

# 动载荷下发动机的 寿命和磨损

[苏] B·E·卡纳尔丘克 著

张兴礼 译



机械工业出版社

本书是参阅了苏联国内、外的大量文献资料而写成的。它论述了现代磨损理论并研究了对发动机零件磨损起决定影响的因素。在试验的归类分析理论的基础上，建立并研究了分析研究模型，这种模型将磨损强度与由发动机使用工况确定的动力参数变化联系在一起。在汽车发动机进行大量使用试验结果的基础上，建立了数值算法，以便在试验室条件下，研究非稳定的动载荷对磨损的影响。研究在动载荷下工作时决定摩擦副磨损的规律性和过程。叙述了在非稳定的动载荷情况下，提高发动机寿命的结构措施并对它进行了论证。

本书可供科研工作者、工程技术人员、教师、研究生和高等学校的学生参考。

## ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И ИЗНОС ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

В. Е. КАНАРЧУК

КИЕВ «НАУКОВА ДУМКА»

1 9 7 8

\* \* \*

### 动载荷下发动机的寿命和磨损

[苏] В. Е. 卡纳尔丘克 著

张兴礼 译

戴激 谭林 校

\*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 850 × 1168  $1/32$  · 印张 8  $1/2$  · 字数 220 千字

1984 年 7 月北京第一版 · 1984 年 7 月北京第一次印刷

印数 0,001—4,100 · 定价 1.30 元

\*

统一书号: 15033 · 5619

## 译者的话

汽车在各种复杂的道路条件下行驶，因而发动机经常是在非稳定的动载荷工况下工作，这就有必要了解在非稳定工况下发动机磨损的特点，以便采取相应措施来提高发动机的寿命。

本书在大量试验研究的基础上，并参阅了苏联国内、外的文献资料而写成。着重介绍了非稳定的负荷和速度工况及温度状况等对发动机寿命的影响。介绍了发动机进行程序控制的模拟试验方法及仪器装置。从金属电子结构方面阐述如何选择摩擦副的材料提高其耐磨性。介绍了一些提高发动机零件寿命的工艺措施。通过分析曲轴箱机油的办法来诊断汽车拖拉机发动机的技术状况，可以使汽车大修里程增加一倍以上，使用中故障也显著下降，并使保养和修理发动机的费用也降低了60%。此外还介绍了几种发动机主要零件磨损计算的数学模型，附录中还列出了计算实例。

本书除从动载荷研究发动机的磨损外，还从电子学、金属物理学等领域来研究提高零件的寿命。对于有关科研工作者、工程技术人员、高等院校师生等有一定参考价值。

由于本书涉及面广，翻译时遇到许多难点，除查阅大量有关资料外，还请教了有关方面的专家。特别值得提出的是吉林大学的王煜明副教授在金属物理学方面给予很大的帮助。另外也得到了中国科学院应用化学研究所的一些专家的帮助。

本书第一章、第三章、第五章、第六章、第七章由戴激同志审校。第二章、第四章、附录由谭林同志审校。谭林同志对本书还进行了总校订。附录部分也曾请教过吉林工业大学的黎志勤副教授。

翻译本书过程中得到了张羨曾高级工程师等人的大力支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于译者水平有限，书中错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

## 序 言

在使用条件下，燃气轮机和活塞式内燃机的寿命，主要取决于导向叶片、工作叶片、气缸套、活塞环、曲轴轴瓦的磨损。这些零件，在复杂应力条件下并在活性的废气介质中工作。

摩擦零件所受的应力，取决于工作的工况。这些工况在使用条件下具有动态性质，并且由稳定的和非稳定的负荷、速度和温度参数来确定。

目前，为了提高零件的寿命，主要注意力应放在保护零件防止磨料磨损和腐蚀磨损上。众所周知，当空气、燃油和机油被磨料杂质污染的程度固定时，并且发动机在最合理工况或者在低温稳定工况下工作，则零件的磨损程度随负荷和速度参数而变化。当发动机在变化的动载荷和速度工况下工作时，引起燃油和机油的消耗增加，燃烧后生成的灰分也增加，排出的废气对大气污染严重，零件表层和内部的热应力在波动变化，由于惯性负荷和振动负荷增加，使得平衡被破坏，并使零件的润滑状况变坏。

分析在使用条件下，研究发动机寿命的一系列使用和理论研究的结果，可以得出发动机的工况对零件磨损有影响的结论。统计资料证明，随着发动机在非稳定动载荷条件下工作的时间增加，故障数量在增加，从而引起用于技术保养和修理方面的费用也增加。

毫无疑问，从研究采取有效的措施来提高发动机寿命的观点出发，上述情况对于解决现代机械制造部门的实际任务，具有头等重要意义。

在研究非稳定工况对发动机动力性和经济性指标影响的问题上，作出重要贡献的有：Б. С. 法立克维奇、В. Н. 鲍尔金斯基、Н. Р. 布立林格、А. Е. 奥尔林、Н. Х. 贾钦科、И. М.

李宁、Д. А. 鲁别茨等。Е. А. 丘达科夫、Е. П. 利沃夫、Г. Д. 吉米列夫、Д. П. 维利卡诺夫、А. А. 利普加尔特、С. В. 谢林新、Б. В. 捷列根、М. М. 赫罗绍夫、Р. В. 库格利、М. А. 格里高里也夫、Л. А. 捷米亚诺夫等，在他们的著作中指出了研究外部动力因素对发动机寿命影响的必要性。

但是，到目前为止，尚未进行确定使用的动力因素对发动机磨损影响的专门的系统研究。在一些文献中，有时有一些简短的彼此相互矛盾的论述，其中也还缺少关于零件磨损的动力学数据。

在本书中，综合了使用的动力因素对制造发动机用的材料，以及决定发动机寿命的实际零件磨损的影响的研究结果。系统归纳了材料磨损的规律性，并区分出使用工况中，引起摩擦表面破坏过程出现的对动力变化有本质影响的最重要的因素。

起初，试图在汽车发动机试验的例子中，简述机器磨损试验方法的一般原则。这种方法在使用条件下，预先考虑了决定非稳定动载荷工况的因素的分配情况，在样品上，或者直接在零件上编制磨损试验程序，采用综合方法研究磨损的规律性，以及在试验数据的基础上进行寿命的预测。

主要的工作是发展材料科学的新的基础科学，以确定在外部机械、物理和化学因素作用下的适应性。

曾经确定：对于耐磨合金合理的多相的耐久结构，应当是当外部的热动力参数在机械脉冲和热脉冲影响下，以及在物体、对偶体、润滑油或其它介质间扩散过程作用下，发生变化时得以很快地并且可逆地对于每个摩擦阶段有利的由一种结构转变到另一种结构。

研究固体在外部变化的动力因素作用下的适应性的动力学可以发现，不仅在表面层而且在整个材料的组织内，都产生复杂的物理-化学和热力学的现象。摩擦副在上述条件下工作，不断地伴随有一定的机械功转变为内能的过程。在这种情况下，材料

的减震性能起着重要作用。处在材料内的阻尼源，减缓正负交替应力的发生，材料的整个组织力图保持最“有利的”状态。在这种状态下，能够最有效地利用积聚在材料内的势能的可能性。

据工业上的统计资料，由于应用所完成的研究结果，所得到的经济效果约为150万卢布。

本书由以下七章组成。

在第一章中，简要地叙述了摩擦和磨损理论方面的基本原理，并且以内燃机为例，探讨决定零件磨损的因素。在这章里，不仅反映关于磨损方面的著名的著作中的主要结果，而且也反映了作者关于发动机寿命问题的各种不同观点的研究结果。

在第二章内，叙述了在试验归类理论上编制并研究的分析模型，这一模型将磨损的强度与决定发动机使用工况的变化的动力参数联系在一起。在迭代法和借助全平方公式研究方法的基础上，建立合理进行试验的程序，并获得相应的试验结果。在这章中，也叙述试验研究中所采用的方法、装置和仪表。

在第三章中，列出了发动机大量的使用试验结果，在这些结果的基础上编制了在试验室条件下，研究非稳定动载荷对磨损的影响的数值算法。

在第四章内，研究在动载荷工作时，决定摩擦副磨损的规律性和过程。这里，在综合分析的基础上，表达了在动载荷作用下，关于摩擦表面破坏的动力学假说。

在第五章中列出了有关研究发动机零件磨损方面的数据，比较各种模型和各种实际零件所得到的动力学破坏过程的研究结果。对于摩擦副在动载荷下工作时，对金属破坏的本质进行了清晰而准确的介绍。推导出综合方程式，这些方程式不仅单独考虑一种因素，而且同时考虑负荷、速度和温度状况对发动机零件磨损的综合影响。

第六章在固体适应性理论的基础上，从能量的观点研究在非稳定工况下金属的磨损过程，从而可以确定合理选择摩擦副材料的原则。

第七章中，提出了提高发动机在非稳定的动载荷下工作时的寿命方面的结构措施方案，并给出了相应的论据。叙述了考虑在动载荷下工作选择摩擦副的方法、采取的结构措施，以降低非稳定因素的影响，依据发动机保养方面的状况所采取的使用措施。提出了用工程方法计算和预测在非稳定的动载荷下工作时，发动机零件的寿命。

本书主要是作者在进行大量研究资料的基础上撰写的，同时采用了国内外学者所发表的著作中的某些数据。

作者对科学技术副博士 M. H. 罗日科夫，在准备出版的手稿方面所给予的帮助表示感谢。

# 目 录

## 序 言

第一章 摩擦时金属的破坏 .....	1
第一节 摩擦表面的接触作用 .....	2
第二节 润滑油、气体介质和温度对磨损的影响 .....	12
第三节 动载荷工况下的磨损 .....	23
第二章 试验方法 .....	30
第一节 试验规划 .....	31
一、发动机磨损的模拟 .....	32
二、用迭代法模型的研究 .....	36
三、用全平方法模型的研究 .....	38
第二节 工况的研究和模拟 .....	45
一、研究发动机工况的应变仪 .....	45
二、研究温度状况对气缸套变形影响的程序装置 .....	49
三、研究材料磨损的程序盘式装置 .....	51
四、研究往复运动时金属磨损过程的程序装置 .....	53
五、控制装置的程序部分 .....	54
六、为记录工况的仪器装置 .....	57
七、为模拟工况的电子程序装置 .....	57
第三节 破坏动力学的研究和零件磨损的确定 .....	67
第三章 发动机动载荷工况的特点 .....	79
第一节 动载荷工况的基本参数 .....	79
一、负荷工况 .....	79
二、速度工况 .....	85
第二节 温度负荷 .....	89
第三节 应力状况 .....	92
第四章 金属表面层磨损的规律性 .....	106
第一节 负荷的作用 .....	107
第二节 速度工况 .....	125
第三节 摩擦表面的振动和磨损 .....	138



第五章 在动载荷下工作发动机的磨损 .....	145
第一节 负荷的影响 .....	145
第二节 速度的影响 .....	159
第三节 发动机磨损的综合模型 .....	169
第六章 金属对动载荷作用的适应性 .....	175
第一节 机械能的损耗 .....	175
第二节 结构的损坏性 .....	178
第三节 金属电子的能量状态的变化 .....	182
第四节 摩擦表面破坏的统计准则 .....	194
第七章 提高发动机的寿命 .....	198
第一节 提高零件使用期限的工艺措施 .....	199
第二节 考虑金属电子结构来选择摩擦副 .....	209
第三节 降低动载荷的作用 .....	211
第四节 提高使用时的发动机寿命 .....	216
第五节 发动机使用期限的评价 .....	222
附录 .....	228
参考文献 .....	249

## 第一章 摩擦时金属的破坏

现代机械摩擦副的寿命，在相当程度上取决于制造它的材料的性质，它在一定摩擦条件下的工作能力，决定于是否具有气体、液体和固体介质及它们的成分、以及润滑方式。决定摩擦和磨损的主要因素是外部机械作用，其中起决定作用的是温度值和温度梯度、弹性塑性变形、金属表面层的活性和一系列其它参数。

当具有润滑油时，摩擦表面破坏的复杂的动力学过程，取决于以下几组因素〔183〕：

- 1) 机械因素（弹性和塑性变形、振动）；
- 2) 分子-物理因素（扩散、吸附、加热、接触熔化）；
- 3) 机械化学因素（化学吸着作用、润滑油中化学高分子连接的分解和形成）；
- 4) 电、电动力学、电化学因素等。

上述各组过程，将物理-化学、机械变形以及金属破坏的综合问题联系在一起，主要在著作〔149~151、266~269〕中叙述。

近来，出现了许多关于选择过渡摩擦以及表面层结构适应性方面的假说。尽管没有详细研究上述假说的实际价值和科学根据，但必须指出，它们具有一定的实际意义。

在发展关于固体磨损的现代概念方面，作出重要贡献的是И. М. 刘巴尔斯基 (И. М. Любарский) 创建的新的学派〔211、212〕——动力金属学，其核心是建立了摩擦的金属物理学〔215〕。动力金属学，在研究机械摩擦副实际工作条件下金属磨损的原因方面，给出了很好的前提条件。

在本章所叙述的一系列理论和实验研究都证明，解决动载荷对机械磨损的影响问题是重要而复杂的。例如，现代受动载荷最大的动力装置——汽车发动机，它表明了摩擦副磨损本质的现代

概念。

### 第一节 摩擦表面的接触作用

目前，有许多理论可以解释机械零件摩擦表面磨损的主要原因。

根据摩擦和磨损的分子-机械理论〔179、180〕，由于接触的不连续性，使实际接触点上产生了很高的比压，从而引起接触区域靠近并互相深入。当有切向移动时，已形成的关系就发生破坏。后者有两重性：一方面，损坏是与互相深入的突出部分引起的机械破坏相联系，它们或者被切掉（如果突出部分的强度小于对偶件的强度），或者成弹性或塑性挤压（此时，突出部分具有较高的强度）。另一方面，除了克服机械阻力外，在具有阻力的介质中，机械阻力迫使突出部分位移。因此，表面层产生相当大的变形，并且必须克服由于表面紧密靠近部分而引起的分子间的作用力。分子作用将在材料产生破坏的所有区段上存在。

因此，两个物体之间的摩擦关系，包含有双重分子-机械作用的实质。随着相互作用部分的粗糙度的几何形状的不同，以及材料的机械性质不同，构成摩擦力的分子力和机械力将是不同的。可以认为，对于极其光滑、均匀的表面，在彼此互相深入最少的情况下，则引起摩擦的原因主要是由于机械作用而产生的。根据摩擦的分子机械理论，两物体互相之间形成摩擦，可以认为是具有某种物理性质的物理物体。在两个物体接触的地方，形成了某一容积，在该处产生这两个物体的接触。这一接触范围，可以认为是物理物体。试验研究〔172〕表明，上述关系具有弹性-胶质的特点。影响表征两个接触物体关系的和形成接触容积的主要指标是：物体之间的压力、接触的时间以及更为重要的是加载荷的速度。

摩擦接触具有弹性胶质性质这一点，被试验研究所证实，并在著作〔334〕中进行了阐明。这些研究表明，接触区域中所产生的各种现象取决于摩擦关系之间的粘性。当一个表面沿另一个表面滑动时，由于摩擦表面的粗糙度和波纹而引起的个别点接触，并

传递某种运动量。由于物体具有一定的强度，这种运动量可以导致物体分子的振动，由此使物体加热或者使接触区域容积内部产生微小位移，因而引起内摩擦。表面不连续的或杂乱的接触作用，导致了当进一步运动时，使个别凸出部分变平或者形成凹下处。在上述情况下，材料承受多次塑性变形或者产生过度变形。研究作为第三物体的这个领域可以得出结论，外部摩擦力取决于粘性剪切力。这个力是由于两个物体变形引起的并沿很薄的一层深度分布，在这个薄层中，有相当大的塑性变形。在这种情况下必须指出，表层变化也还是由于与周围介质的物理和化学作用而引起的。例如，吸附强度下降的结果〔266〕，是由于周围介质与对偶体扩散饱和的因素以及化学作用（氧化）的结果〔172〕。自然，在摩擦过程中，参与摩擦的材料与初始状态比较也是有变化的。

当材料容积变形和克服接近区段之间分子的联系，可以引起“桥焊”（局部粘着）〔180〕。在物体有足够弹性的情况下，在负荷作用下形成的接触面积，由于弹性变形能量的作用，在卸去负荷瞬间引起接触面破坏。在这种情况下，看不出附着现象。

亲合的强度由扩散过程来决定。接触区域变形伴随有表面层的铆接，使表面层更为坚固，同时形成亲合。当分开连结物体时，不是沿着连接部分而是在某一个深度产生破坏，从而引起摩擦物体产生很大的破坏。

金属表面通常由各种膜覆盖着。具有吸附作用的膜，保护物体防止与被放上的另一物体发生粘着。当具有氧化膜时，吸附作用减弱。但是，直接确定吸附力是困难的，这是由于被压缩的固体具有容积弹性，当卸去负荷时物体变平而破坏“桥焊”的结果〔334〕。

磨损过程假定可以分为三个阶段〔180〕：

- 1) 机械接触、弹性-塑性变形、形成变形的（结构的）活性金属层；
- 2) 活性金属与介质的化学活性成分相互作用，其结果形成二次结构；
- 3) 由于进一步的接触使二次结构破坏。

这种摩擦过程的方式只是假设的，因为它没包括实际上相互作用在固体上的所有物理-化学的综合的全部因素。

在摩擦过程中，由于表面层的变形材料冷作硬化，并使硬度提高到与强烈硬化金属相当的数值。

不将摩擦粒子分开的重复擦伤，引起表面纵向展平并形成成行的结构。涉及所有的滑动平面以后，金属处于重新冷作硬化状态，使之变脆并破坏。

发生在摩擦过程中的表面正负交替的应力，引起表面特别明显地选择磨损，形成成行的结构，表面增添了更坚固的组成成分。这个过程，М. М. 赫罗绍夫、А. Д. 库利茨娜(А. Д. Курицына)在“轴承合金”〔315〕中有叙述，В. В. 契尔内晓夫(В. В. Чернецев)在“铸铁和钢”中有叙述〔324〕。Б. И. 柯斯杰茨基(Б. И. Костецкий)曾经在内燃机的许多零件(曲轴轴颈、气缸壁等)上，同样发现了类似的变化〔172〕。

在擦伤作用下，部分表层被加热，变形只局限在表面很薄一层上并使表面变平。此时要区分两种不同形式的变化：第一种形式的特点是在固定状况下表层软化，它是在摩擦的温度状况随时间变化相对稳定的情况下发生的；当摩擦的温度状况变化不稳定时，可以看到结构变化的第二种形式，其特点是表层淬硬，它是由于局部地方温度过高而产生闪光并且使表面瞬间冷却而引起的。在这种情况下，合金的个别成分消失。

由于不止一次地变形的结果，引起极高的温度而产生闪光，使接触区域的材料性质发生变化。此时，在某些阶段产生了按性质来说与初始状况有区别的新的材料结构。

摩擦过程中结构变化的动力学，在一系列著作〔212~215〕中有论述。其中，首先提出的是在摩擦过程中存在“准可逆”过程，其特点是结构得以很快转变到比初始状态“有利的”状态。在一些“不出名的”著作中，确定了促使材料恢复到“有利的”初始结构的变化过程的时间。

分析引起机械零件摩擦表面基本变化过程的原因，以及分析

在磨损过程中影响它发展的因素表明，磨损的过程与外部的机械作用有直接关系。决定摩擦副磨损过程的主要因素是：负荷工况、速度工况和温度工况〔230、327〕。

摩擦时负荷是决定磨损的头等重要初始的外部因素。摩擦表面以固定速度滑动时，负荷增加引起摩擦系数和磨损增加。随着负荷增加，使摩擦材料的表层发生显著的变化，使塑性变形的深度增加、摩擦表面的显微硬度有相当大的变化〔180、61〕。

试验数据〔180〕表明，摩擦表面的次微小的起伏现象的发展和扩散现象与负荷和塑性变形程度有关〔此时假设当负荷变化时，取范德瓦尔斯力 (Van der Waals) 为定值〕，促使摩擦表面接触部分之间的表面亲合力加强。这个过程可以概括叙述如下：随着负荷增加，次微小的起伏的高度增长到一定的饱和水平。继续增加负荷（超过饱和极限），引起摩擦物体容积变形。在这种情况下扩散按指数规律增长。由于最大负荷和最大变形使得扩散现象急剧增长的结果，使外摩擦转到内摩擦。当小负荷时，在范德瓦尔斯力作用下产生的吸附（亲合力）具有重要意义。中等负荷时，次微小的起伏的作用是主要的。大负荷时，由于扩散现象增长的结果而形成的天然金属的亲合力起主要作用。

1933年Т. 赫伊米斯 (Т. Хеймес) 和Е. 皮沃瓦尔斯基 (Е. Пивоварский) 在发表的著作中，列出了垂直压力大小对铸铁磨损速度的影响的研究结果，发现了磨损和垂直压力之间的线性关系。Д. В. 康维沙罗夫 (Д. В. Конвисаров) 得到了类似的结果〔166〕，他确立了上述关系距正比规律甚远。В. Д. 库兹涅佐夫 (В. Д. Кузнецов)〔188〕、А. К. 扎伊采夫 (А. К. Зайцев)〔112〕和其它一些人的研究，也发现了磨损与负荷之间的曲折关系。

按 Д. В. 康维沙罗夫的意见，临界点的存在取决于磨耗金属表层的塑性变形，并且与润滑介质以及摩擦副金属临界点的移动有关。例如，灰铸铁和钢在有润滑油摩擦时，临界点移向低压区域。通过试验途径确定，随着在铸铁试样上绝对负荷值逐渐减

小，临界压力在下降。但是，有资料表明，对于某些合金，临界压力实际保持在同一水平。

目前大多数研究工作者认为，磨损与负荷之间的规律性，表现为准线性关系。可以列出一些研究结果〔180、339〕证明上面的论述。这些研究中指出，磨损和负荷成比例关系的幂大于1。例如，按卡尤阿布（Каюаб）资料，对于锡合金和铝合金，在干式或润滑时负荷的指数大于1就会产生磨耗。

摩擦副的速度工况不仅影响到磨损强度，并且也改变磨损过程的特点。关于速度工况对金属磨损影响的最系统的试验资料，有以下著作：“金属的外部摩擦和磨损”〔166〕一书、“关于机械磨损和润滑理论的基础知识”〔112〕一书。这些研究结果表明，区别于改变负荷时的磨损，改变速度工况仅仅在达到某一个固定的临界点（对于每种材料有各自的临界点）之前，引起磨损增加；以后随着速度工况的增加，磨损强度有某些下降。

在著作〔180〕中表明，当铸铁沿着钢圆盘摩擦时，尽管摩擦力下降，但随着滑动速度增加，磨损增加。得到的试件磨损与圆盘圆周速度的关系表明，最初的规律是圆周速度增加，磨损的强度也增加。但是，当继续提高速度时，磨损强度重新下降。最初随着速度增加磨损增加，是由于摩擦表面之间聚集的磨损物增加〔166〕，这些磨损物不能及时排除，它是使磨损提高的主要原因。随着摩擦副移动速度增加，磨损速度进一步下降的原因，是由于被试金属冷作硬化逐渐增长的结果。

速度工况的变化，在接触区域内不断增长的温度作用下，同样也引起温度、变形速度、接触时间和金属性能发生变化。

研究摩擦副抗磨性能〔43〕与滑动速度大小的关系表明，随着速度提高其性能急剧变坏。这是由于滑动速度对摩擦表面接触区域的热效应有强烈的影响所致。

润滑材料对于摩擦表面的结构和凸凹状况以及塑性变形的机理有相当大的影响。在摩擦试验机上，对不同的机油进行的试验结果证明，在咬住之前增加速度引起负荷急剧下降。在一定的滑动

速度时，摩擦系数显著增加，从而引起摩擦表面磨损增加。

研究表明〔316、317〕，在一定的滑动速度下出现刮伤，是由于摩擦表面达到临界温度而引起油膜破坏的结果。

随着滑动速度和单位压力的变化，引起深度在40~50微米范围内的表面层硬化〔301〕，与初始强度相比，增加200~300%。硬度提高是由于氧气的扩散作用，使金属的化学组成发生变化并引起硬化。

从研制材料以提高零件耐磨性的观点出发，确定表面磨损的形式具有重要的意义。存在着不同的磨损形式这一点，早就被机械的使用实践所证实（其中包括发动机），其零件的磨损产生各种不同的外部特征。

在著作〔61~63、74、172、176、212、247、315〕中指出，摩擦表面可以有表示破坏特点的特征，它是由下列因素来决定的：塑性变形和变硬现象、化学的相互作用产物所形成的薄膜层、擦伤和剪切、与软化有关的热力现象、以及由疲劳过程确定的表面涂抹或与熔化有关的热力现象。由于互相作用的摩擦表面在某一时间间隔内，对于给定条件下表面破坏形式保持不变并具有一定特征，因此，目前对于磨损提出了许多种分类方式。例如，按着布立涅利（Бринель）分类（1921年），取决于运动学特征和两物体表面间的夹层，具有以下一些磨损形式：当没有润滑和有润滑的滚动摩擦、无润滑和有润滑的滑动摩擦以及在两个固体之间由研磨粉将固体隔开。

Д. В. 康维沙罗夫〔166〕认为，表面磨损是由于表面层的脆性破裂、脱落以及氧化作用而引起的。

В. Ф. 罗林茨（В. Ф. Лоренц）〔204〕和 А. К. 扎伊采夫〔112〕所提出来的分类具有一定的意义。

Т. J. 布瑞维尔（Т. J. Burwell）和 D. C. 斯特劳恩格（D. C. Strong）〔334〕认为，磨损的主要原因是粘着、腐蚀、具有磨料粒子、硬的粗糙物体划伤较软的物体、各种不同形式的疲劳、侵蚀和其它因素等等。



Б. И. 柯斯杰茨基〔172〕研究在摩擦力作用下，金属表层的磨损过程时，提出以下一些不同的磨损形式：第一种粘着磨损、氧化作用的磨损，热磨损（第二种粘着）、磨料磨损、斑痕显著的磨损。在“机械的可靠性和耐久性”一书中〔176〕，对分类形式的阐述更为详尽。

下面研究所述分类的某些原则。在“机械的粘着和它的消除方法”〔61〕一书中确定，I类粘着磨损，发生在机械零件摩擦表面以不大的速度（0.25~0.4米/秒）移动并且单位压力比较小的情况下，以及仅仅发生在实际接触区段没有润滑油和氧化膜保护时，单位压力超过金属的流动极限的情况下。这种磨损形式，是由于零件表面接触区域金属之间的亲合力作用而引起的。这种亲合力，是由表面层塑性变形而决定的，其结果形成了新的金属结构。在这种金属结构中，沿着接触的结晶平面形成粘着。

粘着过程的特点是摩擦系数最大（4~6级），因此，同其它磨损形式相比零件磨损最大。对于上述现象有很多作者进行过解释，并提出以下一些假设：

1) 在分子互相作用的情况下，金属粘着具有金属亲合的特点，并由构成金属的电子能级，以及这些金属在化学元素周期表中的位置来确定〔63〕。

2) 金属粘着只是发生在原子（离子）的晶格能量超过该金属最有利的能级值时〔290〕。

3) 所有金属表面，有任何污垢都能促进粘着。金属粘着的不同倾向性，主要是由于处在金属表面的膜的性质决定〔5〕。

氧化磨损，同时由在金属摩擦表面层上所进行的微小塑性变形过程和氧气的扩散作用来确定。在试验室条件下证明了，取决于摩擦条件的氧化过程的强度和特点也在发生变化。

根据现代机械零件磨损的理论，存在有以下一些氧化磨损形式或阶段。

1) 摩擦表面在边界润滑条件下，形成很薄一层化学吸附的氧化物。在这种情况下，磨损的特点是超微观的氧化金属膜形成