

LABORUNTERSUCHUNG DER REIBUNGSVERHÄLTNISSE AN WERKSTOFFEN FÜR KLOTZBREMSEN AUS TRADITIONELLEM GUSSEISEN UND AUS GUSSEISEN MIT HOHEM PHOSPHORGEHALT FÜR SCHIENENFAHRZEUGE*

Von

J. VAJDA

Lehrstuhl für Schienenfahrzeuge, Technische Universität Budapest

(Eingegangen am 7. Dezember 1972)

Vorgelegt von Prof. Dr. K. HORVÁTH

1. Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen

1.1 Frühere Vorstellungen über die Reibung

Das Problem der Reibung und der damit verbundenen Abnutzung beschäftigt seit den ältesten Zeiten die Ingenieure und Physiker. Der Fortschritt der Instrumententechnik ermöglichte eine eingehendere Untersuchung der Reibungs- und Abnutzungsverhältnisse. Die Ergebnisse der mikrogeometrischen Untersuchungen verursachten eine Änderung in den bisherigen Anschauungen von der Reibung. Die sich seit etwa 30 bis 40 Jahren entwickelnde neue Theorie der Reibung brach mit dem *Coulombschen* Reibungsgesetz, das früher für souverän galt und trachtete, die Wirkung der den Reibwert beeinflussenden physikalischen Parameter mit Funktionen zu beschreiben. Im Laufe dieser Untersuchungen mußten zahlreiche — einander oft widersprechende — Versuchsergebnisse ausgewertet und der richtige Zusammenhang der Veränderlichen gefunden werden.

Die Forscher sind bis in unsere Tage bestrebt, theoretisch zu begründen, wie der Reibwert vom Flächendruck, von der Geschwindigkeit, der Rauigkeit der Fläche, der Werkstoffzusammensetzung usw. abhängt [2].

Für Vollbahnen gelten die von METZKOW [3] in den Jahren 1925—26 durchgeführten und veröffentlichten Bremsversuche als grundlegend. In unseren Tagen haben mit den aus ihren Versuchen gezogenen Folgerungen H. ROSE [7], G. POLZIN [5] und A. TROSS [9, 10] weitere Fortschritte gemacht. Sie widmeten auch der Wirkung der Materialzusammensetzung und der Änderungen der Materialstruktur eine besondere Aufmerksamkeit.

* Der Verfasser führte die Versuche im Laboratorium des Lehrstuhls für Schienenfahrzeuge der Technischen Universität Budapest im Auftrag des Ministeriums für Verkehrs- und Postwesen durch.

1.2 Neuere Reibungstheorien

Die Aufgabe der Bremsung ist, die Geschwindigkeit der Fahrzeuge zu regeln, was sich eigentlich in der Umwandlung der kinetischen Energie des Fahrzeuges in andere Energiearten äußert. Im Eisenbahnbetrieb ist die am meisten verbreitete Bremsungsart die direkte Radbremsung oder, mit anderen Worten, die Klotzbremsung des Radsatzes. In diesem Falle wandelt sich die kinetische sowie die etwaige Potentialenergie des sich bewegenden Fahrzeuges in den Reibpartnern in Wärmeenergie um. Die Größe der entstehenden Bremskraft hängt entscheidend von der den Bremsklotz an den Radreifen anpressenden Klotzkraft, des weiteren vom Reibwert zwischen Bremsklotz und Radreifen ab. Bei Bremsversuchen und Forschungen ist es wichtig, die Reibung zu erhöhen und gleichzeitig den Verschleiß möglichst klein zu halten, ferner die Wirkung der verschiedenen Parameter auf den Reibwert kennenzulernen.

Bei konstanter Geschwindigkeit und spezifischer Bremsklotzkraft wird der Reibungswert auch durch die aus den geometrischen Abmessungen des Bremsklotzes berechnete Fläche beeinflusst. Aus den Versuchen ist festzustellen, daß je kleiner (bei einem gegebenen spezifischen Flächendruck) die geometrischen Abmessungen sind, desto höher der Reibwert ist. Das läßt sich dadurch erklären, daß sich der auf dem Radreifen aufliegende Bremsklotz wegen der Wärmeableitung während der Bremsung verformt, so daß sich seine, auf die Längsachse vertikalen zwei Kanten vom Radreifen trennen. Damit vergrößert sich der Kurvenhalbmesser des Klotzes, die Berührungs-Makrofläche vermindert sich. Dadurch ändern sich wieder die Wärmeleitungsbedingungen, was eine Verminderung des Kurvenhalbmessers des Klotzes zur Folge haben wird, und — während der Dauer der Bremsung — das Spiel wieder beginnt. Je kleiner die Reibungsfläche ist, desto weniger kann sich die Kante des Bremsklotzes aufbiegen und die Differenz zwischen der Nennfläche und der tatsächlichen Berührungsfläche vermindert sich. Dadurch wird die Wärmeverteilung gleichmäßiger und der Reibwert nimmt zu. Tafel 1 enthält einige diesbezügliche Angaben.

Tabelle 1

	Reibungsfläche (Nennwert) cm ²	$v = 20 \text{ km/h}$ $p = 10 \text{ kp/cm}^2$	$v = 30 \text{ km/h}$ $p = 5 \text{ kp/cm}^2$	$v = 80 \text{ km/h}$ $p = 10 \text{ kp/cm}^2$
Hütte V. B.	350,0	0,15	0,14	0,08
Metzkow	28,0	0,26	0,18	0,16
Tross	1,8	0,43	0,32	0,25
TU Budapest	1,0	0,46	0,44	0,29

Die Versuchsergebnisse der verschiedenen Forscher dürfen zahlenmäßig nur in gründlicher Kenntnis der Meßbedingungen verwendet werden, da die Absolutwerte der Ergebnisse durch die Meßbedingungen, die verwendeten

Stoffe in entscheidendem Maße beeinflusst werden. Die Abb. 1 und 2 enthalten einen Vergleich der Ergebnisse einiger Forscher, die unter annähernd gleichen Umständen entstanden. Die Tendenz der Kurven ist die gleiche, in den Zahlenwerten ist aber die Streuung groß. Abb. 1 zeigt die Änderung des Reibwertes in Abhängigkeit von dem Flächendruck, Abb. 2 in Abhängigkeit von

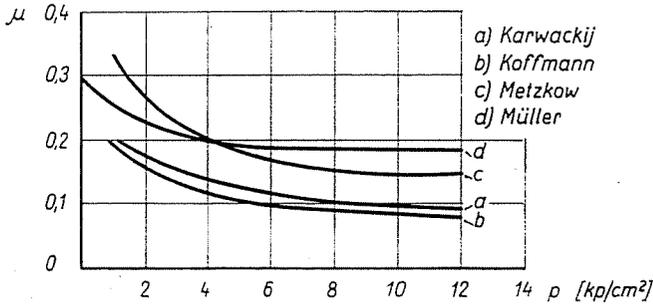


Abb. 1

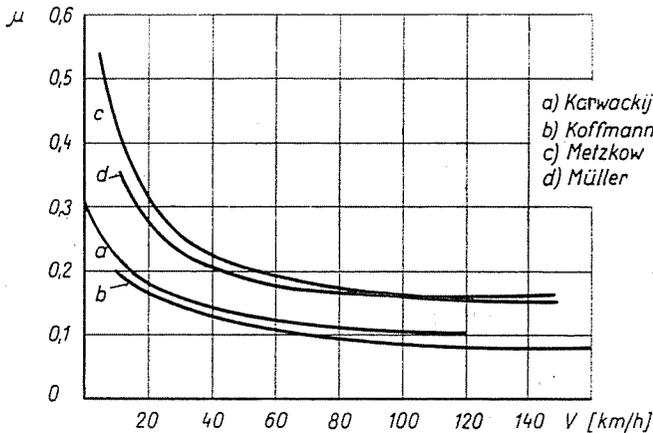


Abb. 2

der Geschwindigkeit. Bei Bremsversuchen befassen sich die Forscher neuerdings immer mehr mit der Materialzusammensetzung [2, 5, 6], den Änderungen der Materialstruktur sowie mit dem Einfluß der Flächentemperaturen auf die Reibungsverhältnisse.

Die bei Bremsversuchen gemachten Beobachtungen beweisen, daß sich sehr hohe lokale Temperaturen ergeben. Nach den Versuchen von BOWDEN—TABOR [1] entstehen an den Mikroteilen bei verhältnismäßig kleinen Belastungen und Geschwindigkeiten sehr hohe Temperaturen, sog. »Temperaturblitze«, die sogar 1000 °C erreichen.

Die Temperatur darf aber selbst bei der höchsten Reibbeanspruchung den Schmelzpunkt der Reibelemente nicht überschreiten bzw. darf sich dies nur auf eine sehr dünne Grenzschrift erstrecken. Die hohen Temperaturen können im Ausgangsstoff bedeutende Gefügestrukturänderungen hervorrufen. POLZIN [5], der sich mit den Gefügestrukturänderungen eingehend befaßte, stellte fest, daß sich die perlitische Struktur nach Wärmebehandlung durch die Bremsung in eine Martensitstruktur umwandeln kann und, daß eine Neigung zur Strukturfestigung bzw. zur Verhärtung besteht. Beim Vergleich von phosphorarmen Bremsklotzwerkstoffen mit phosphorreichen wies er nach, daß die phosphorarmen Perlit-Graugußsorten eine größere Neigung zur Strukturänderung, zur Verhärtung haben als die phosphorreichen.

Die Schwierigkeiten der Temperaturmessung bildeten sicherlich den Grund dafür, daß der Einfluß der Temperatur auf den Reibwert nicht nur unter Betriebsverhältnissen, sondern auch auf dem Probestand selten geprüft wurde. An die in diesem Zusammenhang veröffentlichten Ergebnisse sind in der Regel einschränkende Bemerkungen hinzugefügt und die Ergebnisse widersprechen einander. Das unterschiedliche Temperaturverhalten des Reibwertes kann dadurch erklärt werden, daß Bremsklötze verschiedener Zusammensetzung oder Konstruktion verwendet wurden. Es ist weiterhin zu erwähnen, daß auch die verschiedenen Temperaturmeßverfahren die Meßergebnisse stark beeinflussen.

Es ist klar, daß es für den Betrieb sehr wichtig ist, zu kennen, wie sich der Reibwert bei neuen und bei den gebräuchlichen Bremsklotzwerkstoffen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, von dem Flächendruck und anderen Parametern ändert. Mit der durchgeführten Versuchsreihe verfolgten wir das Ziel, die Reibungsverhältnisse der Ungarischen Bremsklotzwerkstoffe mit geringem und hohem Phosphorgehalt unter Laborverhältnissen in Abhängigkeit von den auch aus der Literatur bekannten Parametern zu untersuchen. Damit erhielten wir einerseits eine Vergleichsgrundlage und gelangten andererseits durch Erweiterung des Bereiches der Parameter und durch die Messung eines neuen Parameters, der Temperatur, zu neuen Erkenntnissen. Nachstehend werden das Meßverfahren, der Prüfstand beschrieben, die erhaltenen Ergebnisse kurz bewertet und es wird über einige, bei der Messung beobachtete, von uns für sehr wichtig gehaltene, andere Momente berichtet.

2. Beschreibung des Meßverfahrens und des Prüfstandes

2.1 Temperaturmessung

Zur Messung der Oberflächentemperatur der Reibungselemente wird meistens ein Thermoelement benutzt, u. zw. wegen des einfachen mechanischen Aufbaues der vielseitigen Verwendungsmöglichkeiten, des geringen Raum-

bedarfs, des einfachen Einbaues und des zuverlässigen Funktionierens dieser Elemente. Man muß sich jedoch dessen bewußt sein, daß das Thermoelement die höchsten Temperaturen im tatsächlichen Berührungsbereich der Reibungselemente keineswegs messen kann. Das Thermoelement gibt bloß die durchschnittlichen Temperaturen in den Berührungsbereichen an. Infolge ihrer Inertie wird ein Teil der Temperaturspitzen von sehr kurzer Dauer überhaupt nicht erfaßt. Ein unmittelbarer Vergleich der einzelnen Messungen erfordert wegen der Vielfalt der verwendeten Meßmethoden, ferner wegen der Verschiedenheit der Bremsbeanspruchungen, der Bremsklotzwerkstoffe und anderer Versuchsbedingungen große Vorsicht. Die verschiedenen Meßverfahren eignen sich aber dazu, die Temperaturwirkungen zu analysieren. Wir benutzten für die Messungen zwei parallel geschaltete NiCr—Ni Thermoelemente. Die Spannung wurde mit einem Linienschreiber-Kompensographen registriert.

2.2 Kraftmessung

Die Druckkraft F wurde durch Gewichtsbelastung eingetragen. Die Messung der Tangentialkraft F_s stellte eine schwierige Aufgabe dar. Die Kraft F_s wurde mit Hilfe von auf einen Einfeldträger geklebten Dehnungsmeßstreifen gemessen, damit sie an die Stellen mit gleichen Momenten kommen. Der Einfeldträger wurde mit der Kraft F_s so belastet, daß der Reibwert durch eine den Probestab abstützende Druckstange übertragen wurde. Die der Belastung proportionalen elektrischen Spannungen wurden auf einem Meßband registriert.

2.3 Beschreibung des Prüfstandes

Für die Durchführung der Messungen wurde ein besonderer Prüfstand gebaut, der die Änderung der Drehzahl und der Belastung ermöglichen sollte. Beide Werte wurden stufenweise geändert. Die gemessenen Geschwindigkeitsstufen waren:

18,2; 29,7; 42,0; 49,4; 62,3; 86,4; 99,1; 120,4; 140,9; 167,4; 195,1 km/h.

Die Druckstufen:

2,18; 4; 6; 8; 10; 12; 16; 20; 25; 32; 40; 50 kp/cm².

Die Geschwindigkeiten wurden bei konstanter Motordrehzahl durch Keilriemenantrieb gesichert. Die Radscheiben wurden aus Kleinbahn-Monoblockrädern hergestellt. Es wurden zwei Radscheiben verwendet mit den Durchmessern von 330 mm bzw. 370 mm. Die Anordnungsskizze des Prüfstandes ist in Abb. 3 zu sehen.

Der Probestab 1 wurde über den Druckkeil 2 mit dem Gewicht 3 belastet. Der Druckkeil und der Probestab waren derart ausgebildet, daß in der Achse des Probestabes, zwischen der Verschleißscheibe 8 und dem Probestab

1 eine Einzellast wirkt. Die entstehende Reibungskraft wurde mit Druckstange 5 auf das Federblatt 6 übertragen. Die Deformation des auf das Federblatt geklebten Meßstreifens 7 ist der entstandenen Reibungskraft proportional. Nach Eichung sowie in Kenntnis der Übersetzungen kann die entstehende Reibungskraft berechnet werden. Durch den Antriebmotor wird die an zwei Stellen gelagerte Achse mit Hilfe der Keilriemenscheibe bzw. des Keilriemens angetrieben. Das Meßgestell wurde so ausgebildet, daß sowohl der Leitarm 4 wie auch der Druckkeil 2, die Druckstange 5 und das Federblatt 6 — natürlich innerhalb gegebener Grenzen — auf einen beliebigen Wert eingestellt werden können. Die Druckstange und das Federblatt wurden am Meßgestell so angeordnet, daß diese die Reibungskraft ohne Verlust und Einklemmung auf die Dehnungsmeßstreifen übertragen.

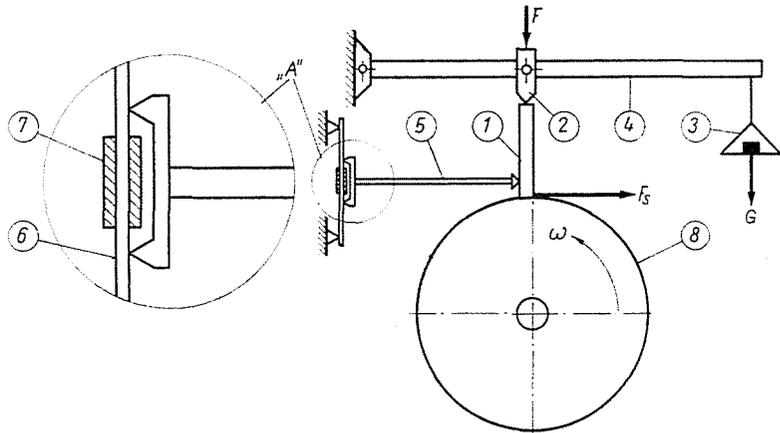


Abb. 3

2.4 Die zu den Messungen verwendeten Werkstoffe

Die Materialzusammensetzung wurde im Laufe der Prüfungen ständig kontrolliert. Die Materialzusammensetzung und die Gefügestruktur der Probe­stäbe sind in Tafel 2 zusammengestellt. Die Reibungsfläche der quaderförmigen

Tabelle 2

Zusammensetzung %	$\left\{ \begin{array}{l} \text{C} \\ \text{Si} \\ \text{Mn} \\ \text{S} \\ \text{P} \end{array} \right.$	$\begin{array}{l} 3,0-3,1 \\ 1,5-1,6 \\ 0,6-0,7 \\ 0,1-0,2 \\ 1,3 \end{array}$
Gefügestruktur		Perlitgefüge mit homogener Phosphidverteilung
Härte HB		210-240

Probestäbe beträgt 5×20 mm bei einer Länge von 140 mm. Es wurden nur Probestäbe homogener Zusammensetzung geprüft.

3. Meßergebnisse und Auswertung

Der Verlauf der Prüfstandmessungen war wie folgt:

1. Der Dehnungsmeßstreifen wurde mit einem bekannten Gewicht belastet (Eichung).
2. Die Radscheibe wurde mit einer, der Übersetzung entsprechenden konstanten Drehzahl angetrieben.

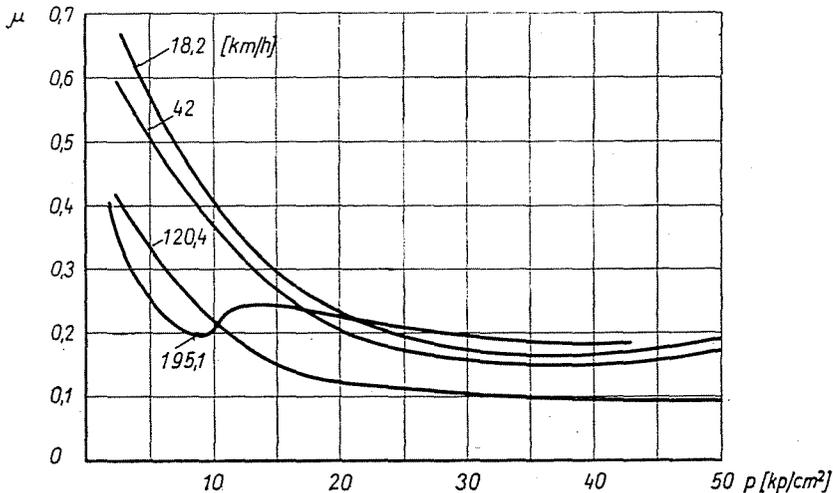


Abb. 4

3. Eine konstante Belastung wurde mit Hilfe eines der Belastung entsprechenden Gewichtes eingetragen.

4. Zwei parallel geschaltete Thermoelemente wurden ungefähr 0,2 mm von der Berührungsfläche an die Seite des Probestabs geschweißt. Die durch den Temperaturunterschied zwischen dem in schmelzendes Eis getauchten Kaltpunkt und dem Wärmepunkt verursachte Spannungsdifferenz wurde mit dem Linienschreiber-Kompensographen registriert.

5. Am Registrierapparat wurde die bei einem gegebenen Druck und bei einer gegebenen Geschwindigkeit durch die Reibungskraft verursachte Anzeige aufgezeichnet. In Kenntnis des Maßstabes und der Übertragungen wurde die Reibungskraft berechnet.

Bei den im vorigen Abschnitt beschriebenen Geschwindigkeits- und Druckstufen wurden die Reibungskraft und die Oberflächentemperatur bei jeder der zusammengehörenden Stellen mindestens dreimal gemessen.

Aus den Mittelwerten dieser Angaben ließen sich zahlreiche Diagramme zeichnen. Abb. 4, 5, 6 zeigen die Änderung der Reibungswerte in Abhängigkeit von dem Flächendruck, der Geschwindigkeit sowie der Flächentemperatur.

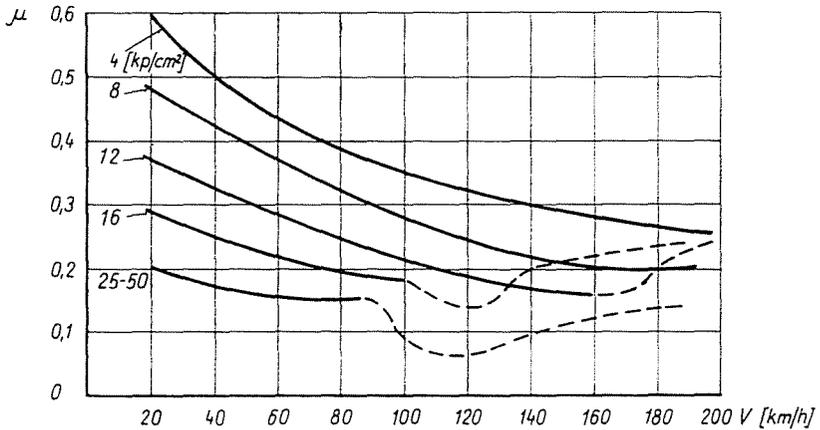


Abb. 5

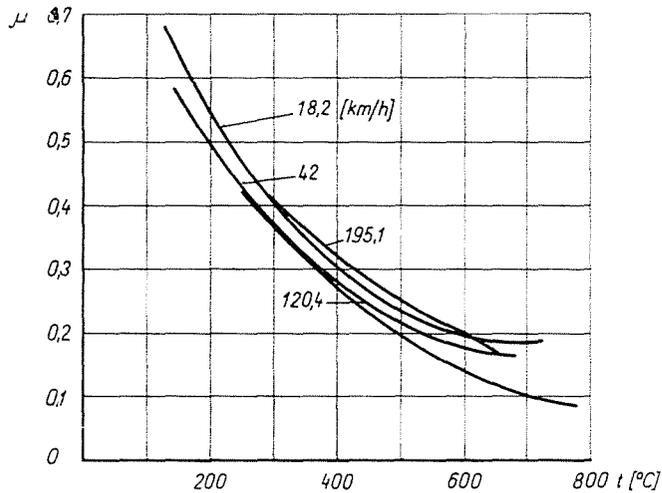


Abb. 6

Vier verschiedene Geschwindigkeiten als Parameter gewählt, läßt sich aus Abb. 4 ablesen, daß der Reibungswert mit zunehmendem Druck abnimmt. Bei höheren Geschwindigkeiten wird der hyperbolische Charakter durch eine Parabel dritten Grades abgelöst. Abb. 5 zeigt eine ähnliche Tendenz mit dem Unterschied, daß hier der Flächendruck als Parameter gewählt wurde. Bei den Prüfungen war es auffallend, daß nach Erreichen eines gewissen Druckes und

einer gewissen Geschwindigkeit ein außerordentlich labiler — von uns »Sprühteufel« genannter — Zustand eintrat. An jenen Stellen, wo diese Erscheinung auftrat, ließ sich eine sprunghafte Veränderung der Reibungs- und Verschleißverhältnisse verzeichnen. Im »Sprühteufel«-Zustand wurde auch der Charakter der Kurven auffallend verändert. Dieser Zustand ist in Abb. 5 mit gestrichelter Linie bezeichnet.

Abb. 6 zeigt ein sehr interessantes und wichtiges Ergebnis der Versuche. Nach unseren Feststellungen vermindert sich der Reibungswert eindeutig mit

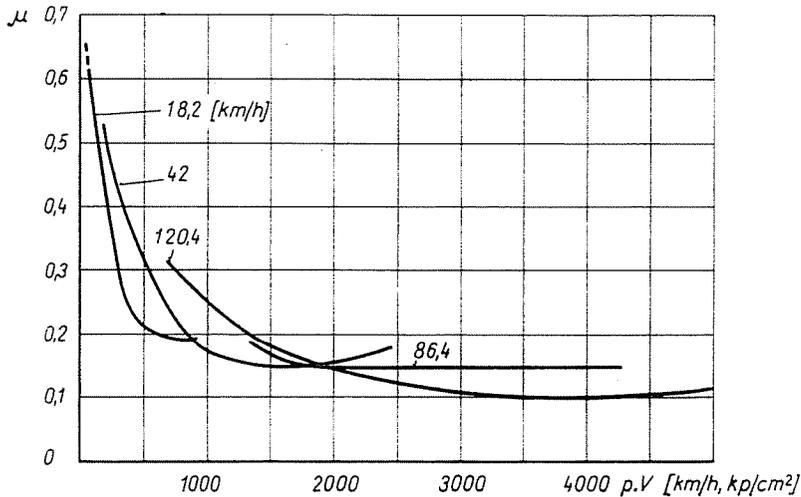


Abb. 7

zunehmender Oberflächentemperatur. Aus der Abbildung ist es — einige Geschwindigkeiten als Parameter gewählt — ersichtlich, daß zwischen den Kurven eine sehr koherente Beziehung besteht.

Aus den zusammengehörigen Druckwerten p und Geschwindigkeitswerten V wurden Produkte gebildet, mit deren Hilfe die Änderung des Reibungswertes in Abhängigkeit von diesen Produkten pV untersucht wird. Abb. 7 veranschaulicht die Beziehung zwischen den Produkten pV und dem Reibungswert, die Geschwindigkeit als Parameter gewählt. Obwohl diese Kurven die transformierten Formen der Abbildungen 4 und 5 sind, ist es bei der Bewertung der Kurven zu berücksichtigen, daß das Produkt pV Leistungscharakter hat. Aus Abb. 7 läßt sich feststellen, daß zwischen den Kurven eine koherente Beziehung besteht. Nach einem gewissen Wert des Produktes pV ist die Änderung des Reibungswertes klein und auch die Streuung ist gering.

Aus diesen Kurven können auch wichtige Folgerungen auf die Betriebsverhältnisse gezogen werden.

4. Ergebnisse der im Laufe der Versuche durchgeführten Materialprüfung

a) Die Oberflächenschicht der Probekörper austenisiert sich, aber die »Austenitbrocken« sind mit sehr sprödem, bei der Verschleißtemperatur stellenweise schmelzendem Phosphideutektikum umhüllt. Die Abnutzung ist daher »abblätterungsartig« und eine Oberflächendeformation kann wegen des dicken, spröden Phosphidnetzes praktisch nicht zustande kommen.

b) Es läßt sich feststellen, daß bei dem Verschleiß unter hoher Belastung und bei großer Geschwindigkeit mit der Änderung des ursprünglichen Gefüges in einer ungefähr 2 mm tiefen Oberflächenschicht gerechnet werden kann. Nach unseren Untersuchungen bestand die Änderung im allgemeinen darin, daß sich diese Schicht austenisierte und nach Abkühlung wieder umwandelte. Je nach der Art der Austenisierung sowie der Geschwindigkeit der Abkühlung können die verschiedensten Umwandlungsprodukte entstehen.

In den untersuchten Probekörpern wurden körniger Perlit, lamellarer Perlit, Bainit und stellenweise Martensit gefunden. Bei der Untersuchung der Oberflächenschicht der bei verschiedenen Parametern der Verschleißprüfung unterzogenen Probekörper wurden verschiedenartige Martensitkrusten gefunden. Eine zusammenhängende Martensitkruste auf der ganzen Oberfläche gab es im allgemeinen nur selten. Es ist zu bemerken, daß auch an bei der Verschleißprüfung als weich qualifizierten Probestäben stellenweise Martensitinseln vorhanden waren.

5. Weitere Prüfungsmöglichkeiten

Aus den Meßergebnissen ist es eindeutig festzustellen, daß zwischen den verschiedenen Veränderlichen kein funktioneller, sondern ein stochastischer Zusammenhang besteht. Das bedeutet, daß zuverlässig auswertbare Ergebnisse nur dann erhalten werden, wenn unter den verschiedenen Veränderlichen eine genügend große Anzahl von Meßergebnissen zur Verfügung steht. Diese Tatsache ist durch den Umstand begründet, daß die sterilen Laborverhältnisse unter Betriebsverhältnissen nicht zu realisieren sind, ferner daß die Gießtechnologie keine so homogene Materialzusammensetzung ermöglicht, wie das bei der Versuchsreihe der Fall war.

Nachstehend sollen einige Forschungsaufgaben genannt werden, auf die wir unsere Untersuchungen auszudehnen beabsichtigen:

a) Eine große Anzahl von Messungen für einige Lastfälle innerhalb praktischer Grenzen, um mathematische Zusammenhänge zu gewinnen.

b) Untersuchung der Reibungsverhältnisse von Probestäben mit verschiedenen Nenngrundflächen und von verschiedener Form.

c) Messungen bei kontinuierlich (nicht stufenweise) veränderlichen Geschwindigkeiten.

d) Gründliche Untersuchung der Wirkung des Phosphorgehaltes. Diese Überlegungen werden auch durch die Tatsache unterstützt, daß die Erhöhung des Phosphorgehaltes nach einigen Forschern die Reibungsverhältnisse nur bis zum Phosphorgehalt von 1,2% günstig beeinflußt.

e) Labormessungen unter Verhältnissen, die den tatsächlichen Bremsvorgang besser annähern (bei sich in Abhängigkeit von dem Bremsweg und der Bremszeit ändernden p und V), um die Reibungswerte und den spezifischen Verschleiß zu bestimmen. Das wird besonders auch dadurch motiviert, daß wir Neigung zu labiler Stoffstrukturänderung mit Funkenbildung bei Bremsbeanspruchungen feststellten, die die in der Praxis vorkommenden Werte weit überschreiten. Um diese Erscheinungen besser kennenzulernen und besser in der Hand zu halten, ist es unerlässlich, neben den Modellversuchen im Labor mit den bei einer wirklichen Bremsung vorkommenden, veränderlichen Parametern (p , V), auch Versuche in technischem Maßstab vorzunehmen. In dieser Weise läßt es sich genauer feststellen, bis zu welchen Bremsbeanspruchungen die Bremsklotzwerkstoffe in der Praxis verwendet werden können.

Zusammenfassung

Der Aufsatz gibt zuerst einen Überblick über die bisherigen Forschungsergebnisse. Die Bedeutung der Bremsversuche wird begründet. Die am Lehrstuhl durchgeführten Bremsversuche, die Meßwerte und Versuchsergebnisse werden angegeben. Auf Grund der Meßergebnisse wird ein neuer Zusammenhang zwischen dem Reibungswert und der Oberflächentemperatur erhalten. Verfasser beschäftigt sich auch mit der Wirkung der bei der Bremsung auftretenden Strukturänderungen.

Literatur

1. BORDEN—TABOR: Reibung und Schmierung fester Körper. Springer Verlag, Berlin 1959.
2. KRAGELSKI, I. W.: Reibwert. Technischer Verlag Bp. 1961.
3. METZKOW, B.: Ergebnisse der Versuche für die Ermittlung des Reibungswertes zwischen Rad und Bremsklotz. Glasers Annalen, 1926 H. II. p. 149—159.
4. PIWOWARSKY, E.: Hochwertiges Gußeisen. Springer Verlag, Berlin 1951.
5. POLZIN, G.: Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an Werkstoffen für Klotzbremsen von Schienenfahrzeugen. Glasers Annalen, 1963 H. 4. p. 211—219, H. 6/7, p. 372—378. H. 8, p. 426—438.
6. RINGFEIL: Verschleißfester Grauguß — Bedingungen zu seiner gießtechnischen Beherrschung und gütemäßigen Beurteilung. Freiburger Forschungshefte, Reihe B. 1954, H. 7. p. 7—28.
7. ROSE, H.: Probleme der Reibwertabhängigkeit bei Schienenfahrzeug-Bremsstoffen unter besonderer Berücksichtigung des Plastbremsklotzes. Dtsch. Eisenbahntechnik, 1962, H. 2.
8. SAUTHOFF, F.: Über die Möglichkeiten zur Berechnung der Bremswege von Eisenbahnzügen. Glasers Annalen 1961, H. 2, p. 48—61.
9. TROSS, A.: Der Mechanismus der Reibung. Glasers Annalen, 1962, H. 5, p. 133—149, H. 11. p. 447—456 1963, H. 6/7, p. 365—371.
10. TROSS, A.: Über das Wesen und den Mechanismus der Festigkeit. München und Zell am See, 1966.

Dr. József VAJDA, 1502 Budapest, Postfach 91, Ungarn