

КОМПОЗИЦИОННЫЕ СПЕЧЕННЫЕ АНТИ-
ФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

粉末冶金 复合减摩材料

И. М. 费多尔钦科 著
Л. И. 普 金 娜

李 孔 兴 译

江苏工业学院图书馆
藏书章

北京市粉末冶金研究所

粉末冶金复合减摩材料

[苏] И. М. 费多尔钦科 著
Л. И. 普金娜

李孔兴译

北京市粉末冶金研究所

一九八五年八月

编辑出版：北京市粉末冶金研究所
印 刷：河南省罗山科技印刷厂

工本费：8.50元

译 者 说 明

粉末冶金减摩材料的用途极广，但这方面的系统资料却很少。为满足粉末冶金行业及有关部门的需要，北京市粉末冶金研究所出版了苏联著名粉末冶金专家 И.М.费多尔钦科等著的《粉末冶金复合减摩材料》(1980年底出版)的中译本。该书是一本从材料成分、性能、制造工艺、应用范围和发展趋势等方面，全面、深入论述粉末冶金减摩材料的专著。本专著根据作者本人多年来的研究成果和世界其它国家专家学者在近几十年的研究成果，首次总结了用途极其广泛的粉末冶金减摩材料的性能、成分和制造工艺方面的资料数据；对在润滑和无润滑、空气和真空中，水润滑条件下、高温高速和高压条件下，以及在侵蚀和腐蚀介质中工作，用作轴承、密封材料和其它减摩部件的烧结减摩材料作了概述；对材料按工作条件进行了分类；介绍了一百多种润滑剂，第一次揭示了固体润滑剂对烧结材料承载能力影响的机制；指出今后的研究任务和发展前景。该专著是迄今为止在该学科中资料较新、较全、理论与实际应用相结合并着重于实际应用的好书。该专著出版后，受到专家们的高度评价，认为它是“对粉末冶金理论和实践的一大贡献”，是“各工业部门的工程师、专家和科技工作者案头必备的书籍”。

本书所介绍的材料和制品是我国机电（尤其是汽车和农机）、冶金、化工、交通、轻纺、日用、国防、航天和核工程等部门所急需广泛应用的。本专著对从事减摩材料研究、设计、试制的工程技术人员和大专院校有关师生都有参考价值。

本专著的主要作者 И.М.费多尔钦科是我国粉末冶金界所熟悉的、在苏联粉末冶金界享有盛誉的功勋科学家。他从事科研活动50多年，从事粉末冶金基础理论和材料的研究40多年，今年七十六岁。他是600多篇科学论文、8本专著的作者，并有68项发明。以他为主所著的《粉末冶金原理》(1961年版)，《现代摩擦材料》(1975年版)，已分别在1975年和1983年由冶金工业出版社翻译出版。这本《粉末冶金复合减摩材料》是他的近作。

为了使读者了解本书出版后这几年减摩材料发展情况，特把Е. Л. 施维德科夫(Шведков)的综述文章《自润滑减摩材料》一文，作为附录收入。本书的图系按原书制版，图内数字中的逗点为小数点，特此说明。

本书译出后，译者曾请一些工程师作了技术审校工作。倪明一审校了第五章，并对全书的翻译提出许多建设性的意见；李祖德在技术上给了很大帮助，并审校了第一章的第二节和第四节；高清德阅校了二、三、四章；马华农阅校了六、七两章；还有王俊民、孙学广、张仪郑、杜桂馥、许以俶、任建生、张桂珍、朱素娟等同志，对本书的编辑出版及文献翻译工作，给了大力帮助，付出了辛勤的劳动。译者对以上同志表示衷心的感谢！对于在酷热的伏天，加班加点排印此书的罗山科技印刷厂的师傅们，表示衷心感谢！

由于译者水平所限，书中一定有不少不妥或错误之处，请读者赐教，批评指正！

译 者 1985年7月于罗山

前 言

近年来，在生产复合减摩材料方面已形成独立的工业部门。该材料的实践意义和人们对它的兴趣正在不断增长。但是由于在材料的制造工艺、成分、性能和使用范围等方面缺乏必要的资料，所以该材料的应用推广受到限制。

1960年，波兰出版了 В. 泽格尔斯基 (Цегельский) 和 В. 路特可夫斯基 (Рутковский) 的专著《烧结轴承》。本专著的内容虽已陈旧，就是这样一本书，苏联读者也很少得到。1964年在捷克斯洛伐克，1970年在美国，先后出版了包括减摩材料和摩擦材料在内的论文集，但是它们并没有从整体上把问题阐述清楚。

1968年，在苏联出版了 А.Д. 莫什科夫 (Мошков) 的专著《多孔减摩材料》。该专著主要阐明了在润滑条件下工作的某些材料的使用性能。

在关于粉末冶金的部分专著中，都有阐述轴承材料的章节。例如，1948年出版的 М.Ю. 巴尔申 (Балшин) 的《粉末冶金》、1948年出版的 В.А. 鲍洛克 (Борок) 和 Ц.И. 阿尔霍夫 (Ольхов) 的《粉末冶金》、1960年出版的 В.Д. 琼斯 (Джонс) 的《粉末冶金基本原理》、1950年出版的 Ц.Г. 格特泽尔 (Гетцель) 的《粉末冶金原理》、1963年出版的 З. 米尼斯特尔 (Министр) 的《金属粉末机械零件》等。但是，由于篇幅所限，这些专著都没有反映出近15~20年研究和研制方面所取得的重要成果。鉴于这一情况，作者决定总结自己研制复合减摩材料方面的成果和文献资料。在分析烧结减摩材料问题状况的基础上，作者还试图阐明该材料在研究领域中的基本任务及其继续发展的趋势。

根据摩擦磨损机理的现代概念，根据已取得的有关减摩材料单个组元的作用及其对物理机械性能和使用性能影响的资料，他们仔细研究了制造复合烧结材料的原则。指出了不同用途材料的性能、采用的主要制造规范、设备及其应用领域。

作者根据成分特点及工作条件，对材料进行了分类。根据的条件是：润滑和无润滑；在真空、水和侵蚀性介质中摩擦；在高温、高负荷、高滑动速度下使用，等等。

根据已定的使用规范，并在组织材料生产的条件下，指出了选择材料的主要经济前提。

作者希望，通过对制造复合减摩材料的理论、材料的制造工艺、性能和应用范围等问题的系统论述，将对科学和设计院所的工程技术人员、对企业的工艺师有较大的帮助。

为保持写书时所采用的许多研究论文的原始资料，保留了资料的第一来源中所引用的计量单位。

目 录

译者说明	(5)
前言	(7)
绪论	(10)
第一章 减摩材料及其工作条件概论	(13)
第一节 对摩擦部件材料的要求	(13)
第二节 摩擦部件分类 (按轴承工作条件与结构)	(13)
第三节 复合减摩材料的性能及其生产状况概述	(17)
第四节 材料摩擦和磨损机理的现代概念	(24)
第五节 粉末冶金减摩材料发展的主要趋势	(32)
第二章 影响复合减摩材料性能的主要因素	(34)
第一节 化学成分在确保减摩材料性能中的作用	(34)
第二节 原始粉末的粒度组成对摩擦用材料性能的影响	(38)
第三节 显微组织和孔隙度参数对材料强度及减摩性能的影响	(41)
第四节 外界因素对减摩材料承载能力的影响	(47)
第五节 影响摩擦系数值的因素	(50)
第六节 结构对工作层应力分布的作用	(52)
第七节 制造材料的工艺因素对材料性能的影响	(54)
第八节 轴承的加工形式和表面状态对减摩性能的影响	(58)
第三章 对减摩材料基体的选择和对基体的物理机械性能作用方法的选择	(61)
第一节 金属及合金按耐磨性的分类	(61)
第二节 基体成分及合金元素的选择	(63)
第三节 影响疲劳强度的因素	(71)
第四节 通过致密强化减摩材料	(73)
第五节 通过强化增强材料基体	(77)
第六节 通过热处理和化学热处理强化材料	(79)
第四章 减摩添加剂的作用及其与基体材料的相互作用	(83)
第一节 固体润滑剂对复合材料的承载能力和摩擦系数的影响	(84)
第二节 石墨的润滑能力及其在烧结时与基体金属的相互作用	(91)
第三节 硫和硫化物的性能及作用	(98)
第四节 硒化物和碲化物的性能和作用	(108)
第五节 作为固体润滑剂的氟化物	(110)
第六节 铅及其它易熔金属的润滑性能	(115)
第七节 氮化硼作固体润滑剂的性能	(118)

第八节 作固体润滑剂的金属氧化物	(119)
第五章 复合减摩材料的制造工艺	(121)
第一节 对工艺的主要要求和工艺流程	(121)
第二节 原料的制备特点	(123)
第三节 制品的成形	(128)
第四节 烧结	(134)
第五节 补充热处理	(140)
第六节 化学热处理	(142)
第七节 热压和热挤压	(149)
第八节 钢背有金属减摩层的减摩材料的制造	(149)
第九节 复合减摩等离子涂层与电镀层	(150)
第十节 金属聚合物复合材料的制造工艺	(152)
第十一节 表面机械加工	(156)
第十二节 加入固体和液体润滑剂	(165)
第六章 复合减摩材料的主要类型及其性能	(168)
第一节 铜基材料	(168)
第二节 铁基材料	(174)
第三节 镍基和钴基材料	(190)
第四节 铝基和其它轻金属基材料	(193)
第五节 难熔金属及化合物基材料	(196)
第六节 金属石墨材料	(199)
第七节 带钢背的双层金属材料	(205)
第八节 基体填充型材料	(207)
第九节 金属玻璃材料	(209)
第十节 金属聚合物材料的主要类型及性能	(211)
第七章 特殊用途的复合减摩材料	(216)
第一节 在流体润滑条件下工作的材料	(216)
第二节 在空气介质、真空和惰性气体中无润滑摩擦用材料	(224)
第三节 在较高温度条件下工作的材料	(230)
第四节 高滑动速度下工作的材料	(234)
第五节 在水中和腐蚀介质中工作的材料	(237)
第六节 滑动集电材料	(242)
第七节 端面 and 径向密封材料	(246)
第八节 活塞环材料	(250)
第九节 轴承材料的选择及其应用的经济效果	(253)
结束语	(269)
参考文献	(270)
附录: 自润滑减摩材料	(304)
符号说明	(316)

绪 论

绝大多数的现代机器和机构，都有活动接头，它们能确保与运输、起重、材料加工、集电、滑动密封等有关的工作任务的完成。一般对制造上述摩擦部件用的材料的要求是：摩擦时能量损失小，而耐磨性高。为了满足上述要求，制造了各种青铜型和巴氏合金型有色金属基铸造减摩材料；用粉末冶金方法制造了复合减摩材料；还制造了聚合物和某些其它成分为基的材料。但是，由于机器和机构工作参数的不断提高，在大多数情况下，在摩擦部件中工作的材料报废，要比机器的其它部分快得多。这样就必须进行设备维修和制造大量的备件，因此浪费了许多时间和物资。

可以根据 И. В. 克拉格尔斯基 (Крагельский) 的资料，来评价减摩材料问题对国家国民经济的巨大意义⁽²⁶⁸⁾。苏联每年在机器和设备维修方面大约消耗一百二十亿卢布。其中85%用于使摩擦元件复原。这些摩擦元件的磨损，破坏了活动配对面的工作，导致间隙的产生。摩擦力作用下的磨损和表面擦伤是最常见的磨损现象。用于制造备件耗费的资金，相当于用来制造机器资金的25%到50%。

在烧结减摩材料出现的初期，人们认为它只是一种像巴氏合金和青铜这样的传统材料的代用品。在大批量生产中，它解决了用不太稀缺的金属代替稀缺的有色金属轴承的任务。但是机器制造业的飞速发展，提出了制造新型减摩材料的任务。这种材料应具有高耐磨性、低摩擦系数；既能在高速和大负荷条件下工作、也能在不同的活性介质中工作。例如，减摩材料能够在不补充润滑剂条件下工作，成了飞机和汽车制造业中最重要的问题。因为不补充润滑剂可以大大简化机器结构，减少机械维修，特别在低温条件下工作时，可提高工作的可靠性。

对化工部门、原子能部门以及其它技术部门来说，很需要在侵蚀性介质（水、酸、碱、熔融金属和赤热气体）中工作的减摩材料。火箭和低温技术要求能够在高真空以及接近绝对零度的温度下工作的新型减摩材料。在涡轮机制造业和其它技术部门中，需要在较高温度下工作的减摩材料。

对一切减摩材料的基本要求是最低的摩擦系数和高的耐磨性。这些性能决定着摩擦部件的最小能耗和最大的使用寿命。此外，在具体的工作条件下，对每种材料又有具体要求。例如在高温下应具有抗氧化性，在侵蚀介质等条件下工作时，应具有高的抗腐蚀性。

目前在许多摩擦部件中都采用减摩材料：如圆柱轴承和球形轴承、止推轴承、轴套、导向装置、滑动电触头材料、端面和侧面密封材料、关节装置、活塞环，等等。摩擦部件的工作条件也是多种多样：如在流体润滑条件下；在边界润滑及无润滑条件下；在真空中；在高温、高速、大负荷条件下；在水中和侵蚀介质中、在碳酸气体、惰性气体中，等等。还由于摩擦部件既能在单向运动条件下工作，又能在往复运动条件下工作，因而使工作条件复杂化了。

轴承用途所决定的工作参数，可以在很宽的范围内变化——滑动速度由几毫米到100米/秒以上，载荷从几克到100~200公斤/厘米²以上，温度从低温到1000℃以上。

根据上述情况，不可能研制出一种能在各种不同用途的摩擦部件中都能使用的通用减摩材料。由此可见，必须研制出供规定的具体工作条件下使用的各种不同的减摩材料。以往广泛采用

的、用铸造方法制造的减摩材料的工艺，在许多情况下，对于制造符合特殊工作条件要求的材料是无能为力的。采用聚合物基材料，为较好地满足用最佳性能的材料装备摩擦部件的要求，增加了部分可能性。

但是采用粉末冶金方法，使问题得到根本的解决。这种方法是把金属和非金属粉末混合物形式的原始材料，压制成轴承压坯，在气体保护介质中、在低于主要组元熔化温度的条件下进行烧结。这种方法可以通过成分和孔隙度的无限变化来制造减摩复合材料。填满润滑油的孔隙起了贮油器的作用，确保了自润滑效果。

在苏联，第一批用粉末冶金方法制造的减摩用复合材料始于1932年。当时在《电碳》厂组织了青铜石墨轴承的生产。在1934年研制成命名为《沃伊吉特》(Войзит)的铁石墨基减摩材料[386]。

以后，在这方面的研究发展极快。近年来建立了一系列铁和石墨基新型减摩材料。这些材料的特点是含硫、铜、硫化锌和锡。它们能够在有限润滑的条件下工作。为了改善减摩性能，在材料中加入了石墨、硫化物、硒化物和氟化物等不同的固体润滑剂。其中，加入氟化钙可以制造出在500~600℃温度的过热蒸汽介质、或空气介质中工作的复合材料。为了在较高温度下工作，制造了以硫化不锈钢为基的轴承。为了在水润滑条件下工作，研制出以多孔青铜骨架为基体的自润滑材料，里面浸渍含填充剂的氟塑料；研制出在真空中、干摩擦和高负荷条件下工作的材料；还研制出在腐蚀介质等条件下工作的金属石墨材料。

为保证复合材料必要的承载能力（这种承载能力还取决于材料的强度特性），采用了提高材料屈服点的合金化方法。对于铁基减摩材料，实践证明用碳（石墨）、铜、锰、铬、镍、铝作合金化元素是有效的。铜基材料的合金化添加剂是锡、镍、钴、铝等。

用粉末冶金方法已经研制出大量的减摩材料。这些材料在汽车和农机制造业、在轻、纺机械制造业、在涡轮机制造、仪表制造以及其它工业部门都得到应用。

含0.5~3%石墨和15~30%孔隙度的铁石墨减摩材料，可以在载荷达30~50公斤/厘米²、摩擦速度达1~2米/秒的条件下工作。在这样的条件下，它们能有效地代替青铜基和巴氏合金基轴承材料。在此情况下，与青铜及巴氏合金铸造轴承相比较，每吨制品可节约4千卢布。

含硫化锌（达4%）的铁石墨材料，还有其它成分（包括含铜、硫、硫化物、锡）的材料，可以在压力达100~200公斤/厘米²、摩擦速度达5~9米/秒和限制润滑剂供给量的条件下工作。

不锈钢基硫硼化材料，是把硫浸入多孔骨架，然后在含硼的填料中烧结制成的。这种材料能在温度达550~600℃、轴承部件的压力达1000公斤/厘米²的条件下工作。含30%石墨（体积）、以铁—镍复合体为基的金属石墨硫化材料，能确保纺织工业中的洗涤槽可靠地工作。

复合减摩材料的宝贵性能，就决定了这种材料的生产，会有很快的发展速度。据文献资料[832]报导，1964年全世界每天大约生产8百万件烧结轴承。在个别国家中，生产量的增长速度更快。法国[822]在1960~1973年这一时期，烧结青铜轴承每年平均增长7%，铁基轴承每年平均增长12%。西德从1954年到1962年，烧结轴承的生产每年增长10%，而从1963年至1965年，每年平均增长20~60%（总产量7300吨）。以后，由于汽车工业的危机而出现衰退现象[932]。苏联在1971~1975年这一期间，铁基烧结轴承的生产，每年大约平均增长15%。

复合减摩材料同铸造材料相比，有许多宝贵的优点。这些优点是：通过加入既可以与金属基体相互作用，也可以不相互作用的添加剂，来准确地控制材料的减摩性能；可以节约大量的有色金属，因为几乎没有切屑浪费；可以节能。由于能源缺乏，这一点特别引起人们的重视；还有一

点，就是可以把对周围环境的污染降低到最低限度。

人们对复合轴承材料的极大兴趣，推动在降低磨损和保证摩擦部件寿命方面科研工作的进一步发展。今后的科研方向是，润滑条件下工作的摩擦部件寿命要达到2~4万小时，在有限润滑和干摩擦条件下要达到1万至1万5千小时。现在极其重要的任务是：当滑动速度大于200米/秒、载荷达300~500公斤/厘米²、温度高于500~600℃时，如何降低消耗在摩擦上的能量损失和确保进一步提高摩擦部件的工作参数。

综上所述可以看到，进一步扩大复合减摩材料的生产，有着广阔的发展前景。

第一章 减摩材料及其工作条件概论

第一节 对摩擦部件材料的要求

机械制造和交通运输领域的进步,与摩擦部件中速度载荷的提高密切相关。对减摩材料的要求由材料的工作条件所决定,并有一个很宽的变化范围。在航空和汽车制造业中,采用能在干摩擦条件下工作的减摩材料,是一项急待解决的课题。因为这一课题的解决,可以大大简化摩擦部件的结构及其维修,降低摩擦部件的重量,提高工作的可靠性。

化学、原子能、纺织、食品以及其它一些工业部门,需要在耐腐蚀介质(水、酸、碱、熔融金属、赤热气体)条件下工作的减摩材料;火箭和低温技术,需要在高真空以及接近绝对零度温度条件下工作的新材料;而涡轮机制造业和连续浇铸钢锭的设备,则需要能在较高温度下工作的材料,等等。根据所有这些情况,对减摩材料提出了在不同的具体条件下使用的要求。为保证减摩材料在预定条件下的使用寿命,材料应具有确定的性能。另外,减摩材料还应具备一般减摩材料都应具备的其它性能。这些性能是:摩擦系数低,耐磨性高;最佳的体积强度和表面强度,从而把表面层的高强度与摩擦偶件的易磨合性结合起来;有足够的韧性,没有脆性断裂的可能性;疲劳强度高;有构成二次组织层的能力,以便提高摩擦材料表面的抗咬合性;有足够的导热率和最佳的热胀系数;材料中贮存着固体或液体润滑剂;制造中的经济效果和工艺性。

此外,对于具体用途的材料,还要求有特殊性能。例如,重载荷摩擦部件的材料,应具备足够的体积机械强度;在较高温度和在无流体润滑条件下工作的材料,应具有高温抗氧化性,对氧化产物具有良好的减摩性能;在工作温度条件下,应具有稳定的物理机械性能。在真空条件下和在惰性气体介质中工作的材料,应具备抗表面咬合的能力,并且在无流体润滑时有足够低的摩擦系数。

对轴承材料最主要的要求是工作表面无咬合现象。因为这一特性在很大程度上决定着工作压力和速度的许用值。

由此可见,没有适合于摩擦部件一切工作条件的万能材料。对于任何一种具体条件,必须研制满足该条件要求的材料。

第二节 摩擦部件分类(按轴承工作条件与结构)

根据承受载荷的形式,滑动轴承分为径向轴承、止推轴承和径向-止推轴承。径向轴承承受垂直于轴心的径向(横向)力,止推轴承则承受顺着轴心的力,而径向-止推轴承是组合轴承,承受径向和轴向载荷⁽⁵⁰²⁾。烧结滑动轴承的结构形式有:圆柱轴套、带一个凸缘的轴套或球形轴承、高度较小的止推轴套、环和较小的轴瓦。装有烧结轴承的摩擦部件结构,取决于润滑剂供

考虑到摩擦部件结构的特殊性，由烧结材料作的轴承元件还有其它多种结构形式。这就是圆锥轴承、导向盘、活塞环、径向密封环和迷宫式交叉密封嵌镶块、滑动触头和电刷摩擦元件、转子和叶片式发动机的密封片、止推和加强轴套（例如泵用轴套）等。

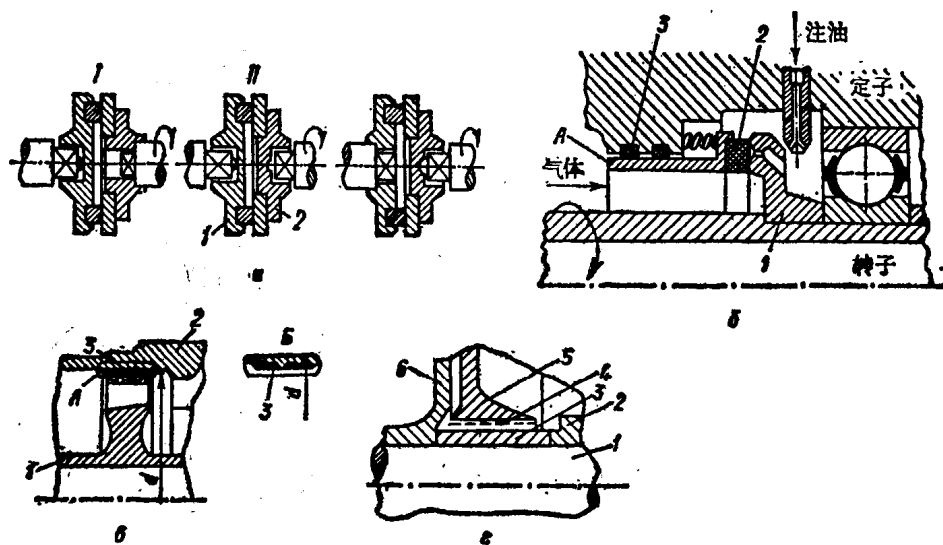


图2, a 示出端面密封静环1和动环2的装置图。图2, b 为(在涡轮机中把气体腔和油腔分开)端面密封示意图; 转子的动环1和端面被强化的静环2; 以及附加径向密封环3。涡轮机有

流体的部位，其工作部分的密封，采用径向环A或者按“燕尾”式迷宫式镶块6的形式（图2.B）。图2，r列出电力扬水泵部件的止推轴套3和加强轴套4的装置图，这些轴套与轴1、工作轮6、导向装置5、枢轴2装配在一起。

用粉末冶金方法制造套类和环类制品，建议采用如下尺寸比：

$$\frac{L}{D} < 1.2; \quad \frac{L}{\delta} < 25 \left(\frac{L}{\delta} < 15 \right),$$

式中 L——零件高度；

D——零件外径；

δ ——轴套的壁厚（对于D>50毫米的大尺寸轴套）和

$\frac{L}{\delta} < 15$ （对于D<50毫米的较小尺寸的轴套）。轴套的最小厚度为1.5毫米。

但是为了保证压制件的精度及其孔隙分布比较均匀，也就是从工艺上考虑，制造轴套时壁厚不应小于3.5~5.0毫米，而板、电刷等扁平状元件的高度不应小于5~7毫米。

在选择轴套结构时，必须考虑到影响摩擦部件工作能力的一个重要因素，即散热。温度影响工作层的组织状态、相变、表面层塑性变形的程度和润滑剂的粘度，并决定摩擦时发生的许多过程（氧化、轴承材料与润滑剂的相互作用，等等）。因此，轴承结构应该顾及到能够将摩擦条件下过程正常进行和形成二次组织耐磨层所必需的热量排出。对于每一种轴承结构，应该确定极限许可工作温度。必须对轴承结构以一定的限制，如：使用条件、许可的径跳、润滑油的粘度、油的抗氧化性，等等。

采用粉末冶金方法制造摩擦部件零件的可能性，必须通过估价应用烧结材料的适宜性（使用性能水平、经济性、生产量、原材料和设备的生产供给）和工作条件来确定。所谓工作条件，指的是载荷的大小与性质、滑动速度、润滑剂是否存在及其数量、工作介质（介质的成分和温度）、使用寿命和工作规范、允许的磨损和摩擦系数、配对偶件（轴或其它对偶）材料的成分和性能以及摩擦部件的结构特点。

在对摩擦部件的工作条件分类时，首先应该考虑摩擦类型。根据苏联标准ГОСТ16429—70，以润滑剂的存在形式分为三种摩擦类型：流体摩擦、边界摩擦和无润滑摩擦。流体摩擦条件对于轴承材料的工作最有利。在流体摩擦时，载荷可以完全传递给流体润滑层，其层厚超过轴承材料表面上显微不平度的总高度。

应区别流体静力学和流体动力学摩擦。在第一种情况下润滑油在压力下供给，并且轴处于悬浮状态下。轴与轴承的直接摩擦只可能在静止和启动状态下，或者在油被甩出的异常情况下才会出现。

流体动力学摩擦状态的造成，是由于轴颈的旋转，轴颈把液体卷入并像泵一样把液体压入缝隙。这样，在把摩擦面分开的液体承载层中便产生了升浮力〔500, 635〕。

在流体弹性动力层中，润滑层厚度为25~75微米，而在流体动力学条件下，其厚度为0.025~7.6微米，也就是减少1~2个数量级〔723〕。在第一种情况下，油膜对摩擦过程中的载荷不大敏感，因此摩擦系数等于0.001~0.1，而在第二种情况下，摩擦系数值在很大程度上取决于载荷，并等于0.01~0.1。

在这种情况下，摩擦功集中在中间润滑层，中间润滑层决定着磨损、摩擦系数，因而也决定摩擦部件的使用寿命。