

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

C25D 5/16

C25D 11/02 C23C 28/00

[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 99816864.5

[43] 公开日 2002 年 9 月 4 日

[11] 公开号 CN 1367849A

[22] 申请日 1999.8.17 [21] 申请号 99816864.5
[86] 国际申请 PCT/RU99/00298 1999.8.17
[87] 国际公布 WO01/12883 俄 2001.2.22
[85] 进入国家阶段日期 2002.2.19
[71] 申请人 岛屿涂层有限公司
地址 英国伊勒马恩
[72] 发明人 亚历山大·谢尔盖耶维奇·沙特罗夫

[74] 专利代理机构 中原信达知识产权代理有限责任公司
代理人 王维玉 丁业平

权利要求书 2 页 说明书 11 页 附图页数 1 页

[54] 发明名称 轻合金基复合防护多功能涂层

[57] 摘要

一种非铁合金 (Al、Mg、Ti、Nb、Al - Ti、Al - Be、Ti - Nb) 上的 防护性多功能复合涂层, 它包括基体形式的坚固、坚硬的多孔氧化物 陶瓷层和注入基体孔隙中的官能化合物。官能化合物从一组金属 (Ni、Cu、Co、Fe、Cr、Mo、Ti、Al、Sb、Ag、Zn、Cd、Pb、Sn、Bi、In、Ga) 和一组难熔化合物 (元素周期表的 IVB - VIB 族中的金属碳化物、氧化物、氮化物、硼化物和硅化物) 中选择。通过等离子体电解氧化 方法氧化基底来施加氧化物陶瓷基体层, 该基体层具有与基底很高的 粘附性。通过调整氧化过程的参数, 可以达到所要求的氧化物层的孔 隙度。利用下面的任一种处理方法把官能化合物注入陶瓷基体的多孔 结构中: 从溶液中进行化学或电化学沉淀, 从气相中进行化学或物理 沉淀, 或者是采用机械摩擦法。在注入官能化合物之后, 对复合涂层 进行精加工处理, 目的是露出能够承担荷载的陶瓷层的顶端。所开发 的基体层的多孔结构的坚固表面与官能化合物粘合便形成了一种新的

具有高粘合强度的涂层。这种复合涂层的以下特性得到了提高: 强度、硬度、耐磨性和耐腐蚀性, 并且具有一定的塑性, 还可以抗接触动态 荷载和振动。

知识产权出版社出版

ISSN 1008-4274

1. 防护性复合涂层，其应用于非铁金属，它们的合金和金属间化合物以及由它们制造的部件之上，特征在于它采用了多孔氧化物陶瓷基体涂层的形式，这种涂层是利用等离子体电解氧化方法氧化要防护的材料表面而形成的，要在该涂层的孔隙中注入从下面的一组金属及其混合物和下面的一组化合物及其混合物中选择的至少一种官能化合物，这组金属为：Ni、Cu、Co、Fe、Cr、Mo、Ti、Al、Sb、Ag、Zn、Cd、Pb、Sn、Bi、In、Ga，这组化合物为：门捷列夫元素周期表的 IVB-VIB 族中金属的碳化物、氧化物、氮化物、硼化物和硅化物。

2. 权利要求 1 的复合涂层，特征在于它适用于非铁金属 Al、Mg、Ti、Nb 及其合金，同样还适用于化合物 Al-Ti、Ti-Nb 和 Al-Be。

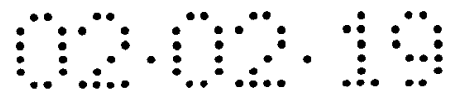
3. 权利要求 1 的复合涂层，特征在于氧化物陶瓷基体涂层的开放孔隙度为 5-35%，优选为 10-12%，并且沿着从外层朝里的方向随厚度增加孔隙度降低，氧化物陶瓷涂层的微观硬度为 300-2000HV，并且沿着从外层朝里的方向随厚度增加而增加，氧化物陶瓷层的总厚度为 1-600 μm ，优选为 3-150 μm 。

4. 权利要求 3 的复合涂层，特征在于注入到氧化物陶瓷涂层中去的官能化合物的深度为 1-150 μm ，优选为 2-100 μm 。

5. 把防护性复合涂层应用于非铁金属的方法，它们的合金和金属间化合物以及由它们制造的部件之上的处理方法，特征在于它包括以下步骤：

(a) 对要防护的材料表面层进行等离子体电解氧化；

(b) 在步骤 (a) 所产生的氧化物层孔隙中注入从下面的一组金属及其混合物和下面的一组化合物及其混合物中选择的至少一种官能化合物，这组金属为：Ni、Cu、Co、Fe、Cr、Mo、Ti、Al、Sb、Ag、



Zn、Cd、Pb、Sn、Bi、In、Ga，这组化合物为：门捷列夫元素周期表的 IVB-VIB 族中金属的碳化物、氧化物、氮化物、硼化物和硅化物；

(c) 把复合涂层的表面进行机械精加工。

5 6. 权利要求 5 的方法，特征在于进行等离子体电解氧化时，电压为 100-1000V，电流密度为 $2-200\text{A}/\text{dm}^2$ ，连续脉冲的频率为 50-3000Hz，并且是在 10-55℃的弱碱性电解液中进行上述电解氧化的。

10 7. 权利要求 5 的方法，特征在于把官能化合物注入涂层的孔隙是利用从水溶液或有机溶液中进行电化学沉淀，包括使用超弥散粉来实现的。

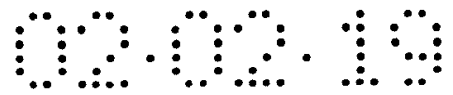
15 8. 权利要求 5 的方法，特征在于把官能化合物注入涂层的孔隙是利用从水溶液或有机溶液中进行化学沉淀来实现的。

20 9. 权利要求 5 的方法，特征在于把官能化合物注入涂层的孔隙是利用从气相中进行化学沉淀来实现的。

25 10. 权利要求 5 的方法，特征在于把官能化合物注入涂层的孔隙是借助于物理沉淀方法来实现的。

 11. 权利要求 5 的方法，特征在于把官能化合物注入涂层的孔隙是借助于使用粉末，棒材或刷子进行机械摩擦来实现的。

 12. 权利要求 5-11 的方法，特征在于对复合涂层的精加工机器处理是从下面的操作中选择：抛光、研磨、精磨、珩磨、超精加工，并且精加工一直执行到部件的实际尺寸与其所要求的尺寸相对应，或者一直到露出氧化物陶瓷基体层的突起顶部。



说明书

轻合金基复合防护多功能涂层

5 技术领域

本发明可被用于工程、电子、医药以及其他使用非铁金属及其合金的领域的各个部门。本发明涉及一种把防护涂层应用于上述金属及其合金以及由它们制造的部件和物品的技术。

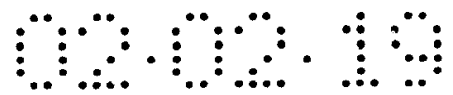
10 背景技术

使用具有硬化陶瓷涂层的非铁合金部件而不是传统材料（陶瓷、高合金钢和铸铁）制成的部件可以大大增加高载荷快速磨损部件的耐久性和可靠性，并且还可以减轻重量以及改善部件的动力特性。

15 目前，已制造出相当数量的硬瓷涂层，但是能在润滑不足或根本就没有润滑作用的极端条件下使用的硬瓷涂层却相当缺乏。象 TiN、TiCN 这样的薄耐磨涂层，由于其润湿性能不足，经常会破坏润滑油膜，这样就会造成更大程度的磨损。相对较厚的陶瓷涂层在其磨损性能方面接近于烧结陶瓷。它们的主要缺点在于摩擦系数高，在润滑剂不足之处摩擦接触面的发热，微切削效应造成的对应物体的深度磨损，陶瓷颗粒的剥落及其微屑加入对磨损的进一步加速。把表面进一步精加工到粗糙度为 $Ra0.04-0.06 \mu m$ 只能部分解决这个问题。

25 近来在制造非铁合金部件的通用防护涂层方面又进行了更多的尝试，使其能够在极端条件下工作并且仍然具有低的摩擦系数，高的耐磨性能以及良好的耐侵蚀介质的性能。

制造这种涂层的一个方法是在要防护的部件上形成多孔的陶瓷涂层，然后在孔隙中注入各种填料。



这里有一种已知的处理方法（美国专利 5,487,826A）：在 Al、Mg 和 Ti 的合金上形成一个复合层，它包括一个多孔的防护性氧化层，在孔中注入的是含氟聚合物的颗粒。

5 另一种已知的处理方法（WO 97/05302）是在 Al、Mg 和 Ti 的合金上形成一个多孔的氧化膜，再利用溶胶凝胶技术把 SiO₂ 颗粒注入孔隙中。

10 还有一种已知的处理方法（RU 2073752）是在铝合金部件上形成的氧化层中引入硅有机低聚物，然后在 300-500℃ 进行热处理。

15 上述处理方法的一个共同缺点在于：部件在极端条件下使用时会出现高温，它们在这种高温的情况下应用存在局限性，并且涂层的导热性和导电性的等级也很低。

20 摩擦生电因子和热辐射因子会极大地影响磨损的特性以及相互摩擦的物体间形成的磨损产物。因此可以通过在涂层中使用金属或有金属特性的成分来增加复合涂层的导热性和导电性。

25 有一种已知的用于螺旋泵的转子的表面处理的方法（美国专利 5,645,896A）：首先通过气热撒粉过程在转子的表面形成一层厚度为 50-125 μm 的粗粒碳化钨，然后形成一层厚度为 75-150 μm 的镍铬合金层一直到把碳化物层完全覆盖住。最终的抛光把转子减小至其所要求的尺寸，并露出碳化物层的防护顶点，在转子工作时由它承担主要载

30 在上面所描述的方法中，转子由钢制成。但是可把气热撒粉过程用于向任意背衬敷涂任意成分的涂层。但是，用这种方法很难在具有复杂形状的部件上形成均匀的涂层。另外，利用气热撒粉过程所形成的涂层与基底结合的也不足够牢。如果基底是非铁金属形成的话，上

述缺点就会更加严重，因为它们散热很快并且在等离子流的影响下会集中形成薄的氧化物薄膜。同样，非铁合金会对撒粉过程的高温产生临界反应，因为铝合金和镁合金的表面在这种高温下会熔化，而且钛合金的过热会造成其抗疲劳性降低。

5

有一种已知的处理方法（美国专利 5,364,522A）是应用多功能复合涂层，这种多功能复合涂层由富含硼化物、碳化物、氮化物、氮氧化合物和硅化物的陶瓷薄膜组成。在这种处理方法的第一个阶段，先用电化学方法把氢氧化物陶瓷层敷涂在背衬上，在第二个阶段，在

10

利用这种处理方法制成的涂层在高温下坚固，耐磨并且耐腐蚀。但是，这种技术中所使用的高温不可能把这种涂层应用于由非铁合金制成的部件上。

15

有一种已知的处理方法（WO 91/13625）是把耐磨、减摩涂层应用于铝及铝的合金。首先把铝的背衬在 15%的硫酸溶液中进行阳极氧化。然后把一层软金属即铟、锡、镓或其组合物敷涂于多孔的阳极氧化物表面。阳极氧化物涂层的厚度为 1-500 μm ，金属层的厚度为 10-100 μm 。在该处理方法中，阳极金属至少 80%的孔应填充金属。

20

上述方法的主要问题在于低的机械强度和碱性的阳极氧化物涂层的不稳定性。

25

厚度超过 10 μm 的阳极涂层包含大量的孔隙，这些孔隙被水化到相当的程度（涂层中水的含量超过 10%），并且它们的成分还包括涂层结构中的 10-20%的电解质阴离子。当被加热到 120℃时，电解质成分和水会脱离涂层结构，这会造成阳极氧化物层的破裂和剥落，损害其防护性能。另外，阳极氧化物层主要包括氧化物的无定型相，因此它们的强度和微观硬度都不高。

30

发明内容

本发明的一个任务是开发一种用于非铁合金部件的复合涂层，该涂层在其整个工作寿命期间都具有良好的耐磨性和低的摩擦系数，耐
5 侵蚀性介质以及抵抗动态接触载荷和振动的能力。

本发明的第二个任务是开发一种用于非铁合金部件的复合涂层，该涂层具有高的耐磨性和抗划伤性，高温下抗侵蚀磨损和磨料作用的性能，而且还耐腐蚀。

10 本发明的第三个任务是开发一种把复合涂层敷涂在非铁合金上的生态安全并且比较便宜的技术，该技术可用于成批生产。

本发明能够解决上述的这些以及某些其他任务，因为本发明所创造的涂层采用的是多孔氧化物陶瓷涂层的形式，这种形式的涂层是利用等离子体电解氧化方法通过氧化要保护的材料的表面层而形成的，
15 注入孔隙的金属为 Ni、Cu、Co、Fe、Cr、Mo、Ti、Al、Sb、Ag、Zn、Cd、Pb、Sn、Bi、In、Ga 以及它们的混合物或者是门捷列夫周期表的 IVB-VIB 族中金属的碳化物、氧化物、氮化物、硼化物和硅化物以及它们的混合物。
20

利用等离子体电解氧化方法在非铁合金上形成多孔氧化物陶瓷涂层是本发明人在较早的国际申请 PCT/RU97/00408（公布号 WO
99/31303）中提出的。

25 这些涂层与基底的附着力为气热撒粉涂层与基底附着力的 5-10 倍，它们的强度和微观硬度为气热撒粉涂层的 2-5 倍，比阳极氧化物层要高。

30 氧化作用发生在温度为 15-55℃ 的生态上无害的弱碱性含水电解

质中。把 100-1000V（幅值）的脉冲电压加到部件上。

连续脉冲的频率为 50-3000Hz。电流密度为 2-200A/dm²。

5 在等离子化学反应的影响下在非铁合金部件的表面上形成微观硬度为 300-2000Hv 的细晶氧化物层，氧化物层的微观硬度取决于合金基底的成分。细晶氧化物层的厚度为 1-600 μ m。

10 通过改变电解方法和电解液的成分，可以大大改变氧化物陶瓷涂层的物理机械性能，特别是开放空隙率的大小，开放空隙率可以在 5-35%的范围内变化。

15 研究表明如果把上面所列的金属或者是门捷列夫周期表的 IVB-VIB 族中的金属碳化物、氧化物、氮化物、硼化物和硅化物以及它们的混合物注入这种涂层的孔隙中，该涂层会获得诸如强度、硬度以及塑性等方面的独特性能，另外还有高的耐磨损和划伤性，高的抗腐蚀性和抵抗动态接触载荷和振动的能力。

20 孔隙的尺寸可以从直径几十纳米到几个微米。尺寸大于一个微米的孔隙占据了超过 90%的所有孔隙的容积。大部分官能化合物都是注入这些孔隙中。

25 氧化物陶瓷层的多孔结构起到制造多功能复合涂层基体的作用。但应注意涂层的孔隙度随涂层深度而变化，在表面时最大，在接近基体金属时会减少 2-6。注入孔隙的官能化合物的浓度遵从以下特性：在靠近表面的层中浓度最大，之后随着涂层深度的增加浓度按指数规律减小。开放孔隙度为 10-20%的氧化物陶瓷涂层是制造复合涂层的理想基体，可以在该基体中注入具有特殊性能并能实现特殊功能（耐磨、导热性、耐腐蚀等等）的化合物。

30

相反，氧化物陶瓷涂层的微观硬度在接近基体金属时最大，然后沿朝向涂层外表面的方向稳定减少（减少 20-30%）。

5 所开发的基体层多孔结构的坚固表面提供了官能化合物粘附于氧化物涂层上的良好的附着力。这给了复合涂层很高的粘附强度。

10 注入氧化物层孔隙中的第一组官能化合物包括软金属 Ni、Cu、Co、Fe、Cr、Mo、Ti、Al、Sb、Ag、Zn、Cd、Pb、Sn、Bi、In、Ga 以及它们的混合物。

上述金属对复合涂层起到了增塑影响。涂层的这种特殊性能应归因于热力载荷下它的形变特性。与纯陶瓷相比，这种两相的陶瓷金属结构所提供的冲击粘度可以增加五倍。

15 还可以把这种涂层用作耐磨涂层。在精工处理之后，氧化物陶瓷层部分被暴露出来。摩擦表面上的这些坚固的部分承担了主要载荷并由此提高了表面的承载能力。

20 另外，表面上较软的部分，在其磨损后，会形成微凹坑和微凹槽，起到润滑剂容器的作用，而且它们的存在还改变了摩擦接触面的摩擦状况，便于清除磨损产物，由此便改善了表面的工作能力。

25 考虑到部件的摩擦状况，润滑剂的存在以及接触表面的状况，在制造复合涂层时最好使其与使用时的特定条件相对应：复合涂层具有最佳的孔隙度，孔隙中注入最佳的官能化合物成分。

30 注入氧化物层孔隙中的第二组官能化合物包括门捷列夫元素周期表的 IVB-VIB 族中的金属难熔化合物：碳化物、氧化物、氮化物、硼化物和硅化物。

单独使用上述这些化合物或与金属一起用作注入涂层的陶瓷基体的功能材料可以给予复合涂层这样的特性：高的硬度和强度，耐高温以及特别高的耐磨性。孔隙中的这些化合物硬化了复合涂层，改变了其热物理和机械性能。

5

所有上面所列出的官能化合物都可以用已知的方法注入多孔的陶瓷基底层，这些方法有从水溶液或有机溶液中进行电解或化学沉淀的方法，其中包括超弥散粉的使用，还有从气相或汽相中进行化学或物理沉淀的方法，或者使用粉末、棒材、刷子等的机械摩擦法。

10

利用这些方法，注入到氧化物陶瓷基体涂层中的官能化合物的深度可以达到 $1-150\ \mu\text{m}$ ，这取决于氧化物涂层本身的深度以及其中孔隙的容积。

15

然后对工作面进行机器精加工（抛光、研磨、精磨、珩磨、超精加工）一直到部件达到所要求的尺寸和表面粗糙度，或者一直到露出氧化物陶瓷涂层的顶点。上面的机械处理可以除去多余的官能化合物层并使其余的部分均匀分布于表面上。机械处理还意味着没有必要让摩擦表面试车。

20

附图简述

图 1 为上面敷涂了复合涂层的样品的横截面，其中：1 为粘附的功能材料；2 为氧化物基体涂层中的孔隙；3 为氧化物陶瓷基体涂层；4 为基体金属和氧化物涂层之间的过渡层；5 为基体金属。

25

图 2 为在完成了对复合涂层的精加工处理（抛光）之后样品的横截面，其中：1 为粘附的功能材料；2 为氧化物基体涂层中的孔隙；3 为氧化物陶瓷基体涂层；4 为基体金属和氧化物涂层之间的过渡层；5 为基体金属；6 为工作面上氧化物涂层的突起部分。

30

发明实施例



下面给出一些实施例作为对本发明的具体说明。但是，应当理解本发明并不局限于给出的实施例中所考虑的具体部件。

实施例 1（用于比较）

5 一种 D16 (AlCu_4Mg_2) 合金的样品，形状为环形，尺寸 $D=40$ 毫米， $d=16$ 毫米， $h=12$ 毫米。外圆柱表面在 30°C 的磷酸硅酸盐电解液（pH 值为 11）中经受 120 分钟的等离子体电解氧化。方法是阳极阴极法，电流密度为 $20\text{A}/\text{dm}^2$ ，终止电压的大小（幅值），阳极为 600V，阴极为 190V。氧化物陶瓷涂层的深度为 $120\mu\text{m}$ ，微观硬度为 1800Hv，
10 开放孔隙度为 20%。

实施例 2

 一种 D16 (AlCu_4Mg_2) 合金的样品经受与实施例 1 一样的处理后，具有下列特性：氧化物涂层深度为 $120\mu\text{m}$ ，微观硬度为 1800Hv，
15 开放孔隙度为 20%。

 把该样品进行化学镀镍然后抛光。抛光之后镍的渗透深度为约 $10\mu\text{m}$ 。镍的浓度在靠近表面的层中达到最大，然后随涂层深度的增加按幂指数规律减小。

20

实施例 3

 一种 AK4-2 (AlCu_2 , Mg_2 Fe Ni) 合金的样品在 30°C 的磷酸硅酸盐电解液（pH 值为 11）中进行 90 分钟的等离子体电解氧化，方法是阳极阴极法，电流密度为 $15\text{A}/\text{dm}^2$ ，终止电压的大小（幅值），阳极为 550V，阴极为 120V。氧化物陶瓷涂层的深度为 $70\mu\text{m}$ ，微观硬度
25 为 1550Hv，开放孔隙度为 16%。

 利用从气相进行化学沉淀的方法把包含了 20%Cr 和 80% Cr_3C_2 的复合层敷涂在样品上。在沉淀过程中，要把样品加热到 300°C 。这一步之后，对样品进行抛光。渗透到孔隙结构中的官能化合物 Cr- Cr_3C_2
30

的深度为约 $7\mu\text{m}$ 。

实施例 4

5 一种 VT6 (TiAl_6V_4) 合金的样品在 20°C 的铝酸盐硫酸盐电解液 (pH 值为 9) 中进行 20 分钟的氧化, 方法是阳极法, 电流密度为 $50\text{A}/\text{dm}^2$, 终止阳极电压的幅值为 300V。氧化物涂层的深度为 $15\mu\text{m}$, 微观硬度为 690Hv, 开放孔隙度为 12%。

10 利用从气相进行化学沉淀的方法把一层镍敷涂在样品上。在沉淀过程中, 要把样品加热到 200°C 。这一步之后, 对样品的圆柱表面进行抛光。渗透到孔隙结构中的镍的化合物的深度为 $3\mu\text{m}$ 。

实施例 5

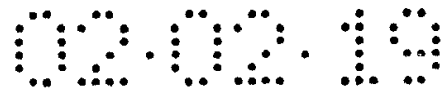
15 一种 VMD12 (MgZn_6MnCu) 合金的样品在 20°C 的铝酸盐氯化物的电解液 (pH 值为 12) 中进行 40 分钟的氧化, 方法是阳极阴极法, 电流密度为 $8\text{A}/\text{dm}^2$, 终止电压的幅值, 阳极为 300V, 阴极为 130V。氧化物陶瓷涂层的深度为 $30\mu\text{m}$, 微观硬度为 750Hv, 开放孔隙度为 25%。

20 利用从气相进行化学沉淀的方法把镍的复合层敷涂在样品上。在沉淀过程中, 要把样品加热到 200°C 。这一步之后, 对样品的圆柱表面进行抛光。渗透到孔隙结构中的镍的化合物的深度为 $10\mu\text{m}$ 。

实施例 6

25 一种 “localloy” 类型的 ABM-3 ($\text{AlBe}_{60}\text{Mg}_2$) 合金的样品在 30°C 的磷酸盐硅酸盐电解液 (pH 值为 11) 中进行 120 分钟的氧化, 方法是阳极阴极法, 电流密度为 $15\text{A}/\text{dm}^2$, 终止电压的幅值, 阳极为 480V, 阴极为 110V。氧化物陶瓷涂层的深度为 $100\mu\text{m}$, 微观硬度为 790Hv, 开口孔隙度为 18%。

30



利用从气相进行化学沉淀的方法把镍的复合层敷涂在样品上。在沉淀过程中，要把样品加热到 200℃。此后，对样品的圆柱表面进行抛光。渗透到孔隙结构中的镍的化合物的深度为 8 μm。

5 用一台通用的摩擦测试机对具有不同类型涂层的部件的摩擦对和相对应的硬化钢样品进行了测试。

10 选择了具有相交轴的环形圆柱体，相交轴用于进行点接触。把一钢号为 ShKh15，硬度为 HRC₃58-60 的固定样品按在运动的样品（环）上，在该样品上敷涂着要研究的涂层。

15 以边界摩擦方法进行测试，测试前给敷涂了涂层的样品加几滴轴润滑油。滑移速率为 2 米/秒，与样品进行接触的正常荷载为 75N。测试共进行 60 秒。每个环进行 10 次相同的测试。根据这些测试结果计算出各性能的平均值。

20 研究结果还可用于对耐磨性、摩擦系数和承载能力等摩擦特性进行估计。可以通过比较钢样品上斑点的尺寸和敷涂样品的质量损失，根据其重量和尺寸的磨损来估计耐磨性。

表 1 给出了技术摩擦测试的结果。

表 1

测试样品的编号 (实施例的编号)	有涂层的样品的 磨损量, 毫克	钢对应体的磨损 斑点的面积, mm ²	摩擦系数
1	1.96	2.83	0.439
2	0.25	1.18	0.202
3	0.16	1.46	0.232
4	0.63	0.74	0.185
5	0.75	0.55	0.171
6	0.19	1.23	0.225

测试结果显示了与铝合金的普通氧化物陶瓷涂层相比在各种背衬上使用复合涂层的效率：摩擦系数比 0.5 大一点，对应体的磨损减小了 2-5 倍，环形涂层本身的磨损量减小了 10 倍。

5

工业实用性

因为所推出的复合涂层具有如下特殊性能：高强度，高硬度并且还有一定塑性，优异的耐磨损和耐划伤性，高的耐腐蚀和耐振动性，因此我们有机会拓宽非铁合金部件的应用。

10

同样，在不同形式的磨损（高温时的磨损，侵蚀性介质中的磨损，动态接触荷载和振动时的磨损）同时起作用的极端条件中工作的部件的耐久性和可靠性也增加了。

15

因为注入多孔陶瓷基体的功能材料所使用的金属和难熔化合物的范围很宽，因此就可以选择用于实际使用条件的最佳性能的复合涂层。

20

所推出的用于制造防护性涂层的方法的显著之处在于它对生态无害并且成本很低，因此适合大规模使用。

说明书附图

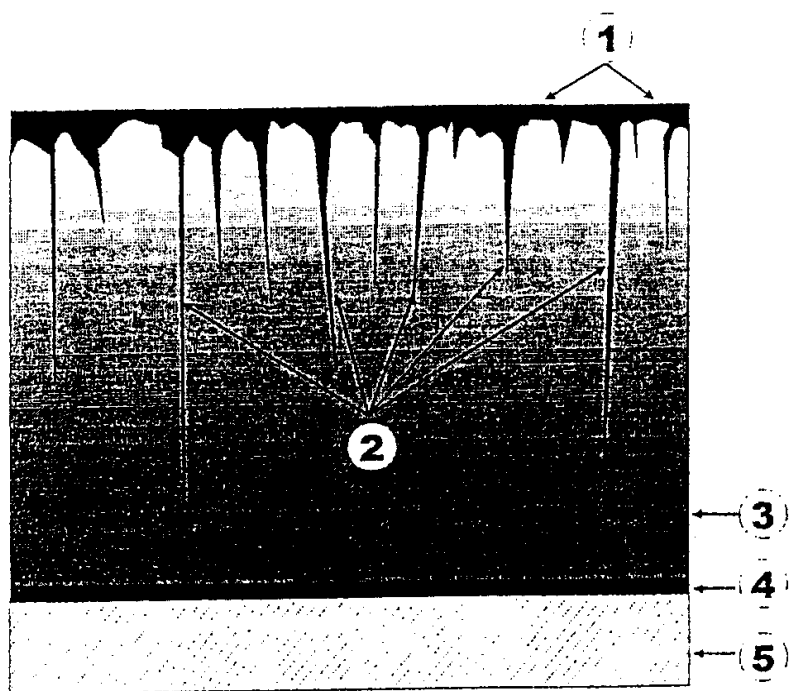


图1

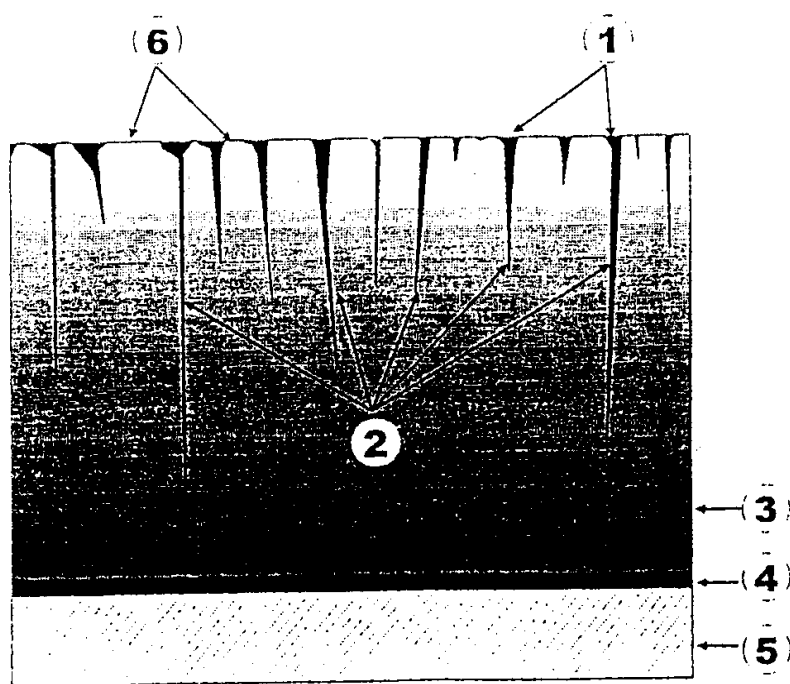


图2