

润滑与润滑材料文献译丛

1

中国科学院兰州化学研究所

(1962)

潤 滑 理 論

前 言

近年来，世界各国由于机械工业的飞速发展，特别是机械运转条件的提高，给润滑科学领域带来了新的研究课题——要求必须解决在苛刻工作条件下机械的润滑问题。

在解决这些问题的过程中，新的研究途径、基础数据的广泛探索以及卓有成效的实际应用，不断出现。这些新颖的内容，逐渐扩大着润滑领域并将充实提高其理论。

研究润滑问题的首要任务在于及时掌握各国的研究现状并推测其发展趋势。为了国内研究工作和培养干部的需要，我们组织了一批翻译力量，对国外有价值的文献展开了翻译工作。仅从已有译文中选择有关润滑方面的文献49篇，纳入“润滑译丛”，供有关工作人员参考。

本译丛共分五册：第一册为润滑理论，第二册为塑料轴承及表面处理，第三册为润滑油脂，第四册为固体润滑剂及气体润滑剂，第五册为聚酰胺轴承。

这批文献主要译自最近三、四年来苏联的科学院院报、科学院通报、润滑与磨损及胶体杂志，美国的润滑工程、润滑工程学会文集及润滑油学会报告，日本的润滑及机械的研究等杂志以及1957年在伦敦召开的国际润滑与磨损会议的有关报告。

由于翻译力量薄弱，编印时间仓促，校对不够细致，译意和修词未作深入推敲，错误之处渴望读者指正。同时，因印刷条件所限，原文中的照片亦未印出，敬希见谅。

中国科学院兰州化学研究所

1962年6月于兰州

目 录

1. 塑性粗糙化与磨損	-----	1- 1
2. 論在磨損过程中摩擦表面的相互作用	-----	1-11
3. 表面测试技术及其对摩擦与磨損知識之贡献	-----	1-17
4. 对边界潤滑研究工作的評述	-----	1-29
5. 摩擦和磨損的分子—机械理論的主要原理	-----	1-42
6. 对固体的摩擦的研究工作的評述	-----	1-54
7. 金属轉移和磨損的一个新理論	-----	1-39
8. 軸承試驗方法	-----	1-78

塑性粗糙化与磨损

Plastic Roughening and Wear

I-Ming Feng

Inst. Mech. Engr.,
Proceedings of the
conference on Lu-
brication and Wear
1957. 635

引 言

在滑动接触上似乎为連續的固体物质实际上是由分隔的粒子、原子或分子所組成。正因为固体物的这种分立性，在晶体物质里沿晶面的急剧运动的过程引起了塑性变形的发生。这些急剧的运动，通常沿几組的晶面发生並导致了接点的凸出点的粗糙化，从而在塑性变形过程中趋于形成編織交鎖的模板(Feng 1952)。塑性变形所产生的交鎖效应是造成切綫运动阻力的主要原因。当一对凸出点产生强力交鎖时，在其中一个凸出点内部最弱部分而不是在介面趋于发生断裂。在断裂时瞬时高温导致瞬时的扩散，如果这种扩散足够迅速的话，能够造成剪切碎片与另一凸点的熔接，因而产生金属轉移。同时，当条件不足以产生任何微量的扩散时，若粘着力存在的话，就可以作为一片轉移的金属使剪切碎片保持在对面的凸出点上。另一方面，如果粘着力很弱和过程不够迅速来形成熔接的话，这小块剪切的金属便成为一块脱落的磨损粒子。下面的討論主要基于这个塑性粗糙化的概念。

表面沾污

当固体表面与周围液体或气体介质表面接触时，由于吸附或化学反应而发生沾污作用。所产生的沾污层通过下述的一个或几个机理影响两个金属表面的摩擦。

1. 減弱的粘着作用(通常在沾污表面看不到可觉察的粘着)。
2. 通过对表面附近的材料的变形的干扰作用抑制了塑性粗糙化。
3. 当沾污层的剪切强度相当或低于底材金属时，剪切就有可能在沾污层内部发生。

由于在一般大气环境下金属表面通常都是被沾污的，在这些情况下，观察不到有粘着。在无粘着作用下，人們认为塑性粗糙化介面的

交錯是金屬轉移與磨損之主要來由，同時使交錯效應減弱的低剪切強度層便具有重大意義。當表面膜的低剪切強度部分的厚度接近和最後達到大于塑性粗糙度的平均深度時，塑性粗糙化界面的交錯之最終減弱作用就會使磨損有急劇的降低和最後使磨損減少到可忽略的程度。隨着磨損的急劇降低，如圖 3 3 - 1 所示意，出現了磨擦系數的下降。所有影響塑性粗糙化或表面層的厚度和其剪切強度的參數也會對磨擦特性和表面破壞狀態有所影響。

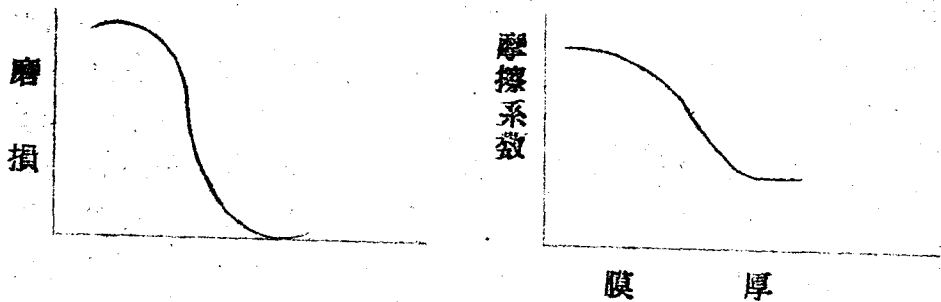


圖 3 3 - 1 由于表面沾污所引起的隨着磨損的急劇降低之磨擦系數的下降之示意图

吸 附 層

在大多數金屬層表面上的膜層是以一種理想的形態存在的，它包括在一個以可減弱塑性粗糙化的硬氧化物層的上端的一個低剪切強度的吸附層。在研究表面膜的低剪切強度層的平均厚度的效應時，吸附物層的量可以通過改變氛圍中之吸附氣體的蒸氣壓或液體介質中吸附組分濃度來調節。Feng 和 Chang (1955) 曾經作過這樣的實驗即調節在鼓空氣泡下的乙醇的濕度來控制在鐵及銅的樣品上的吸附乙醇的量。磨損與醇蒸氣壓的曲線表示了臨介蒸氣壓以上的磨損急劇下降至一個極小值 Schuman, Waterhouse, 和 Spink (1956) 也曾使用改變在溶劑中的表面活性劑的濃度來控制吸附量的方法，他們對浸過在不同的濃度的十六烷硫酸鈉溶液的金屬間（銅—銅）（鋁—鋁）之磨擦系數的測量表明在 10^{-4} 克分子濃度附近時磨擦系數就

开始下降了，然后在接近 10^{-3} 克分子时达到最低值。这时的浓度是在铜上形成全单分子层的浓度，他们的定性观察表明随着摩擦系数的下降在表面损坏上也有显著的减小。

人们曾经讨论过 (Schuman 等 1956; Feng 1957) 这个过渡状态不一定要吸附物对全部表面都复盖之后才出现。当吸附不足一层时，吸附分子组合成三三两两的小堆；被堆叠的分子所复盖的面积的比例因吸附量的增大而增大 (Rieo 和 Kimball, 1955)。也有人建议过 (Cuming, 1954) 表面活性剂在凸出点上的优先吸附作用的可能性；当一对接触的凸出点之一，一旦被吸附层所复盖时凸出尖之间就出现低剪切强度层。因此尽管吸附物只复盖每一样品的总表面积的一部分，在降低摩擦和磨损上吸附分子可以仍然是有效的。

当每一个凸出点都被吸附分子所复盖时，就可获得大约两倍于其分子大小的一个低剪切强度层。改变分子的链长或建立多分子吸附层 (相同分子的多层或在化学吸附层上加一物理吸附层) 或二者同样可以实现吸附层的进一步加厚。

负荷效应

当在表面膜里低剪切强度层厚大于塑性粗糙化界面的凹凸度时，边界润滑便起作用，这一点因磨损极微，实际上无金属转移和在 0.1 因次 (从 0.1 到 0.4) 为低摩擦系数的事实所支持。增加负荷可能导至从有效的边界润滑状态过渡到无效应的边界润滑状态 (高磨损率，因金属转移产生最严重的表面损坏和 0.2 - 1.8 范围的较大的摩擦系数)。这是因为塑性粗糙度的平均凹凸度随正压力之增大而增大的原故 (Cintra, 1954)。图 3-2 示意了这种过渡情况。

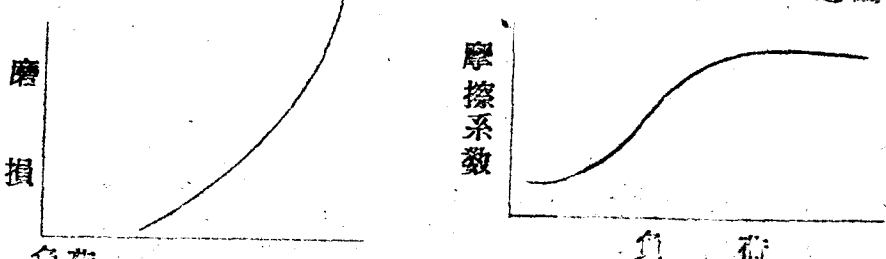


图 3-2 由于负荷所引起的从有效边界润滑状态到无效的边界润滑状态的过渡的示意图

当低剪切强度层较厚时，在磨損——負荷及摩擦系数——負荷曲綫上的过渡区向較高負荷方向移动。这一观点得到了Hirst 和 Lancaster(1954) 所作的数据的确实所支持(他們研究了在鉛的潤滑上改变吸附硬脂酸的数量效应)。若将数据整理在各种負荷下磨損——吸附膜厚及摩擦系数 吸附膜厚的图上便可看到負荷的增加使这些曲綫的阶梯部分，向較厚的方向移动。此效应亦被 Feng & Chang (1956) 所得的在不同負荷下乙醇蒸气压与磨損的曲綫上的結果所說明。

在无效边界潤滑区内，有必要将对称及非对称之实验安排区分开来。在使用同一金属及相似形状的試样对的对称安排上，重量損失率表示的磨損量不包括金属的轉移量，因为一个方向的轉移量与向相反方向的轉移量相等，从而对試样的重量不引起变化。在交錯凸出点的断裂过程中，瞬时温度之强度因負荷而升高，为金属的轉移創造了条件。因負荷引起的金属轉移的增加的部分趋于使磨損——負荷曲綫向下弯曲，並可能最后在极高負荷下使曲綫渐近至零的磨損(33-3 图的下一曲綫)；这时候瞬时温度达到了这样的强度以致每一块的被削落的金属都被轉移而不再有脫落的磨損粒子。在重負荷的滑动下也会产生整体温度的显著上升。在这个活潑的周圍介質中，环境与滑动面之間的增大的互相作用对金属轉移有干扰作用，这样磨損会因負荷的升高繼續緩慢增大(图 33-3 的上一曲綫)。在极高負荷区域内的磨損可能只有学朮上的意义，因为这时候的負荷远远超出了实用負荷的極限值，同时实验上的困难是明显的。

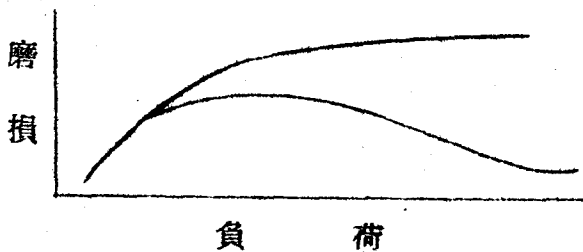


图 33-3 用相同金属及相似形状試样进行的对称实验安排所得的磨損——負荷曲綫的可能形状之示意。

采取非对称性磨損試驗安排时，試样对之一的重量損失通常是較大的，也是为人們所更关切的。在这种情况下，在瞬时温度强到使硬化的轉移金属再一次軟化的負荷以上所发生的反轉移则会改变在无效边界潤滑区内因負荷使重量損失的不断增加的趋势。按反轉移的程度不同，重量損失——負荷曲綫可以是图 33-4 所表示的在任一形状的曲綫。环境与滑动表面之間在高負荷下的互相作用也会影响磨損——負荷曲綫的形状。

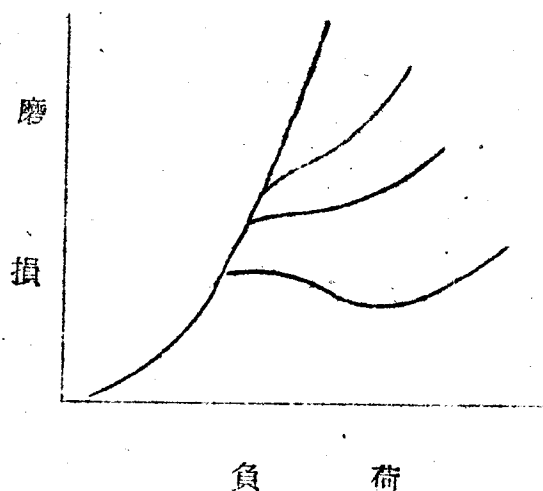


图 33-4 当試驗安排为非对称的磨損——負荷曲綫的可能形状的示意图

氧化皮层的性质、厚度及结构

在金属表面生成的大多数的氧化物都比底材金属硬一些。它們在金属表面上的存在是非常理想的，因为它们可以使塑性粗糙度的深度减小从而使得对低剪切强度层的厚度的要求降低。很明显，如果氧化对底材金属的变形干扰作用在塑性粗糙化上起压抑作用的话，它必定是表面的一个結合部分。在表面上的松脫的硬的氧化物粒子，不会有好的作用，这与作者的經驗相符合，例如尽管在鋼材的表面形成的 Fe_3O_4 膜被認為是有利的，但将 Fe_3O_4 作为固体潤滑剂来应用时，不但沒有任何潤滑作用的表现，而实际上表现了为磨料 (Peterson 和 Johnson, 1954)。同样，一个厚的氧化层 (見註一) 一旦从底材金属脫落就不再有对塑性粗糙化的压抑作用，因而丧失了它的有利效

应。氧化层愈是厚，减弱塑性粗糙化的效应愈大，只要它始终保持有韧性。所以，当氧化层较厚时，磨损及摩擦系数曲线（图 3 3-2）的向上弯曲部分会在较高负荷下才出现。往往一种金属的氧化物可能以几种不同的形态及不同的韧性出现，不同晶体的氧化物对塑性粗糙化的影响也有所差别。

磨 合

介面的粗糙化决定于塑性变形的量而不决定于接触应力的大小，这是因为塑性变形一旦发生之后一对接触的凸出点上负荷的再增大会在接触点的压力上不需有任何变化之下导致进一步的流动。与一对施加轻负荷的凸出点相比，一对在重负荷下的凸出点的变形程度较大，而且造成一个更有效的交锁状态。所以最好使重负荷分布在最大的可能数目的接触凸出点上，以便粗糙化的平均深度降到最低值。在配件的磨合过程中，磨损分散了负荷的集中性，使最大可能数目的凹凸点获得最佳的负荷分散状态。

相似表面积

在单独应用一个参数，相似单位接触压力的时候，相似表面积的影响不能与负荷效应相提并论因为它们的作用是相矛盾的。相似表面积的增大通常对负荷的分布的改善起很小的作用。由于负荷只被很少数的接触凸出点承载，每一对凸出点所承载的负荷被降低得很微小。所以由于相似表面积的增大所造成的磨损（以重量损失表示）的变化也就是比较小的。然而这个几乎相同的磨损量被分布在一个较大的表面积上这就得到了与表面积的增大相比较下的一个位效的降低。只有当由于表面积的增大引起的在负荷分布上的改善是以便在表面膜的剪切强度部分的厚度以内发生塑性粗糙化的时候，才有可能实现在重量损失上的显著的降低。

硬 度

硬度影响介面实际接触的面积，张力——硬化区域的大小，和塑性粗糙化的程度，当一对试样之较软者，或二者的硬度增大，实际接触的总面积下降和塑性变形区平均深度减低时，可产生较小损失。当硬度的升高是以减弱介面的粗糙化以至粗糙度变得比表面膜的低剪切

强度部分还要小的时候，滑动表面的磨損就会大大降低。一个优良的范例为两个极硬的滑动表面的低摩擦和低磨損体系，例如在很輕負荷下的钻石轴承上的硬化鋼針頂。

也可以理解塑性粗糙化因硬度的減弱会增大在摩擦——及磨損——負荷曲綫上开始发生的轉变点（在負荷效应一节里討論过了）上之負荷。这一点曾經被 Hirst 和 Lancaster (1954) 在研究負荷对以硬脂醇高铁盐在苯里的飽和溶液来潤滑的金属（鋅、鋼、軟鋼）的摩擦的效应上观察到了。

晶体的定向

晶体的塑性与晶体的定向有密切的关系。每一种晶体結構具有一个固定数目的滑动体系。在面心立方結構里，它具有四个(111)型的滑动面，在每个滑动面上又有三个(110)型的滑动方向，因此晶体具有总共十二个体系。当滑动方向与正压力几乎垂直时，它是不能动作。所以，根据負荷，晶体的定向影响了不能动作的滑动体系的数目，它从而又影响在介面的塑性粗糙化。晶体定向性的硬度的变化也会影响磨損。表面活性是另一个决定于定向的性质，它与磨損有密切的关系(Gwatney 等 1948)。

从定向对变形和表面活性的决定性上明显地看到磨損受到晶体定向性之影响。这結論得到实验的支持，即在于空气和高温下对不同定向性的銅的单晶体在 60 克負荷和 4.53 厘米/秒的速度下所作的磨損实验。图 3 3 - 5 表示了四种結晶 A、B、C 及 D 与 (100) (110) 及 (111) 方向相对应的准确的定向。图上表示了标准立体投影的三角

(註一) 在多晶金属上形成的氧化物层是处于綜合应力状态的，这是因为柵格参数不同的原因。在冷却时，底材金属及在高温时形成的氧化物之間的差热收缩是另一个内部应力的来源。在高温内部应力下的一个厚氧化物层，在很小的外加負荷之下会很容易从底材金属脱落。

(註二) 在某些情况下在磨合中，也可能出现在开始阶段表面的损坏，恶化了負荷分布的情况并且引起磨損率的增大而不是降低的情况。

形上它們的軸的位置。

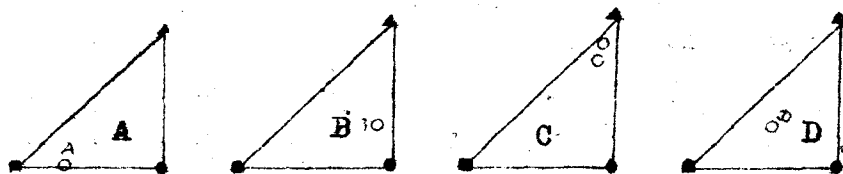


图 33-5 立体投影表示了用于磨損实验上的四种晶体的軸的定向

晶体 B 和 C 的磨損率大致相同。晶体 A 表现了較大的磨損率（約大 31%）和晶体 D 的磨損略小，約比晶体 B 及 C 者小 26%。很明显，需要进行进一步的实验来对晶体定向在磨損上的效应有更多的了解。負荷、速度、温度和 其他条件在磨損与晶体定向之間的关系之影响的研究会有很大的意义。

軟表面对硬表面的损坏

在一个不同硬度的金属对的滑动的情况下，尽管其硬度的差别很大。軟的方面也会对硬的方面造成少量的表面损坏。这一点可通过下面的理由来解纒。

一般多晶物质是由不同大小和不同定向性的晶核所組成的集結体，晶体定向对流动性和表面活性的决定作用是在摩擦和磨損过程中造成单个顆粒表现不同断裂强度和 对变形的阻力的原因。由于顆粒大小的变化，每一个顆粒从它的相邻顆粒受到不同程度的压挤，这一点决定于它本身的大小数目定向性和与它直接相邻的顆粒的变形程度，其結果是，当一个相当于在一个不是很好地定向的大粒子里硬表面上（此粒子又几乎不受相邻粒子引力的影响）的凸出点与一个相反粒子小的在良好定向和高度紧束的小粒子的軟表面上的凸出点的时候，軟表面使硬表面产生损坏是可能的。

顆粒大小

与具有自由边界的单晶体不同，在多晶物质里的顆粒的流动受到顆粒边界和相邻顆粒的結合力的影响。因此尽管在顆粒中的每一点的

張力不同，近邊界的變形總是較小，在顆粒中心的變形總是較大。當粒子的平均大小遠大於實際接觸的面積的平均大小時，顆粒邊界對接觸凸出點的塑性變形的約束作用最小。顆粒大小的降低增大顆粒邊界和同樣地相鄰顆粒的效應，從而使接觸凸出點的介面的粗糙化減低。當顆粒大小降低到每一接觸面積平均地復蓋多於一個顆粒的程度時，介面的粗糙化便會有顯著的減弱。

曾經用粒子大小自 0.01mm (用再結晶法制得) 到 1.5mm (用張力——退火技術制得) 的純銅試樣，對顆粒大小對磨損的影響作過一些初步的研究。當顆粒大小從 0.2mm 往下降低時磨損開始有急劇的下降 (這種大小約為較大磨損粒子的大小)；這一下降與上述的粗糙化的突變有一定的聯繫。在 0.2mm 大小以上，所觀察到的漸次下降則可能是由於較大比例的金屬轉移的增加所致。

其他變數

塑性粗糙化的觀念可導致對決定磨損的其他許多因素的預測，例如晶體結構，顆粒定向性，張力——硬化性質，再軟化溫度，導熱性，擴散特徵，和相互溶解度，沒有討論這些因素的原因是在這領域內的知識如此零碎以致純粹的理論分析也無法深入。例如可以假設兩種不同的晶體結構對一個良好的滑動體系是理想的，晶體結晶差別愈大愈理想。這一點與已有的經驗是相符的，即最好的軸承材料是非立方結構的，而且幾乎沒有一種軸承材料具有象鐵的體心立方結構的同樣的構造。然而能否在理論上肯定那一類的非立方結構是最理想的呢？是菱形還是密疊的大面體的呢？要對上述的效应有更多的了解，就十分需要在實驗研究和理論分析之間同時耕耘了。

文 献

Cintr. J.A. 1954, Dissertation, M.I.T.

Cumings, B.D. 1954 Ph.D. Dissertation, Cambridge University.

Feng, I-M. 1952 J. Appl. Phys. 23, 1011.

Feng, I-M. and Chang, C.M. 1956 J. Appl. Mech. 23, 458

Feng, I-M. 1957 Second International Congress of Surface Activity.

Gwathmey, A.T. Leidheiser, H.jr. and Smith G.P. 1948 Tech. Notes NACA, Wash. 1460.

Hirst, W. and Lancaster, J.K. 1954 Proc. Roy. Soc. 223A, 324.

Peterson, H.B. and Johnson, L.R. 1954 Tech. Notes NACA Wash., 3334.

Ries, jr. H.D. and Kimball, W.A. 1955 J. Phys. Chem. 59, 94.

Schulman, J.H., Waterhlyse, R.B. and Spink, J.A. 1956 Kolloid Zeitschrift 146, 77.

(陈绍澧译)

Нисневич

Взаимодействию трущихся поверхностей в процессе изнашивания.

論在磨損过程中摩擦表面的相互作用

А.И. Нисневич (莫斯科)

譯自 Известие АН СССР отд. тех. наук. 8, 122-125. (1956)

在两个軛合表面的磨損过程中观察到決定于两个軛合表面的物理性质的和位于直接接触中表面部分的量与值的金属分子相互作用具有各种强度,它是从表面层性质的破坏和温度的巨大升高而引起的(1-2)。

一系列的探索是为了研究分子相互作用的現象,但是对这些現象的最完整和最深入的研究仅仅在应用放射性同位素后才成为可能。

关于研究鉛对鉛、銅和銅之磨損过程的一些試驗(3)表明,借助于放射性图可以评价出现在軛合零件的摩擦面上約为 10^{-7} 克/厘米² 的金属。

在沒有潤滑和用正 16 碳酸与 16 碳醇潤滑的摩擦下摩擦系数和从一个表面向另一表面所轉移的材料量之間的关系表明(4),轉移金属量在四百倍的变化时摩擦系数仅增加四倍。在 105° 附近,摩擦和金属的轉移明显地增加,但是金属轉移程度的增加比摩擦系数的增加在較低温度便开始了。

轉移材料的量与摩擦方法和負荷大小成比例。放射性銅——鍍合金对鋼在沒有潤滑的摩擦下的轉移金属的量隨鋼表面粗糙度之增加而增加。在同样情况下,若所試驗材料的硬度小于銅——鍍合金的硬度,則观察到相反的規律(5)。

油和其他的吸附边界膜是一个外因,它們在很大程度上阻止焦結的产生(6)。

以下举出我們所进行的有关鋼对青銅摩擦下金属的轉移試驗之初步結果。試驗是在摩擦試驗机 МД 上进行的,并用大流量变压雷油潤滑样品,为此在試驗机上装有專門的油泵。运动的样品(滾柱)由热处理到硬度为 50R₀ 的 20x 鋼制成。滾柱表面的粗糙度为与光洁度 8, 9, 10) 和 11 級相应的固定标准(ГОСТ) 2789-51 軛合样品

是由用銻的放射性同位素 Sb^{124} 活化的青銅 OII C-5-5-5 制成的。在三小時內完成試驗偶件的磨損過程，之後仔細地洗去滾柱上的潤滑劑和磨損產物，並從它們的工作面上攝下放射圖的照片。

試驗表明在磨損過程中在鋼的粗糙度之任意數值下產生了青銅往鋼面轉移的塗層。但是鋼表面的粗糙度還是顯示了它對金屬轉移（塗層、焦結）現象的影響。

顯而易見（圖 1），在鋼面粗糙度的某一恰當數值下青銅轉移到鋼面上的數量是最小的。在我們的情況下觀察到金屬的最小轉移是在鋼面粗糙度為 10 級時。

按如下所述可以提出一些在各種粗糙度的表面下的磨損現象。

在兩個金屬的壓棒下產生兩個被壓物體個別部分的相互嵌入，它決定於機械性質的非均勻性和形成表面晶體之不同的定向性〔7〕。由於所接觸凸點的嵌入觀察到不平點的機械交錯、少量金屬的損傷或擦傷（在青銅 OII C-5-5-5 所見的情況中）。在鋼表面粗糙度大時青銅的損傷現象表現得最強烈。在鋼樣品表面粗糙度大時接觸面的承受面積很小，由於在瞬時接觸點上大比壓力的擴展引起了溫度升高油膜破裂和與損傷的同時金屬的劇烈焦結。

隨着鋼面粗糙度的降低壓力分布在實際接觸的大部分面積上，所壓物體個別部分相互的嵌入也降低，隨之金屬的損傷和焦結現象也降低。

在粗糙度特別小的情況下，儘管表面的塑性變形和嵌入降低，還是產生表面大多數部分以相當於固定的分子晶格距離〔7〕緊密地靠攏和其與膜脫開之可能性。在此情況下焦結現象多於損傷現象。

上述的假說較好地解釋了鋼面粗糙度對青銅磨損的影響，因為被認為在不平點的機械交錯中和在兩個表面的焦結時發生較軟表面的破壞。此時，正如我們過去曾經表明〔8〕，從發動機實際部件試驗的結果中指出，不僅青銅磨損值（連桿上層蓋的衬管），而且鋼的磨損值（活塞栓釘）都決定於表面加工的光潔度。

讓我們更詳細地來研討，在焦結下產生的現象。在兩個金屬瞬時的所有摩擦面的某一區域內產生了焦結。因為零件處於相對運動中，

这个瞬时的結合正好被破坏。假如在瞬时結合处的材料显得比主要材料之一要牢固（例如牢固性可能与固体溶液之形成或粘合有关），則破坏将沿較不牢固的材料进行。在此情况下在一个表面上（在我們的情况下是鋼）将出现掺入的粒子，而在另一表面上（青銅）形成深凹。在牢固的瞬时結合部分与最不坚硬的摩擦偶組成部分（青銅）分开时，毫不怀疑，将引起这个部分与第二部分——最坚硬的摩擦偶組成部分（鋼）的結合之削弱。

通过在鋼面上掺入的粒子傳遞了大部分的負荷〔9〕。

在一些区域内进一步磨损的过程中，实质上发生两个相同材料（青銅对青銅）的摩擦。在此情况下焦結現象更劇烈地扩展着。因为在最先掺入的粒子与鋼之間的結合在形成結合中已被削弱，因此在坚硬粒子与青銅面之間的第三次瞬时的結合发生时，所形成的粒子与青銅、也与鋼的重新分开可能产生。

在一系列情况下发生了已焦結的坚硬部分与两个配合表面的分离。由于坚硬的由金属所形成的自磨粒子在配合面之間的移动或者它在青銅的面上的結合使得鋼表面之磨损更加劇烈。

为了验证上述假說曾进行过下面的試驗：

用鋼样品与含有放射性同位素 Sb^{124} 的青銅样品偶件在有潤滑下进行試驗。在磨损过程中，正如我們早已指出过，发生放射性青銅向鋼面上涂层。磨损进行了一定的時間就停止。将机器的油系統和鋼試样仔細地洗淨后以类似的但由一般青銅制成的样品去替換含有放射性同位素的青銅。在下一步試驗中（負荷为12.5公斤/厘米²）每15分鐘測定一次青銅样品表面层上放射性青銅的存在情况。

試驗表明（图2），在全部試驗过程中（5小时）鋼表面层上的青銅向青銅样品的表面层轉移。在磨损过程中鋼样品表面层上青銅的費减少了，但是向青銅表面轉移的放射性青銅的費却变化不大。

在鋼——青銅偶件的磨损过程中不仅产生青銅向鋼面上的涂层，而且还产生青銅从鋼表面层上往青銅表面层的逆向轉移，乃至青銅被刮掉和往潤滑剂中沉落。

在鋼对鋁合金和淬火鉄对青銅的磨损試驗上我們也观察到摩擦偶