

Frank MOSEBACH; Hans Joachim KECKE

Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg

DAS VERHALTEN AUSGEWÄHLTER WERKSTOFFE UNTER DEN-BEDINGUNGEN DES SPÜLVERSCHLEISSES

Zusammenfassung: Es wird das Verschleißverhalten von verschiedenen Werkstoffen unter den Bedingungen des Spülverschleißes untersucht.
In Weiterführung zu Betrachtungen zur Abhängigkeit von der Härte findet die Struktur der Werkstoffe besondere Beachtung.
Einbezogen werden unlegierte und legierte Stähle, Härtstofflegierungen und Sintermetall. Die besondere Eignung metastabiler austenitischer Stähle wird nachgewiesen.

1. Einleitung

Der Verschleiß der Rohrleitungen und Anlagenelemente entscheidet in starkem Maße mit über die Wirtschaftlichkeit hydraulischer Feststofftransportanlagen. Neben der diesbezüglich (verschleiß-) optimalen Auslegung der Anlage (Geschwindigkeit, Konzentration, ...) ist eine weitere Erhöhung der Lebensdauer, soweit möglich, durch die Aufbereitung der Feststoffe (z. B. Zerkleinerung) und durch eine gezielte Werkstoffauswahl möglich, jedoch sind durch die zusätzlich auftretenden Kosten Grenzen gesetzt.

Nach wie vor kommen beim Bau der Rohrleitungen überwiegend unlegierte Stähle mit größerer Wanddicke zum Einsatz, obwohl auch sehr gute Erfahrungen mit Auskleidungen (z. B. Schmelzbasalt) oder Beschichtungen gesammelt wurden. Somit konzentriert sich ein Teil der Forschung auf die Vorausbestimmung der Lebensdauer der Rohre unter Beibehaltung herkömmlicher Werkstoffe sowie auf deren optimale Ausnutzung, z. B. durch Drehen der Leitung. Hier sind besonders die Arbeiten von TARDAN [1] hervorzuheben.

Für solche Bauteile, wie Armaturen, Pumpen, Rohrbögen, usw., die im Vergleich zum geraden Rohr wesentlich stärker durch den Gemischstrom beansprucht werden, erweist sich der Einsatz verschleißbeständigerer Werkstoffe als ökonomisch [2].

2. Härteeinfluß

In allgemeinen wird die Abrasion als wichtigster Verschleißmechanismus beim Spülverschleiß angesehen, wobei auch die Oberflächenzerrüttung und die Tribooxidation größere Bedeutung erlangen können [3]. Unter Abrasion versteht man die Ritzung und Mikrozerspannung der Bauteiloberfläche durch die harten mineralischen Feststoffe. Ein Zusammenhang

zwischen Abrasion und Härte des Werkstoffes scheint somit gegeben zu sein. Die Härte trägt bekanntlich mechanisch-technologischen Charakter, sie ist ein Maß für den Widerstand eines Werkstoffes gegen Eindringen und plastische Verformung seiner Oberflächenbereiche. Somit wird geschlossen, daß mit der Erhöhung der Werkstoffhärte eine Verringerung der Abrasion und damit eine Erhöhung der Lebensdauer zu erwarten ist. Dies weisen z. B. die Arbeiten von SCHEURELL [4] nach, siehe Bild 1. Derartige Aussagen geben eine Tendenz an, eine unmittelbare Zuordnung ist generell nicht möglich. Einfluß hat nicht nur die Härte selbst, sondern u. a. auch, auf welchem Wege sie erzielt wird (z. B. Wärmebehandlung, Legierung, ...). Mit veränderter Härte ist ebenfalls mit einem anderen Verhalten unter den Bedingungen der Oberflächenzerrüttung zu rechnen. Maßgebend für den Verschleiß sind die in den realen Kristallstrukturen ablaufenden Prozesse. Eine Ordnung nach dem globalen Werkstoffkennwert Härte sollte also vor allem auf Werkstoffgruppen gleicher Struktur beschränkt werden.

3. Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

Zur Überprüfung u. a. des diskutierten Zusammenhanges von Härte und Werkstoffverschleiß wurden verschiedene Materialien untersucht.

Die verwendete Versuchsanlage ist schon in [5] beschrieben worden. Getestet wurden eine Auswahl von niedrig- und hochlegierten Stählen, auftraggeschweißte Hartstofflegierungen, Sinterhartmetall sowie als Vergleichswerkstoff St 36, siehe Tabelle 1.

Als Feststoff kam Sand mit einer mittleren Korngröße von 0,3 mm zum Einsatz; aufgrund des hohen Quarzanteils kann hier mit einer Härte von etwa 1100 HV gerechnet werden.

Die Werkstoffproben wurden unter einem Spülwinkel von 45° beansprucht, womit ein komplexes Wirken der abrasiven Mechanismen und der Zerrüttung bewirkt wird, wie auch die mikroskopischen Untersuchungen bestätigen. Unter Kenntnis des großen Einflusses der Transportgeschwindigkeit auf den Spülverschleiß und unter Berücksichtigung der Parameter des Versuchsstandes wurde der relative Verschleiß der Proben bei Geschwindigkeiten um 8 m/s und um 15 m/s bestimmt.

Es ist festzustellen, daß bei der niedrigen Geschwindigkeit und bei etwa 10 % Transportkonzentration nach spätestens etwa 300 Minuten der Abtrag, ausgedrückt in mg - Werkstoff pro kg - Feststoff, zeitlich konstant bleibt. Bei der größeren Geschwindigkeit wird der stationäre Zustand bereits nach etwa 60 Minuten erreicht. Vor der Einstellung dieses stationären Zustandes konnten in der Regel erhöhte Verschleißbeträge festgestellt werden. Diese Art von "Einlaufverschleiß" ist auf den verstärkten Angriff der vorhandenen Spuren der vorübergehenden Probenbearbeitung (Drehen, Schleifen) und auch die anfängliche Ausbildung der Verschleißmulde zurückzuführen.

Für den nachfolgenden Vergleich der Werkstoffe wird der Abtrag in "stationären Zustand" herangezogen.

Bild 2 demonstriert zunächst den großen Einfluß der Geschwindigkeit auf den Spülverschleiß. Bezugnehmend auf die vielfach bestätigte Gültigkeit eines exponentiellen Einflusses der Geschwindigkeit, wurden die Meßpunkte durch Geraden verbunden, deren Anstiege im Bereich zwischen 2,5 und 3,5 liegen.

Bild 3 bietet einen Vergleich der Werkstoffe bezogen auf St 38. Als Bezugsgeschwindigkeit wurde 15 m/s gewählt, die Rangfolge der Werkstoffe ändert sich jedoch auch bei der niedrigen Geschwindigkeit sowie ebenso bei einem Spülwinkel von 20° nicht wesentlich. Da für die Funktion eines Bauteils primär das abgetragene Volumen und weniger der Massenverlust von Interesse ist, wurde in Bild 3 der Volumenverlust dargestellt. Man erkennt, obwohl für Sinterhartmetall und Stellite etwa der gleiche Massenabtrag bestimmt wurde, daß durch die größere Dichte das Sintermetall den größten Verschleißwiderstand aufweist.

Wie zu erwarten, sind beim unlegierten Werkstoff St 38 die größten Materialverluste zu verzeichnen.

Als nächste Gruppe können global die niedrig- und hochlegierten Stähle zusammengefaßt werden. Sie sind durch ein relativ ausgewogenes Verhältnis von Härte und Zähigkeit gekennzeichnet. Es handelt sich dabei um druckwasserstoffbeständige bzw. rost- und säurebeständige Stähle, so daß sie vielseitig einsetzbar sind. MORRISON nennt sie deshalb die "Arbeitspferde" der Industrie [2]. Bei mechanischer Beanspruchung zeigen sie in viel stärkerem Maße als z. B. St 38 eine Verfestigung ihrer Oberflächenbereiche, Bild 4. Als Folge der Ausbildung von Versetzungen, von Versetzungsbewegungen und -aufstau tritt eine Verfestigung, eine Härtesteigerung bezogen auf die Ausgangshärte, ein. Vorteilhaft erweist sich die damit verbundene Energieabsorption und die Festigkeitssteigerung der Werkstoffoberfläche. Zur Vorhersage des Verschleißwiderstandes der Werkstoffe dieser Gruppe ist eine weiterführende Analyse notwendig. Verwiesen sei hier auf die Struktur (martensitisch oder austenitisch), vorliegende Gitterstörungen (u. a. auch durch Legierungselemente), die Ausbildung und Beweglichkeit von Versetzungen usw. Bild 3 und Bild 4 lassen diesbezüglich schon Ansatzmöglichkeiten erkennen.

Die positive Wirkung der Energiedissipation im Werkstoff und damit der Entzug von Energie zur Schaffung neuer Oberflächen bei gleichzeitiger Festigkeitserhöhung führte zur Entwicklung und Anwendung metastabiler austenitischer Werkstoffe [6]. Bei dieser Gruppe kommt es nach Überschreitung der kritischen Energieakkumulation zu diffusionslosen Gefügeumwandlungen. Dabei wandelt der kfz-Austenit (γ) über den hex-Martensit (ϵ) oder direkt in den kfz-Martensit (α) um.

Die für die Bildung neuer Martensitkristalle benötigte Energie führt nicht zur Energieakkumulation und wird damit dem Verschleißprozeß entzogen. Nach dem Erschöpfen der Umwandlungsfähigkeit kommt es weiterhin zur Kaltverfestigung der Martensitkristalle und zum Abtrag.

Die Besonderheit besteht nun darin, daß sich nach dem Abtrag die Martensitbildung fortsetzt, sich die Verschleißschicht ständig regeneriert. Damit verbunden sind u. a. folgende verschleißwidernde Effekte (siehe auch [7]): Festigkeitssteigerung, Druckeigenspannungen, Rißverzögerung. Die Untersuchungen bestätigten, daß diese Gefügeumwandlung, die damit gekoppelten Effekte, auch beim Spülverschleiß genutzt werden können. Wie den Bildern 2 und 3 zu entnehmen ist, existiert zwischen den Stählen mit stabiler Gefügestruktur und den metastabilen Werkstoffen zu denen auch der Mangan-Hartstahl gerechnet werden kann, ein qualitativer Unterschied. Die deutlich geringeren Materialverluste belegen dies. Mittels metallographischer sowie strukturanalytischer Untersuchungen konnte die Bedingtheit der positiven Effekte durch die Gitterumwandlungen nachgewiesen werden. Dabei zeigte sich, daß der Werkstoff X5MnNi20.2 vorrangig γ - ϵ -Umwandlungen vollzieht, während α -Martensit erst bei höheren Beanspruchungen gebildet wird.

Ein effektiver Schutz besonders gefährdeter Anlagenelemente ist bekanntlich durch das Aufbringen von Schutzschichten möglich. Zu nennen sind insbesondere die Hartstofflegierungen. Zum Vergleich wurden einige derselben in die Untersuchungen einbezogen. Den Bildern 2 und 3 ist ihre hervorragende Verschleißbeständigkeit zu entnehmen. Diese Werkstoffe sind durch einen hohen Chrom-Anteil (bis 25 %) bzw. Karbidanteil in einer zähen, verformungsfähigen Grundmatrix gekennzeichnet:

- Stellite: Hartstoffphasen / Kobalt
- Eutalloy: Hartstoffphasen / Nickel
- Cr25V: Hartstoffphasen / Eisen.

Metallographische Untersuchungen belegen, daß die gute Verschleißbeständigkeit hauptsächlich durch die Einlagerung der sehr harten Karbide in eine relativ zähe Matrix bewirkt wird. Für Chrom-Karbide werden Härtewerte im Bereich 1300 bis 1900 HV angegeben [8], eigene Messungen bestätigten dies bei den eingesetzten Proben. Weiterhin können u. a. ebenso Boride auftreten, die sich durch noch größere Härtewerte auszeichnen. Nach Untersuchungen von WOODFORD [9] wurden übrigens auch bei Eisen- und Kobalt-Basis-Legierungen unter Kavitation Phasenumwandlungen festgestellt. Die Metastabilität dürfte auch hier zumindest einen positiven Einfluß haben.

Einen ähnlichen strukturellen Aufbau wie die untersuchten Auftragwerkstoffe weisen auch die von MORRISON [2] genannten verschleißbeständigen Gußeisen auf: die Einlagerung harter Karbide in einer relativ zähen Matrix. Dies betrifft das "weiße Gußeisen", die "Ni-Hard-Stähle" sowie das 25 %-Cr-Gußeisen. Genannte Werkstoffe haben sich vor allem bei Baggerpumpen bewährt. Auch die von WIEDENROTH [10] als besonders positiv bewertete Gußqualität CBR 315.3 dürfte aufgrund des hohen Kohlenstoff (3 %)- und Chrom (15 %)-Gehaltes eine ähnliche Struktur besitzen. Allerdings sind diese Werkstoffe nur noch schwer bearbeitbar. Gleiches trifft auf das analysierte Sinterhartmetall zu. Bei den untersuchten Werkstoff, der die besten Ergebnisse lieferte, sind die harten

Wolfram-Karbide (2400 HV [8]) in Kobalt eingebettet. Weiterhin sind auch Zugaben von Titan- oder/und Tantal-Karbid gebräuchlich.

Abschließend muß noch darauf hingewiesen werden, daß neben der Verschleißbeständigkeit natürlich auch der Werkstoffpreis wie auch der technologische Aufwand zu beachten sind. Für Rohre kommen somit kaum hochlegierte Werkstoffe in Frage. Für höher beanspruchte Bauteile sind unter vorgenannten Aspekten die metastabilen Werkstoffe hervorragend geeignet.

4. Zusammenfassung

Für Bauteile, die in besonders starkem Maße durch den Feststoff-Flüssigkeitsgemischstrom beansprucht werden, erweisen sich verschleißbeständigere Werkstoffe als günstig. Dabei existiert die Tendenz, die Erhöhung der Verschleißbeständigkeit an der Härte zu messen.

Ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Härte und Zähigkeit bewirkt ein günstiges Verhalten der niedrig- und hochlegierten Stähle.

Falls die Voraussetzungen für diffusionslose Gefügewandlungen gegeben sind, ist mit einer weiteren Verbesserung zu rechnen. Bei entsprechender Optimierung (beanspruchungsgerechte Legierung bzw. Metastabilität) sind Qualitäten der Hartstofflegierungen zu erreichen.

Auch bei Eisen- und Kobalt-Basis-Legierungen gibt es Hinweise auf Metastabilität. Ihre hohe Verschleißbeständigkeit ist jedoch vor allem auf die Einbettung harter Phasen in eine relativ zähe Matrix zurückzuführen.

Literaturverzeichnis

- [1] TARJAN, I.: Berücksichtigung des Rohrverschleißes bei der Auslegung hydraulischer Förderanlagen
Hydromechanisation 4; Karl-Marx-Stadt (DDR)
1985, Paper B 1
- [2] MORRISON, M.: Some abrasion resistant alloys for pumps and other services
Dredging Technology 1, Kent (England)
1975, Paper G 2
- [3] HABIG, K.-H.: Verschleiß und Härte von Werkstoffen
Hanser Verlag (München-Wien) 1980
- [4] SCHEURELL, H.-G.: Rohrverschleiß beim hydraulischen Feststofftransport
Dissertation, TH Karlsruhe (BRD) 1985
- [5] MOSEBACH, F.; KECKE, H. J.: Untersuchung des Feststoffeinflusses auf den Spülverschleiß
Hydromechanisation 4; Karl-Marx-Stadt (DDR)
1985, Paper B 5
- [6] KECKE, H. J.; RÖTHIG, J.: Selbstoptimierende metallische Werkstoffe für Festkörperreibung
Schmierungstechnik, Berlin 15 (1984), H. 8, S. 241-246
- [7] KUHNE, J.: Tribologisches Verhalten metastabiler austenitischer Stähle
Dissertation, TH Magdeburg (DDR) 1985
- [8] FIGORS, O.: Verschleißverhalten von Werkstoffen
Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig (DDR) 1985
- [9] WOODFORD, D.A.: Cavitation-erosion-induced phase transformation in alloys
Metallurgical Transactions, Vol. 3, S. 1137-1145, 1972
- [10] WIEDENROTH, W.: Möglichkeiten zur Messung des Verschleißes beim hydraulischen Feststofftransport
Hydromechanisation 4, Karl-Marx-Stadt (DDR),
1985, Paper B 3

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Maciej ZARZYCKI

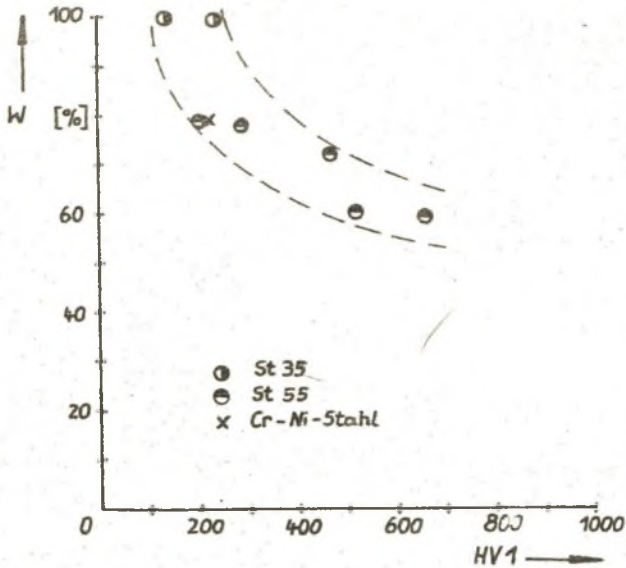


Bild 1: Relativer Rohrverschleiß als Funktion der Werkstoffhärte nach SCHEURELL [4]

Tabelle 1

Übersicht über untersuchte Werkstoffe

Nr	Werkstoff	Dichte [g/cm ³]	Chem. Zusammensetzung [%]
1	St 38	7,85	C ≤ 0,2
2	10CrMo9.10V	7,85	C: 0,1; Cr: 2,3; Mo: 1,0; Mn: 0,5; Si: 0,4
3	17CrMoV10V	7,85	C: 0,18; Cr: 2,7; Mo: 0,25; V: 0,15; Si: 0,3
4	X8CrNiMoTi18.11.	7,90	C < 0,1; Cr: 18,0; Mo: 2,2; Si: 11; Ti 0,7
5	X20Cr13V	7,70	C: 0,2; Cr: 13; Mn 0,8; Si 0,8
6	X5MnNi20,2	8,04	C: 0,05; Mn: 20; Ni: 2
7	X120MnCr12	8,00	C: 1,2; Mn: 12
8	Eutalloy 10009	7,82	Cr: 25; B: 3,5; C: 1,0; Si: 0,5; Rest Ni
9	Stellit 157	8,32	Cr: 22; B: 2,4; W: 4,5; C: 0,1; Si: 1,6; Rest Co
10	SHWAM/X20CrMoTi18	7,70	Cr: 17,3; Mo: 1,1; Mn: 0,55; C: 0,18
11	Cr25V	7,60	Cr: 25; C: 2,5; W: 1,5; V: 0,2; Rest Fe
12	HG20	14,30	WC: 94; Co: 6

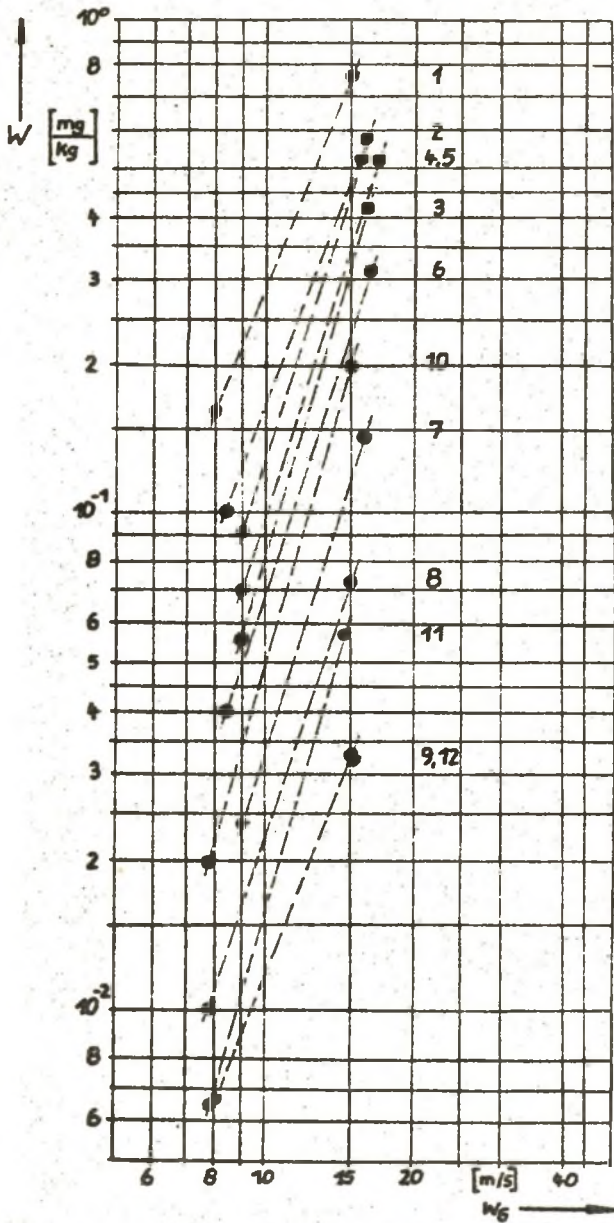


Bild 2: Einfluß der Gemischgeschwindigkeit auf den relativen Verschleiß ($\alpha = 45^\circ$, $d_p = 0,3 \text{ mm}$)

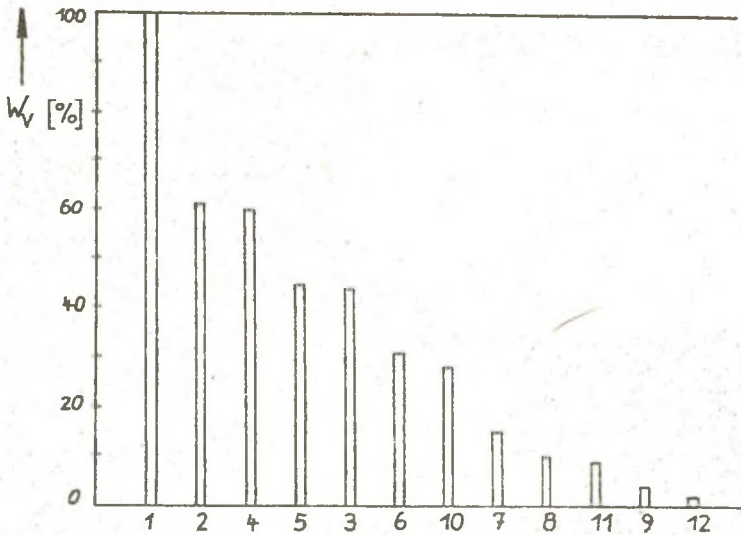


Bild 3: Relativer Volumenverschleiß bezogen auf St 3c ($\alpha = 45^\circ$, $w_G = 15$ m/s, $d_p = 0,3$ mm)

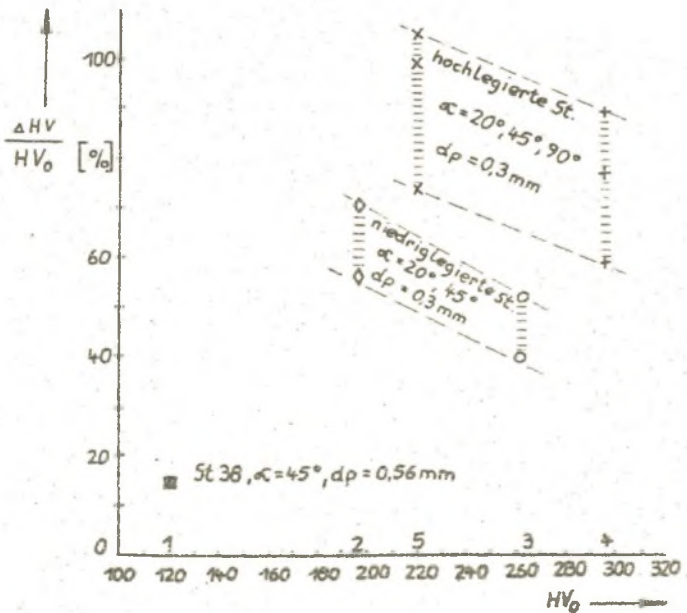


Bild 4: Relative Härtesteigerung der Oberfläche ($w_G = 15$ m/s, Mikrohärtigkeit HV 0,04)

ZACHOWANIE SIĘ WYBRANYCH MATERIAŁÓW W WARUNKACH POWODUJĄCYCH SZYBKIE ZUŻYWANIE SIĘ

S t r e s z c z a n i e

Badane są właściwości różnych materiałów pod kątem ich zachowania się w warunkach powodujących szybsze zużycie. Duże znaczenie w rozważaniach na temat zależności od twardości odgrywa w szczególności struktura materiału. Uwzględnione tutaj zostały stale węglowe i stale stopowe, stopy twarde i cermetale. Wykazano szczególną przydatność metastabilnych stali austenitycznych.

ПОВЕДЕНИЕ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ БЫСТРОГО ИЗНОСА

Р е з ю м е

В работе описаны исследования различных материалов с точки зрения их поведения в условиях быстрого износа. Большое значение в зависимости износа от твердости играет структура материала. Приняты во внимание углеродистые и легированные стали, твердые сплавы и керметы. Указано на особенно большую пригодность метостабильных аустенитных сталей.