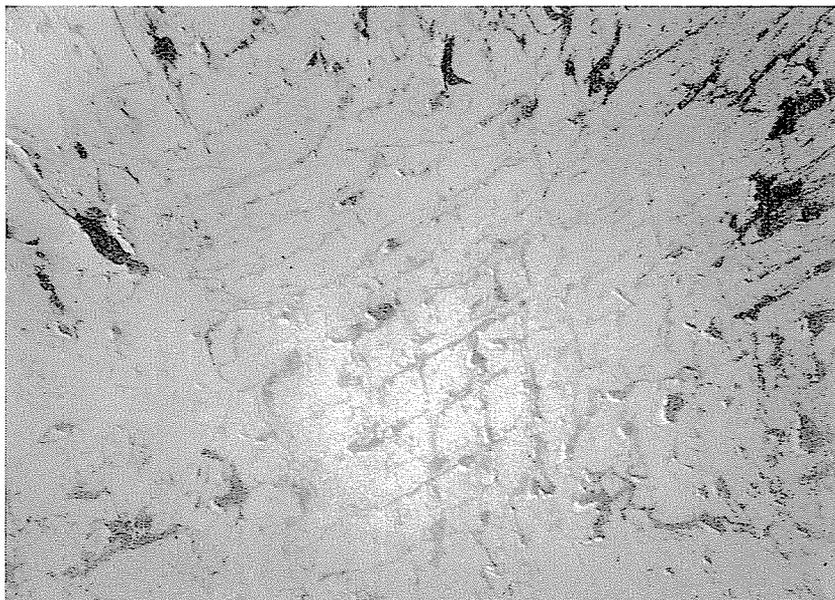


Abb. 15

*Abb. 16*

*Abb. 15—16.* Oberfläche von Stahl Kor. 5., 10 Sekunden lang der Beanspruchung durch Wasser-  
schlag ausgesetzt. (Vergrößerung 4300 $\times$  bzw. 4500 $\times$ )

*Abb. 17*

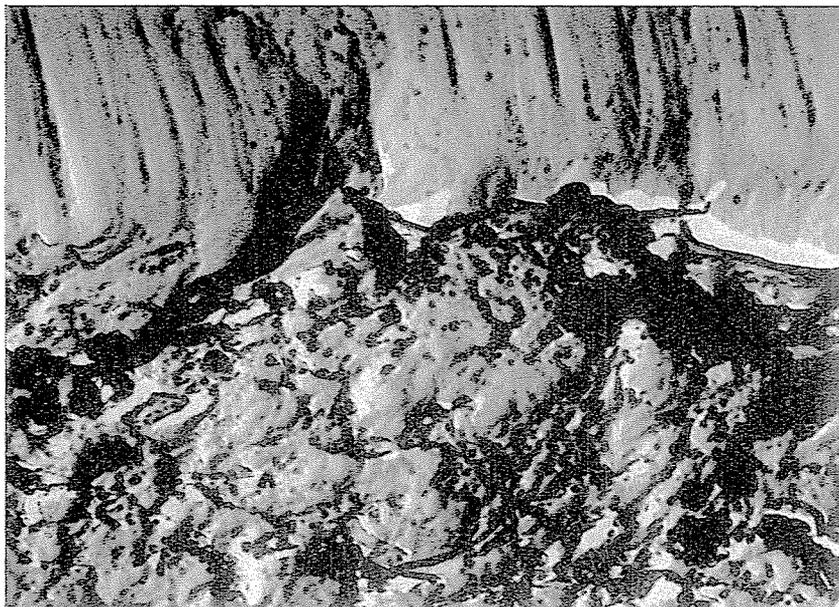


Abb. 18

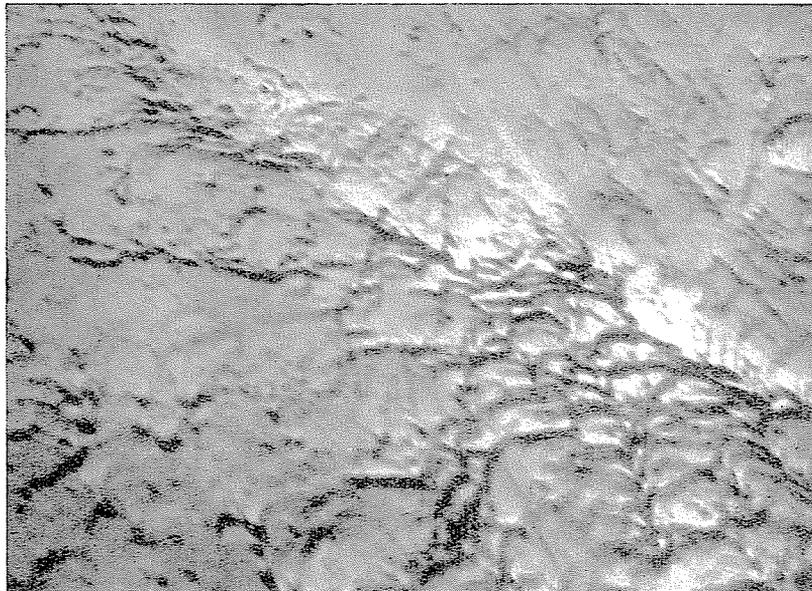


Abb. 19

Abb. 17–19. Oberfläche von Stahl A 60.11, nach 10 Sekunden langer Beanspruchung durch Wasserschlag. (Vergrößerung 17 300 $\times$ , 19 600 $\times$  bzw. 17 300 $\times$ )

*Aus den an den verschiedenen Werkstoffen beobachteten Zerstörungsbildern können folgende allgemeine Merkmale festgestellt werden:*

Unter der Einwirkung des Wasserschlages können schon nach einer geringen Zahl von Schlägen drei augenfällige Merkmale unterschieden werden:

a) An der Oberfläche der Werkstoffe erscheinen ringsum rissige Spuren mit abgerundetem Rand und mit einem Durchmesser von  $0,2-2,0 \mu\text{m}$ , während die Breite der Risse  $0,1 \mu\text{m}$  beträgt.

b) An der Oberfläche der plastischen Stoffe erscheinen Wellungen und Gleitlinien.

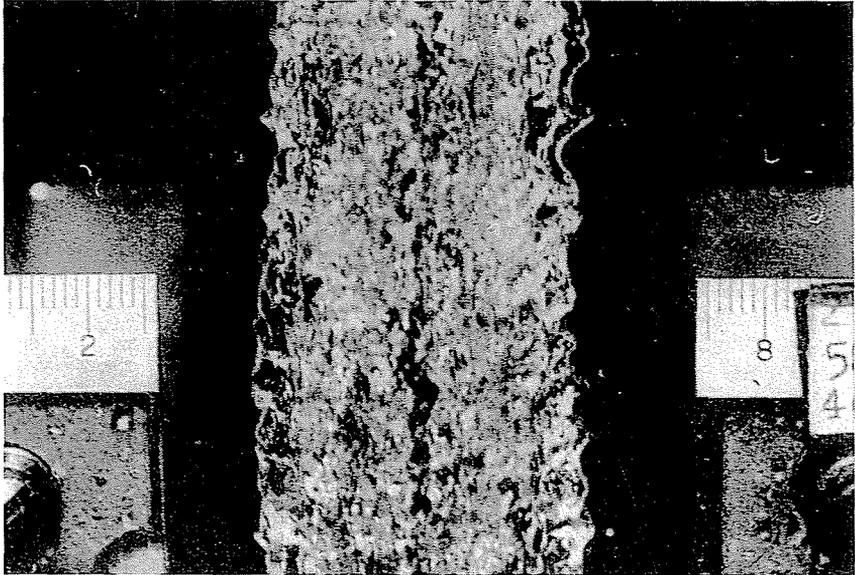


Abb. 20. Bild eines Wasserstrahls nach Dodu ( $1,5\times$ )

c) Bei den Werkstoffen höherer Festigkeit werden die Kristallitgrenzen in Form der an ihnen entlang sich hinziehenden Risse deutlich sichtbar.

Unter den angeführten dreierlei Gebilden ist das erste den bei der beschleunigten Kavitationsuntersuchung beobachteten Spuren [1] völlig gleich. Bei diesen war es sicher, daß die Spuren infolge des Zusammenbruchs der Blasen zustande kamen.

Die Annahme, daß hierbei die gleichen Ursachen mitwirken, liegt auf der Hand. Zum Nachweis der Richtigkeit dieser Annahme soll die Momentaufnahme eines Wasserstrahls [2] dienen, auf der beobachtet werden kann, daß die Oberfläche des Wasserstrahls stets wellig ist (Aufnahme 20) und daß der Strahl — besonders an den Rändern — stets Luftblasen mitführt.

Diese im Strahl befindliche Luft bildet beim Aufschlag zwischen Metall und Flüssigkeitssäule Luftblasen, die am Metall festhaften, durch den Schlag der Flüssigkeitssäule jedoch zusammengedrückt werden, so daß schließlich der gleiche Vorgang vor sich geht wie bei dem bei der Kavitation stattfindenden Zusammenbruch der Blasen.

Die Zerspaltung der Werkstoffoberfläche beginnt unter der Einwirkung der infolge der Blasen entstehenden Erosionen, daß heißt, auf *völlig gleiche Weise* wie im Laufe der Kavitation. Die qualitative Gleichheit der beiden Arten der Zerstörung kann somit — soweit es sich um die Reihenfolge der Widerstandsfähigkeit der Werkstoffe gegenüber der Kavitationszerstörung handelt —, hierdurch nachgewiesen werden.

Ihrer Größenordnung nach übertrifft jedoch die Zerstörung die bei den Kavitationsversuchen beobachteten Werte um ein Vielfaches, ein Umstand, der dem größeren, die volle Oberfläche treffenden Flüssigkeitsschlag zugeschrieben werden kann. Hierfür sprechen die Gleitlinien des Kaltfließens bzw. die Risse an den Kristallitgrenzen entlang, die im Anfangsstadium der Kavitationszerstörung nicht wahrgenommen werden konnten.

Die annähernde Berechnung der Größe der beim Wasserschlag zu erwartenden Kraft bzw. des in den festgefangenen Luftblasen zu erwartenden Wärmeeffektes läßt einen noch tieferen Einblick in die Beanspruchung der Werkstoffoberfläche zu.

#### IV. Berechnung der Oberflächenbeanspruchung durch Wasserschlag

Auf Grund der Zerstörungsspuren müssen zwei Arten der Beanspruchung in Betracht gezogen werden:

- a) der Fall der zwischen Metall und Flüssigkeit eingeschlossenen Luftblase und
- b) die Beanspruchung der Metalloberfläche unter der Einwirkung des Wasserschlages.

Die Größe des Wasserschlages kann nach KORNFEELD [3] aus der Beziehung

$$P_{ii} = \frac{K}{c} v_0 \quad [\text{kg/cm}^2] \quad (1)$$

berechnet werden (wobei die Elastizität des Metalls im Vergleich zu der der Flüssigkeit vernachlässigt wird). In dieser Gleichung bedeutet  $K$  den Elastizitätsmodul der Flüssigkeit (in Wasser ist  $K = 20 \cdot 10^3 \text{ kg/cm}^2$ ), » $c$ « die Schallgeschwindigkeit (in Wasser ist  $c = 1\,500 \text{ m/s}$ ) und  $v_0$  die relative Geschwindigkeit von Metall und Flüssigkeit, in unserem Fall  $v_0 = U$ , der Umlaufgeschwindigkeit. Für unseren Fall gilt somit:

$$v_0 = U = \frac{D\pi n}{60} = \frac{0,628 \cdot 3,14 \cdot 2930}{60} = 96 \text{ m/sec.}$$

Mit diesem Wert und auf Grund von Gleichung [1] ergibt sich die Druckerhöhung infolge des Aufschlages zu:

$$P_{ii} = \frac{20 \cdot 10^3}{1500} 96 = 1280 \text{ kg/cm}^2.$$

Ein Druck in dieser Höhe kann solange bestehen, bis die Druckwelle des Aufschlages die dem Wasserstrahlaufschlag entgegengesetzte Fläche erreicht und von dort reflektiert wird. Die mit der Schallgeschwindigkeit »c« fortschreitende Druckwelle muß somit einen Weg von  $2d$  zurücklegen, wenn man mit  $d$  den Durchmesser des Wasserstrahles bezeichnet. Die Zurücklegung dieses Weges erfordert eine Zeit von

$$t = \frac{2d}{c} [\text{s}]. \quad (2)$$

In unserem Fall ist  $d = 0,008$  m, die Dauer des Druckstoßes beträgt somit

$$t = \frac{2 \cdot 0,008}{1500} = 1,067 \cdot 10^{-5} \text{ s,}$$

das heißt praktisch eine hunderttausendstel Sekunde.

In der Flüssigkeit entsteht nach der Druckerhöhung eine negative Druckwelle.

Kommt die Saugwelle plötzlich zustande, bleibt keine Zeit für die Entstehung von Dampfblasen, und der Druck in der Flüssigkeit wird bis zur Reißfestigkeit der Flüssigkeit negativ. (Die Reißfestigkeit beträgt nach Kornfeld in Wasser bei 15° C 100 kg/cm<sup>2</sup>.)

Die Werkstoffoberfläche ist somit (abgesehen von der später auftretenden Turbulenz) in dichtem Wechsel einer Druckbeanspruchung von 1280 kg/cm<sup>2</sup> bzw. einer Zugbeanspruchung von etwa 100 kg/cm<sup>2</sup> ausgesetzt.

Die Zerstörung kann in ihrem Anfangsstadium bei zähen Werkstoffen die Erhärtung der Oberfläche und anschließend die Zerklüftung der Oberfläche, in einem späteren Stadium hingegen die Erosion der lockereren Anteile des Stoffgefüges hervorrufen. Die Richtigkeit dieser Annahmen wird durch die Ergebnisse der im *Anfangsstadium* vorgenommenen Mikrohärtemessungen bestätigt (siehe Tafel 1).

**Tafel 1**

HV (kg/mm<sup>2</sup>)

Mikrohärte von Oberflächen im Anfangsstadium der Zerstörung durch Wasserschlag:

Werkstoff	Grundstoff HV	Zerstörter Teil HV
Cu .....	100	101,2
Al .....	45	32,8
Gußeisen .....	429	277
Stahl Kor. 5. ....	263	269
Bronzeguß Br. ö. 14. ..	271	142

**Tafel 2**

HV (kg/mm<sup>2</sup>)

Mikrohärte von Oberflächen im vorgeschrittenen Zustand der Zerstörung durch Wasserschlag

Werkstoff	Grundstoff HV	Zerstörter Teil HV
Cu .....	100	95,9
Al .....	45	38,4
Gußeisen .....	429	336,5
Stahl Kor. 5. ....	263	251,9
Bronzeguß Br. ö. 14. ..	271	209

Die nach längerer Dauer der Zerstörung gewonnenen, für die Erweichung der Oberfläche kennzeichnenden Härtemeßergebnisse (siehe Tafel 2) und die hierbei entstandenen Gebilde (Aufnahme 21) weisen darauf hin, daß der Werkstoff unter der Einwirkung von innen nach außen gerichteter Kräfte, einerseits durch wiederholt auftretende Umwandlungen, andererseits durch die im Laufe der wiederholten Druckbeanspruchungen in das Gefüge eingepreßten Dämpfe (Gase) und durch die entlang der Kristallitgrenzen auftretenden thermischen Effekte herausgerissen wird.

Die rechnerisch ermittelte Kraftwirkung reicht zur Zerklüftung der Werkstoffoberfläche nicht aus, doch genügt sie, zur weiteren Zerstörung der zerklüfteten Oberfläche, zur Ausdehnung der Risse, zur Auflösung des Stoffgefüges bzw. zur fortschreitenden Kaltverformung.

*Die Entstehung der Mikrorisse an der Werkstoffoberfläche läßt sich durch das Verhalten der zwischen Metall und Flüssigkeit eingeschlossenen Luftblasen erklären.*

Es sei angenommen, daß an der dem Wasserschlag ausgesetzten Metalloberfläche zwischen dieser und der aufschlagenden Wassersäule eine halbkugelförmige Luftblase (mit dem Anfangsradius  $R_0$ ) eingeschlossen wurde.

In Richtung der Luftblasenachse wird der durch die Kompression der Luftblase bedingte zunehmende Widerstand eine wachsende Verminderung der Flüssigkeitgeschwindigkeit zur Folge haben.

Unter der Voraussetzung, daß sich das Wasser einer stehenden Wand nähert, besteht auf Grund des Impulssatzes für den Augenblick  $t$  zwischen



Abb. 21. Querschnitt eines durch Wasserschlag ausgeholten Kraters in Messing ( $50\times$ )

dem Druck  $p_t$  der Luftblase und der Momentangeschwindigkeit der Flüssigkeit  $v$  die Beziehung:

$$\frac{p_t - p_0}{\gamma} = \frac{c(v_0 - v)}{g} \quad [\text{m}], \quad (2)$$

in welcher

$p_0$  = der Anfangsdruck in der Luftblase,

$v_0$  = die Flüssigkeitgeschwindigkeit vor dem Zusammenstoß,

$g$  = die Schwerebeschleunigung und

$\gamma$  = das spezifische Gewicht.

Setzt man im Hinblick auf die Schnelligkeit des Vorganges eine adiabatische Kompression der Luft voraus, besteht für den Zusammenhang zwischen Blasenradius und Druck die Beziehung

$$\frac{p_t}{p_0} = \left( \frac{R_0}{R_t} \right)^{3\kappa}, \quad (3)$$

in der  $R_t$  den Radius der Blase im Zeitpunkt  $t$  bedeutet.

Unter Berücksichtigung der Wandgeschwindigkeit von

$$v = dR/dt,$$

kann die nachstehende Differentialgleichung geschrieben werden:

$$dt = \frac{c}{g} \frac{dR}{\frac{p_0}{\gamma} + \frac{cv_0}{g} - \frac{p_0}{\gamma} \left( \frac{R_0}{R_t} \right)^{3\kappa}} [s]. \quad (4)$$

Da der Exponent ( $\kappa$ ) der adiabatischen Zustandsänderung keine ganze Zahl ist, kann die allgemeine Lösung der Differentialgleichung nur näherungsweise angegeben werden. Als Lösung der Differentialgleichung nach der Zeit erhält man die Beziehung

$$t = \frac{c\gamma}{gp_0 + v_0 c\gamma} R_0 \left[ 1 + \frac{R_t}{R_0} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q^n}{2\kappa n - 1} \right],$$

in welcher

$$q = \frac{p_0 g}{p_0 g + \gamma cv_0} \left( \frac{R_0}{R_t} \right)^{3\kappa}.$$

Ist  $q > 0,9$ , so konvergiert die Reihe so langsam, daß die Berechnung schwerfällig wird; um ein hinreichend genaues Resultat zu erhalten, müssen mehr als 20 Glieder der Reihe addiert werden.

Im Bereiche  $1,0 > q > 0,9$  ergibt die graphische Integration schneller ein genaues Resultat. Die einzelnen Schritte des graphischen Verfahrens sind folgende:

Für die angenommenen Werte von  $\frac{R_0}{R_t}$  können aus [3] die Werte von  $p_t/p_0$  berechnet werden (wobei für Luft ein  $\kappa$ -Wert von 1,4 angenommen wird). Aus den Werten von  $p_t/p_0$  läßt sich bei Annahme von  $p_0$  und  $v_0$  aus [2]  $v$  berechnen.

Wird  $v_0/v$  in Abhängigkeit von  $R_t/R_0$  dargestellt, schreibt sich das Integral der Fläche unter der Kurve zu

$$A = \int_1^{\frac{R_t}{R_0}} \frac{v_0}{v} d\left(\frac{R_t}{R_0}\right) = \frac{v_0}{R_0} t,$$

woraus sich für die Zeit

$$t = \frac{R_0}{v_0} A \text{ [s]}$$

ergibt.

Bemerkt sei hierzu, daß die Summe der Reihe für den Fall von  $q = 1$  gegen Unendlich hält, daß heißt, daß der Vorgang des Zusammenbruchs der Blase den aus  $q = 1$  berechenbaren Radius  $R_{\min}$  nur asymptotisch annähert. Die kleinste Abmessung der Blase ( $q = 0,98$ ) wird dagegen, bei einer Annäherung von etwa 0,5%, im Zeitpunkt

$$t = 1,65 R_0 \frac{c\gamma}{gp_0 + v_0 c\gamma}$$

erreicht, d. h. der Zusammenbruch der Blase kann nach Ablauf dieser Zeit als praktisch beendet betrachtet werden.

Für die kleinste Abmessung der Blase ergibt sich aus  $q = 1$

$$R_{\min} = R_0 \left( \frac{p_0 g}{p_0 g + \gamma c v_0} \right)^{\frac{1}{3z}}$$

Die Temperatur der eingeschlossenen Luftblase läßt sich für jeden beliebigen Wert von  $p_t/p_0$  aus der Beziehung

$$T = T_0 \left( \frac{p_t}{p_0} \right)^{\frac{z-1}{z}}$$

ermitteln.

Auf Grund dieser Berechnung besteht die Möglichkeit, bei gegebener Geschwindigkeit  $v_0$  die Temperatur  $T$  jeder Blase mit dem Anfangsradius  $R_0$ , mit der Temperatur  $T_0$  und dem Druck  $p_0$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  zu bestimmen.

In Abb. 22 sind für die Werte  $T_0 = 290 \text{ }^\circ\text{K}$  ( $17 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und  $p_0 = 1 \text{ kg/cm}^2 = 10\,000 \text{ kg/m}^2$ , für die Fälle von  $R_0 = 1 \text{ mm}$ ,  $0,5 \text{ mm}$  und  $0,1 \text{ mm}$  die Temperaturen in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  aufgetragen.

Der hohe Druck und die hohe Temperatur im Inneren der Blase hält solange an, bis die von der Oberfläche der Flüssigkeit reflektierte Welle die Blase erreicht ( $t = 1,067 \cdot 10^{-5}$  s).

Unter Berücksichtigung dieser Grenzlinie läßt sich feststellen, daß die Blase bei einer Ausgangsdimension von 1 mm beinahe die asymptotisch angenäherte Spitzentemperatur (etwa 2 320 °K) erreicht. Blasen mit Anfangsdimensionen unter 1 mm erreichen die Spitzentemperatur ausnahmslos, und je kleiner die Blase ist, um so länger hält die hohe Temperatur an.

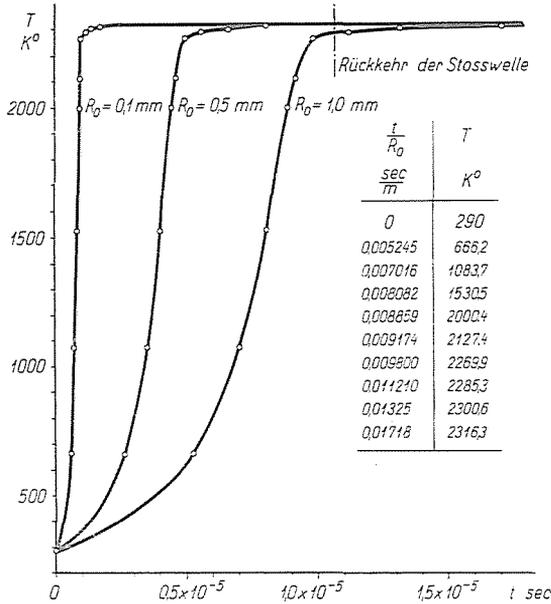


Abb. 22. Temperatur des Lufteneinschlusses in Abhängigkeit von der Zeit (Ausgangsabmessungen  $R_0 = 1,0, 0,5$  und  $0,1$  mm)

Da die Vertiefungen an der Oberfläche der Flüssigkeit (die infolge der Luftreibung zustande kommenden Wellen) nicht genau die Form einer Halbkugel annehmen, sind die gewonnenen Resultate nur qualitativ richtig. Es gilt jedoch als sicher, daß es in jeder geringen Unebenheit zu hohen Temperaturen kommt. Infolge der hohen Temperatur setzt an der Oberfläche der Flüssigkeit ein Siedevorgang ein. Ionisierte Dampfmoleküle von hoher Geschwindigkeit und die von dem siedenden Wasser sich abscheidenden, beschleunigten kleinen Flüssigkeitsteilchen durchfliegen die Blasen und stoßen auf die Metalloberfläche auf.

Die an der Werkstoffoberfläche erscheinenden ringsum rissigen Spuren sind also auf folgende Ursachen zurückzuführen: entweder ein mechanischer Stoß durch die kleinen Wassertropfen, oder die Kühlwirkung der Wassertropfen in der Materialoberfläche, die die hohe Temperatur bereits übernom-

men haben, oder beide zusammen, oder der Aufprall der ionisierten Dampfteilchen.

Die tatsächliche Ursache muß sich unter diesen finden. Sie aufzudecken ist eine Aufgabe, die der weiteren Forschungsarbeit vorbehalten ist.

### Zusammenfassung

In der Wasserschlag-Zerstörungsanlage wurden mehrere Werkstoffe einer kurz andauernden Oberflächenbeanspruchung ausgesetzt, wobei an allen Werkstoffoberflächen Vertiefungen entstanden, die sich auf den elektronenoptischen Aufnahmen bei 5—20 000facher Vergrößerung deutlich erkennen lassen.

Aus diesen und aus ähnlichen Spuren an den Prüfkörpern von hier nicht näher erörterten Kavitationsuntersuchungen kann geschlossen werden, daß die Zerstörung des Materials — die Entstehung der Mikrorisse an der Oberfläche — bei den Wasserschlagproben ganz gleich vor sich geht wie bei der Kavitation.

Unter der Voraussetzung einer adiabatischen Kompression kann sich die Temperatur der Lufteinschlüsse (Luftblasen) zwischen Flüssigkeit und Metall im Laufe des Wasserschlages bis über 2000° C erhöhen. Im Hinblick auf die äußerst kurze Kompressionszeit von weniger als  $10^{-5}$  sec verläuft die Kompression aller Wahrscheinlichkeit nach adiabatisch.

Die hohe Temperatur wird auf die Oberfläche der Metalle übertragen, wobei die Oberflächen unter der Einwirkung der dem Wasserschlag folgenden raschen Abkühlung rissig werden. Durch die starke mechanische Wirkung des Wasserschlages werden die Risse gelockert, im Werkstoffgefüge treten Spuren des Kaltfließens auf und es setzt eine stufenweise Ausbröckelung der Oberfläche ein.

Bei den geringfügigeren Zerstörungen wird der Gewichtsverlust durch die Beanspruchung der Werkstoffoberfläche, d. h. durch den zeitlichen Verlauf der Ribbildung bestimmt. Dieser zeitliche Verlauf der Zerstörung hingegen stellt eine Funktion der Temperatur in den großen Blasen dar und zeigt keine Unterschiede zwischen Kavitation und Wasserschlag. Die Gleichheit der Reihenfolge im Widerstand gegenüber der Kavitation und dem Wasserschlag kann hierauf zurückgeführt werden. Die durchgeführten Untersuchungen lassen erkennen, daß an solchen Stellen, die den Wasserschlägen ausgesetzt sind, nicht nur zähe, sondern gleichzeitig auch wärmebeständige Werkstoffe verwendet werden müssen.

### Schrifttum

1. VASVÁRI, F.: Ujabb adatok a fémek kavitációs roncsolási elméletéhez (Neue Beiträge zur Theorie der Zerstörung von Metallen durch die Kavitation). Kandidaten-Dissertation, Budapest, 1961.
2. DODU: Étude statistique de la dispersion d'un jet de turbine, Pelten Turbines et pompes hydrauliques. — Comptes rendus des V. I. Hydr. Aix-en-Provence, p. 247—250.
3. KORNFELD: Elastizität und Festigkeit von Flüssigkeiten. V. T. Berlin, 1952.

Prof. F. VASVÁRI, Budapest, V., Szerb u. 23, Ungarn.