フェノール樹脂系複合材料の 摩擦・摩耗に関する研究

第1報 フェノール樹脂の摩擦・摩耗挙動

成澤郁夫^{*1}・栗山 卓^{*1}・高久一彦^{*2}

Tribology of Phenolic-based Composites

I. Tribology of Phenolic-resins

IKUO NARISAWA^{*1}, TAKASHI KURIYAMA^{*1}, KAZUHIKO TAKAKU^{*2}

Phenolic-based composites for automobile frictional materials contain a variety of inorganic fillers and modifiers in addition to the base resin and fibers (mostly asbestos). The frictional behavior at low speeds do not provide a sufficient foundation for the prediction of the friction and wear behavior at high speeds because the temperature rise at high speeds causes chemical changes in some of the friction constituents of the composite system.

The purpose of this paper is to provide a clear interpretation of the frictional performance of the basic phenolic resins at high speeds. The thermal and mechanical properties of the phenolic resins may significantly affect the friction and wear behavior of the composites. Three types of phenolic resin which have different thermal stabilities have been tested. It has been shown that the frictional behavior at high speeds involves three changes in the frictional coefficient with sliding distance: an initial decrease at low speeds, an increase at medium speeds, and a final constant value after frictional changes with fluctuations. The frictional behavior closely corresponds to that of the temperature change during sliding. An increase in density of cross-linking reduces the wear rate. Insufficient cross-linking of the phenolic resin produces different frictional behavior compared with the fully cross-linked structure.

Key words : Friction/Phenolic-resin/Wear/Tribology

1. 緒 言

フェノール樹脂は 1907 年に米国の L. H. Baeke-

land によって開発されて以来、各種の軸受類、ピストンリング、カム、ローラー、無音歯車あるいはブレーキ材料などの耐摩耗性と耐熱性を要求される分野の機械部品として多く使用されてきている。

また、これらの中でも自動車用ブレーキ材料（ライニング材料、ディスクパッド）としては、石綿、フェノール樹脂および摩擦摩耗調整剤からなる一種の高分子系複合材料が用いられている。この摩擦摩耗調整剤としては各種の無機材料、金属および高分子材料が用いられている。最終的なブレーキ材料の成分の数は

^{*1} 山形大学 工学部

米沢市城南 4-3-16 (〒992)

Yamagata University, Materials Engineering and Science

Jonan 4-3-16, Yonezawa 992, Japan

^{*2} 山形大学 工学部大学院

Yamagata University, Master-course Student

1992. 6. 22 受理

Table 1 Phenolic materials used for frictional testing

Phenolic resin	Abb.	Chemical structure
Novalak type	WS	
Acrylic rubber modified	RN	30% rubber
Phnolic aralkyl	XL	

10 成分以上にも及んでおり、複雑な組成となっている。歴史的にみると、自動車の高速化および高付加価値化が進むにつれて、ブレーキ材料に対する要求が厳しくなっている上に、石綿が健康上の理由から使用できない情勢になってきている。

ブレーキ材料に対する摩擦摩耗特性に関した要求は次に示す3項目に集約される。すなわち、①安定した摩擦係数(0.30~0.45)、②摩耗ができる限り少ない(3)、③制動中の摩擦音(摩擦振動)がないことである。

これらの摩擦摩耗特性は、材料の強度と同じように、試験してみなければ求めることのできない特性である。すなわち、材料や摩擦条件が決まっても、摩擦摩耗特性を定量的に予測することができない。したがって、優れたブレーキ材料を開発するために、試行錯誤的に人力、時間および資本を投入しており、しかも経験則に依存して材料開発を行っているのが現状である。たとえば、「なぜ、ブレーキ材料に繊維が必要なのか」という根本的な疑問に対してさえも明確な答えが与えられていない。しかし、ブレーキに関する研究はこれまで数多く行われてきており、その多くは高速条件下におけるブレーキ材料の摩擦摩耗特性がフェノール樹脂の熱分解反応によって大きく影響されると指摘している^{1)~10)}。

本報ではまずブレーキ材料の結合剤としての基本となるフェノール樹脂の摩擦・摩耗特性を高速条件下で明らかにすることが重要と考えて、ノボラックタイプフェノール樹脂、アクリルゴム変性フェノール樹脂およびフェノールアラキル樹脂について実験的に検討した。

2. フェノール樹脂の基本物性

2.1 試料

試料には Table 1 に示すような市販のノボラックタイプフェノール樹脂(以下 WS とする)、フェノール樹脂の脆さを改良したアクリルゴム変性フェノール

Table 2 Curing schedule for phenolic-resin

A	30 h at 100°C
B	30 h at 100°C, then 3 h at 150°C, and then 3 h at 180°C

Curing agent : hexamethylene tetramine 12 phr

樹脂(以下 RN とする)およびフェノール性水酸基の密度を低くし、耐熱性を向上させたフェノールアラキル樹脂(以下 XL とする)を用いた。いずれの試料とも硬化剤にはヘキサミンを使用した。それぞれの試料および硬化剤の化学構造式および重量部も Table 1 に示すとおりである。

試験片は、これらの粉末状の試料を 24 時間以上常温で真空乾燥した後、金型に封入して油圧プレスを用いて直径 12mm の円筒状に予備成形し、金型に入れたまま加熱オープンで硬化させた。硬化条件は Table 2 に示すように 2 種類とした。

2.2 各種基本物性の測定法

a. 熱分析

2 種類の条件で硬化させたそれぞれのフェノール樹脂について示差熱-熱重量測定(島津 DTG-20)を行った。測定には樹脂の表面より採取した試料を 6mg 用いた。測定条件は空気気流中(60 ml/min)、昇温速度 10°C/min とした。

b. 膨潤度

2 種類の条件で硬化させたそれぞれのフェノール樹脂(直径 12mm、高さ 8mm の円柱状)を溶媒のメチルエチルケトン(MEK)とともにガラスびんに入れ密閉し、温度 23°C、相対湿度 65% の恒温室に保存し、所定の時間ごとに試料の重量を測定した。また、膨潤度は、 W/W_0 は、以下のように定義した。

$$\text{膨潤度} = W/W_0$$

ここで、 W は各時間におけるフェノール樹脂の重量であり、 W_0 は試験前のフェノール樹脂の重量である。

(a) Novalak type phenolic resin

(b) Acrylic rubber modified phenolic resin

(c) Phenolic-aralkyl resin

Fig. 1 Thermogravimetric curves of phenolic-resin

c. 硬さ試験

測定箇所は摩擦面となる円柱状の試験片の底面とした。測定前に測定面をエミリー紙(1500番)で仕上げ、その後、恒温室に48時間以上放置した。硬さはマイクロビッカース硬度計(明石製作所製)により測定し、試験荷重は9.8Nとした。

d. 圧縮試験

試験片形状寸法は膨潤試験と同様である。試験機は電動油圧サーボ式試験機(島津サーボパルサ EHF-5)を用いた。試験条件は室温大気中、変位速度10 mm/minとした。

Fig. 2 A schematic illustration of oxidation temperature and thermal decomposition temperature

Fig. 3 Oxidation and thermal decomposition temperatures of three types of the phenolic-resin

2.3 結果

a. 熱特性

各機脂の示差熱-熱重量測定結果を Fig. 1 に示す。これよりわかるように、どのフェノール樹脂の重量も硬化条件によらず、温度の上昇につれて一定値をとった後、次第に増加し、その後続いて減少しはじめ、ついには急激に減少する。この初期の重量増加はフェノール樹脂の酸化によるものと考えられる。また、後期の急激な重量減少はフェノール樹脂の酸化劣化が起これ、高分子鎖の切断および低分子化が生じているものと考えられる。

本実験の熱重量測定結果より Fig. 2 に示すような

方法で酸化温度および熱分解温度を定義し、これらの結果と合わせて 400°C における重量減少率を Fig. 3 に示した。これより明らかなように、硬化条件の影響は WS および XL の酸化温度でみられ、いずれのフェノール樹脂の場合も硬化条件 A (100°C×30 h) の酸化温度が高くなる。それに対して、RN の場合は硬化条件の影響はみられない。耐熱性のひとつの指標となる熱分解温度は、XL, WS, RN の順に低くなっており、XL が最も耐熱性に優れている。しかし、その前段反応となる酸化は他の種類より生じやすい。

b. 膨潤特性

各樹脂の W/W_0 —時間曲線を Fig. 4 に示す。硬化時間の長い B (100°C×30 h+150°C×3 h+180°C×5 h) の条件において、各樹脂の W/W_0 値の変化はわずかであり、硬化反応が充分進んでいることがわかる。それに対し、硬化時間の短い A の条件では、RN, WS は膨潤はやはり平衡になるが、いずれも B 条件より高い値をとり、XL は 30 時間程度で崩壊した。したがって B 条件に比べて硬化反応が不充分であることがわかる。

c. 圧縮特性

各樹脂の公称応力 σ と公称ひずみ ϵ との関係を硬化条件 A および B について、Fig. 5 (a), (b) にそれぞれ示す。本結果より、WS は硬化条件 A では脆性的に破壊し、降伏の見られた硬化条件 B に比較し、強度、弾性率とも低く膨潤試験の結果とよく対応する。RN では、硬化反応が充分進んでいるとみられる B 条件の降伏応力値が A 条件より小さくなるものの、弾性率はほぼ等しく、また降伏後の強度は B 条件が高く、この場合も膨潤試験の結果とほぼ対応する。しかし、XL は弾性率、降伏値とも硬化反応が進んでいない A 条件が高く、膨潤試験の結果と逆の対応を示す。この原因については不明であるが、硬化反応進行に伴う縮合水による気泡発生が弾性率の低下と関係するものと考え

られる。XL は WS, RN に比較し、耐熱性はあるが強度は劣る。

d. 硬さ特性

各樹脂のマイクロビッカース硬度 Hv について Fig. 6 に示す。本結果より WS, RN と同、膨潤、圧縮試験の結果とよく対応し、硬化反応の進んでいる B 条件が高い値をとる。XL では圧縮試験の結果と同様に他の樹脂より Hv 値は小さく、また硬化時間の長い B 条件がより低い値となる。以上のように、摩擦摩耗挙動と関係の大きい表面近傍の力学的特性とバルクの力学的特性がよく対応することがわかる。

3. 摩擦・摩耗特性

3.1 試験片および実験方法

a. ピンおよびディスク

ピン形状は直径 12 mm, 高さ 8 mm の円柱である。摩擦面となる円柱の底面をエミリー紙 (1500 番) で仕上げ、その後、実験室に 48 時間以上放置した。ディスクとしては、市販のねずみ 鋳鉄 (FC 20) を直径

Fig. 4 The effect of resin type and curing condition on water absorption.

Fig. 5 The effect of resin types on compressive stress-strain curves

Fig. 6 The effect of resin types on microvickers hardness.

Fig. 7 High speed friction testing machine
(1) Specimen, (2) specimen holder, (3) disk (cast iron), (4) weight, (5) linear motion bearing, (6) thermocouple, (7) bearing, (8) plate for torque measurement and (9) strain gauge

130 mm, 厚さ 9.4 mm に機械加工したものを、摩擦面は平面研削した後 100 番のエミリー紙で一方方向に研摩し、試験直前にアセトン洗浄した。

Fig. 8 Typical frictional coefficient-time and temperature-time curves of the novolac type phenolic resin

Fig. 9 Typical frictional coefficient-time and temperature-time curves of the acrylic rubber modified phenolic resin

b. 実験方法

試験機は本研究室で試作した高速回転ピン・オン・ディスクタイプ摩擦摩耗試験機を使用した。試験機の概要を Fig. 7 に示す。この試験機は、ピンにおもり④を用いて荷重を加え、高速回転するディスク③に接触させて摩擦摩耗実験を行う装置である。摩擦トルクは、ベアリング⑧を介して摩擦トルク検出用板⑨に伝達され、その伝達された摩擦トルクは、ひずみゲージ⑩によって電気的出力として検出される。ディスクの回転はインバーターにて制御される。

この試験機を用いて、ノボラックフェノール樹脂、アクリルゴム変性フェノール樹脂およびフェノールアラキル樹脂を A タイプ、B タイプと硬化条件を変えた樹脂について、荷重を 38 N, すべり速度を 5.2 m/s の一定条件で試験を行った。さらに、B タイプで硬化させた各樹脂では、荷重は 38 N 一定とし、すべり速度を 2.0 m/s, 5.2 m/s および 15.2 m/s に変えた。すべての試験とも、ピン摩擦面より 2 mm 上部に熱電対(銅-コンスタンタン)を埋め込み、ピン温度を連続的に測定した。試験はすべて、すべり距離が 9360 m 到達した時点で終了させた。摩耗量は試験開始終了前後のピン重量減少量とした。試験は室温大気中で行い。試験終了後ピン表面を実体顕微鏡観察および走査電子顕微鏡観察を行った。

3.2 摩擦・摩耗挙動におよぼす硬化条件の影響

a. 摩擦挙動におよぼす硬化条件の影響

硬化条件 A および B での各樹脂の摩擦係数 μ およびピン温度 T_p と摩擦距離 L との関係を、Fig. 8~10 にそれぞれ示す。

Fig. 8 に示す WS では、硬化条件 A および B とも摩擦直後高い μ を示すがその後低下し、硬化条件 A では、単発的な μ の上昇を伴いながら緩やかに増加するのに対し、硬化条件 B では μ は変動を伴いながら硬化

Fig. 10 Typical frictional coefficient-time and temperature-time curves of the phenolic aralkyl resin

Fig. 11 Relation between frictional coefficient and sliding distance

条件Aに比較して大きく増加する。また、ピン温度 T_p は摩擦直後に、急激な温度上昇し、その後それぞれの硬化条件の μ と対応しながら上昇傾向となる。Fig. 9 に示す RN において、硬化条件Aでは T_p の上昇にかかわらず μ は一定値をとるのに対し、硬化条件Bでは μ の低下後は変動を伴いながら上昇し、 T_p も上昇傾向となり WS と比較的類似した挙動となる。Fig. 10 に示す XL において、硬化条件Aで μ は一定値をとった後、変動を伴いながら上昇、下降し、ほぼ一定範囲で変動を繰り返すようになる。また、 T_p は上昇後、 μ の変動開始点付近よりほぼ一定になる。いっぽう、硬化条件Bでは、WS、RN に比較して μ の変動が小さくなるが、 μ の低下後上昇し、 T_p も上昇傾向となり、WS の挙動とよく類似する。

以上述べたように、いずれの樹脂においても、硬化条件の違いにより μ は異なった挙動を示し、硬化反応が進んでいないA条件では、それぞれの樹脂間で別の μ の挙動となるのに対し、硬化反応が進んでくるとそ

Fig. 12 Wear rate of three types of the phenolic resin

れぞれの樹脂間に共通した μ の挙動が現れる。これらの点をさらに定量的に比較した結果が Fig. 11 の (a) および (b) である。なお、ここでの μ は各曲線の下限界値を示している。本結果からわかるように、硬化反応が不十分なとき、XL と WS の μ が最終的に近い値をとるが、すべり途中での傾向はすべて異なる。しかし、硬化反応が進んでくると RN が若干小さくなるが、それぞれの樹脂間の μ 値は定量的にも一致してくる。すなわち、本条件でのすべり速度およびすべり距離範囲において、硬化反応が不十分なときは一次構造の相違により、 μ はまったく異なった挙動となるが、硬化が進行すると一次構造の相違による μ の挙動変化は小さくなり、 μ の変動のみに反映されてくることがわかる。

b. 摩耗挙動におよぼす硬化条件の影響

硬化条件AおよびBに変えた各樹脂の摩耗率 W を Fig. 12 に示す。図からわかるように、いずれの樹脂においても硬化反応が進んでいないA条件の摩耗率が大きくなり、とくに WS、RN では摩耗率増加が顕著である。また、各樹脂間の摩耗率は硬化条件によらず、XL、RN、WS の順で大きくなる。この傾向は熱分解温度のもっとも高い XL がもっとも小さな摩耗率をとることとよく対応するものの、ほかの RN、WS 間に対しては当てはまらない。また、圧縮試験、硬さ試験の結果との対応は RN、WS の硬化条件による差については、膨潤度が大きくかつ力学的な強度が高いもののほど摩耗率が低くなる点で一致するが、XL ではこの関係が逆転する。さらに、樹脂間の比較では摩耗率と力学的性質の大小関係との相関はみられない。したがって、XL については、硬化反応時間の差による二次構造（架橋密度）より一次構造に起因した高耐熱性

Fig. 13 The SEM microphotographs of the worn surface. The arrow indicates sliding direction (a) Novalak type phenolic resin, (b) Acrylic rubber modified phenolic resin and (c) Phenolic aralkyl resin

が耐摩耗性の向上に関係し、逆に、RN、WS についてはそれぞれ二次構造（架橋密度）が耐摩耗性に関係することがわかる。

c. 摩擦面におよぼす硬化条件の影響

各樹脂の摩擦面を試験前後で SEM 観察により比較した結果を Fig. 13 に示す。摩擦後の表面の実体顕微鏡観察によれば硬化反応が進んでいない A 条件において、WS、XL では摩擦面は黒く変色してその変色した部分がまだらに分布している。このように WS と XL の摩擦面形態はよく一致し、両者の μ が最終的に近い値をとることとよく対応する。しかしながら、RN では試験前後の変色および形態変化は少なく、

WS、XL と異なった傾向を示す。他方、硬化反応が進むと摩擦面は変化する。すなわち、B 条件において WS、XL では摩擦面の変色は硬化 A 条件より低下し、摩擦面形態は、WS が XL より顕著ではあるが、両者とも摩擦方向に対して直角方向に成長したクラックが観察される。これらのことは両者の μ 挙動が類似していたことに対応する。また、RN では変色は硬化 B 条件の方が進み、WS、XL と同様にクラックが観察されるようになる。

以上のように、WS、XL では硬化反応が不十分な時は摩擦熱による影響を受けやすくなる。したがって、このことが一次構造の相違による摩擦、摩耗挙動の変

Fig. 14 The effect of sliding speed on the frictional coefficient-time and temperature-time curves for the novalak type resin

Fig. 15 The effect of sliding speed on the frictional coefficient-time and temperature-time curves for the acrylic rubber modified phenolic resin

Fig. 16 The effect of sliding speed on the frictional coefficient-time and temperature-time curves for the phenolic aralkyl resin

Fig. 17 The effect of sliding speed on the relation between frictional coefficient and sliding distance

Fig. 18 The effect of sliding speed on wear rate

化に反映されたものと考えられる。逆に、硬化反応が進むと摩擦熱による影響を受けにくくなり、一次構造の差異が摩擦、摩耗挙動の変化に現れにくくなることがわかる。ただし、RN については以上のことが当てはまらないことがあり、今後、アクリルゴムの添加料等を変えた実験を行い、検討する必要がある。

3.3 摩擦・摩耗挙動に及ぼすすべり速度効果

a. 摩擦挙動に及ぼすすべり速度効果

荷重を 38 N 一定とし、すべり速度 V を 2.0 m/s, 5.2 m/s, および 15.2 m/s に変えた条件での μ および T_p とすべり距離 L との関係は B タイプで硬化させた WS, RN および XL の各樹脂について Fig. 14~16 にそれぞれ示す。

すべり速度 2.0 m/s の低速条件において、WS では μ は初期に一定値となるが、 $L=1$ km 付近より単発的

Curing condition A

Curing condition B

Curing condition A

Curing condition B

Curing condition A

Curing condition B

Fig. 19 The SEM microphotographs of worn surfaces (a) Novalak type phenolic resin, (b) Acrylic rubber modified phenolic resin and (c) Phenolic aralkyl resin

な変動を伴いながら徐々に低下する。RNでは、 $L=3$ km 付近から μ は上下変動を開始し、それに対応して緩やかに低下し始める。また、XLでは $L=5$ km 付近より突発的な μ の変動があるが緩やかに低下する。

T_p は、すべての樹脂とも試験開始より緩やかに上昇し、いずれもほぼ 50°C 付近で飽和傾向となる。すべり速度 5.2 m/s の中速条件ではいずれの樹脂も初期に高い μ 値を示し、その後減少して再び増加する傾向を示す。樹脂の種類の相違は μ の変動の相違に現れる。また、 T_p は μ の減少に対応して上昇速度が低下するが引き続いてすべり距離の増加とともに増加を続ける。

すべり速度が 15.2 m/s の高速条件では、WSおよびXLの μ はすべりの前半($L<4$ km)では中速条件とよく似た挙動をとるが、その後一定範囲で変動を繰り返すようになる。 T_p の変動はやや大きいが中速条件と同様に上昇を続ける。一方RNの μ の挙動は中速条件と異なり、初期に一定値を示し、その後減少して増加する。 T_p はWSとXLの場合と類似した傾向を示す。

これらの樹脂に対するすべり速度効果の特徴的に表すのがFig. 17に示す μ の下限値とすべり距離の関係である。すなわち、(a)に示す低速条件では μ の値は樹脂間で異なるが、あるすべり距離からいずれも減少するようになる。この距離はWS, RN, XLの順で短くなる。(b)に示す中速条件では初期に低速条件に近い μ 値となり、その後減少して極小値を示して再び増加する。さらに、(c)に示す高速条件では中速条件とよく似ているが μ は増加して一定値に収束する傾向を示す。また、XL, WS, RNの順で収束が生じる。すなわち、高速条件下のフェノール樹脂の摩擦挙動は、低速条件で見られる μ の低下領域、中速条件でみられる μ が減少して再び増加する領域、さらにその後一定値になる3種の領域を含むことがわかる。

b. 摩擦に及ぼすすべり速度効果

Fig. 18に各樹脂の摩擦率とすべり速度の関係を示す。この結果よりXLはすべてのすべり速度条件において摩擦率が小さく、すべり速度の増加とともに摩擦率も増加している。RNは低速条件および高速条件では他の樹脂よりかなり大きな値を示すが、中速条件では他の樹脂の中間値をとる。

c. 摩擦面に及ぼすすべり速度の影響

それぞれの樹脂の摩擦後の面の状態をSEMにより観察した結果をFig. 19に示した。また、肉眼観察による摩擦面の状態はすべての条件でいずれの樹脂も黒変しており摩擦熱の影響を受けている。摩擦面の様子は低速条件では樹脂の相違があまり見られない(Fig. 19(a))。しかし、中速条件になるとWSにも

っとも顕著に見られるように、いずれも摩擦方向に対して垂直方向にクラックが発生しているのが観察される(Fig. 19(b))。さらに高速条件になるとすべての樹脂の摩擦面にクラックが観察されるようになる(Fig. 19(c))。また一部にはクラックの周囲で表面が剝離したようすも観察される。高速条件ではまず摩擦熱のために表面が変色し、続いてその摩擦面にクラックが発生して次第に成長連結して剝離する、いわゆる delamination wear が生じていると思われる。

4. 結 論

フェノール樹脂系複合材料の摩擦・摩耗挙動を明らかにするために、本研究ではまずマトリックスとなる分子構造の異なる3種類のフェノール樹脂について検討した。すなわち、ノボラックタイプフェノール樹脂(WS)、アクリルゴム変性フェノール樹脂(RN)およびフェノールアララルキル樹脂(XL)を用いて低速から高速までのすべり速度範囲での摩擦・摩耗挙動について、硬化条件の相違およびすべり速度について比較検討した結果つぎのような結論を得た。

① 硬化反応が不十分なときは摩擦係数は分子構造により全く異なる挙動を示す。しかし、硬化が進行すると分子構造の差は見られなくなり、すべり中の摩擦係数の変動にその相違が見られるようになる。

② XLについては硬化反応の相違による架橋密度より分子構造に基づく耐熱性の向上が耐摩耗性の向上に寄与する。しかし、WSおよびRNについてはそれぞれ架橋密度の影響が大きい。

③ 高速条件におけるフェノール樹脂の摩擦には、低速条件での摩擦係数が低下する領域、中速条件で見られる摩擦係数が減少後再び増加する領域、さらにその後一定値に近づく3種類の領域を含んでいる。

参 考 文 献

- 1) Tanaka, K., Ueda, S. and Noguchi, N. : *Wear*, **23**, 349 (1973)
- 2) Mizutani, Y., Kato, K. and Shimura, Y. : *Proc. JSLE Int. Tribol. Conf.*, 489 (1985), Tokyo
- 3) Liu, T. and Rhee, S. K. : *Wear*, **37**, 291 (1976)
- 4) 井上光弘 : 日本機械学会論文集 (C), **51**, 1433 (1985)
- 5) 大滝英征, 星野 努 : 日本機械学会論文集 (C), **42**, 1265 (1976)
- 6) 大滝英征, 星野 努 : 日本機械学会論文集 (C), **44**, 4351 (1978)
- 7) 大滝英征, 星野 努 : 日本機械学会論文集 (C), **45**, 1235 (1979)
- 8) Bark, L. S. : *Wear*, **34**, 131 (1975)
- 9) Bark, L. S. : *Wear*, **41**, 309 (1977)
- 10) Scieszka, S. F. : *Wear*, **64**, 367 (1980)