

发动机凸轮轴衬套合金层表面白斑成因分析

王恒¹, 李杨¹, 胡志芹¹, 伍云², 赵亚斌³, 周聪¹

1. 磐固合金(常州)有限公司, 江苏 常州 213399; 2. 二重(德阳)重型装备有限公司, 四川 德阳 618000;
3. 苏州纽威阀门股份有限公司, 江苏 苏州 215004

摘要:为解决某柴油机凸轮轴衬套 AlSn6CuNi 合金层表面出现的大量白斑, 利用白光干涉仪、X 射线衍射仪、X 射线荧光光谱仪、扫描电子显微镜和能谱仪, 分析合金层表面三维形貌、表面物相、合金成分、微观组织形态和元素成分强度, 确定白斑形成原因。结果表明: 白斑附着在合金层表面, 主要成分为 Si; 对比无白斑合金, 白斑合金层中 Sn 质量分数减小, Al 质量分数增大, 白斑合金层表面、微观组织致密性较差, 有明显的坑洞, 白斑区域外表面有一定的 Si、Ca、Na 等元素, 确定白斑产生的原因为热处理退火温度较高造成部分 Sn 熔化流出, 合金层表面形成坑洞缺陷, 引发表面微裂纹, 使浸泡过程中清洗剂中的硅酸钠黏附在合金层表面。为获得良好的合金层组织性能, 应严格按照生产工艺控制合金层退火温度。

关键词: 凸轮轴衬套; AlSn6CuNi 合金层; 白斑; 热处理退火温度

中图分类号: TK427

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2024)04-0101-06

引用格式: 王恒, 李杨, 胡志芹, 等. 发动机凸轮轴衬套合金层表面白斑成因分析[J]. 内燃机与动力装置, 2024, 41(4): 101-106.

WANG Heng, LI Yang, HU Zhiqin, et al. Analysis of the causes of white spots on the surface of alloy layer of engine camshaft bearing[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(4): 101-106.

0 引言

凸轮轴衬套压装在缸体凸轮轴孔内, 其材质主要有巴氏合金、铜基合金、铝基合金等^[1-4], 由于凸轮轴承受周期性冲击载荷, 要求凸轮轴衬套工作面应有较高的尺寸精度、较小的表面粗糙度、足够的刚度和较高的耐磨性^[5-6]。

轴承材料铝锡合金的耐摩擦、磨损性能非常重要, 为了提高发动机凸轮轴衬套使用寿命, 现有研究大多集中在改善材料表面性能、提高工件加工精度、优化制造及装配工艺等; 文献[7]采用单因素法分析了微造型间距、位错、深径比对铝锡合金摩擦、磨损性能的影响, 发现在边界润滑和完全润滑状态下, 平均摩擦系数和磨损量随凹坑间距、位错、深径比的增大先减小后增大; 文献[8]通过模型分析转子系统的运动轨迹, 并对轴承的折合动特性进行分析, 对比轴承线性轨迹及非线性轨迹, 分析了轴承转子系统的运动及振动, 提高了轴承加工精度; 文献[9]通过分析 V 型发动机箱体的结构及衬套的装配要求, 结合主要部件三维模型构建和有限元分析, 设计了凸轮轴衬套压装专用设备, 降低了工作人员的劳动强度, 提高了衬套装配精度和装配效率。

凸轮轴衬套与凸轮轴孔过盈配合较大, 预紧力或应力集中导致凸轮轴衬套内表面金相组织的薄弱部位(晶界)出现开裂现象^[10-11]。除了衬套开裂外, 合金层表面异常如白斑、合金层不均匀等也影响衬套表面粗糙度和精度, 降低衬套使用寿命^[12-13]。

本文中针对某柴油发动机部分凸轮轴衬套合金层内表面出现白斑的现象, 进行宏观、微观分析, 确定白斑产生原因, 有效解决白斑问题。

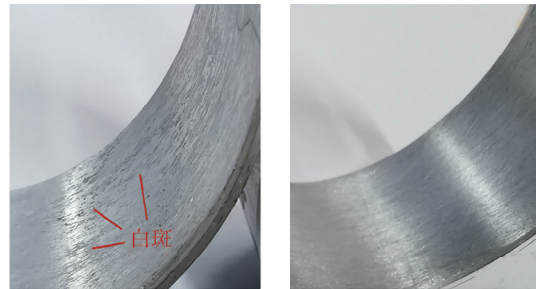
收稿日期: 2024-05-31

第一作者简介: 王恒(1990—), 男, 山东济宁人, 工程师, 工学硕士, 主要研究方向为金属材料失效分析及力学性能评估、特种焊接材料及焊接工艺开发, E-mail: wangheng@milestone-metal.cn。

1 试验方法

某柴油发动机凸轮轴衬套外表面为钢背,内表面为 AlSn6CuNi 低锡铝合金层,采用 2 000 目的砂纸打磨内表面后,在 45 °C 的清洗剂中浸泡 25 min,部分衬套合金层内表面出现大量白斑,浸泡使用的清洗剂成分含有单乙醇胺、三元酸、三乙醇胺、硅酸钠、聚丙烯酸钠等,有、无白斑合金层表面如图 1 所示。

结合白斑形成机理,从凸轮轴衬套表面形貌、成分、组织、硬度等方面进行分析,确定白斑产生位置、主要成分及形成原因。将有、无白斑衬套表面保护处理后进行线切割取样,利用型号 ZYGONexView 的三维白光干涉表面形貌仪分析合金层表面三维形貌;利用型号为 D/max-2500/PC 的 X 射线衍射仪(X-Ray diffractometer, XRD)分析合金层表面物相;利用型号为 S1 TITAN 600 的手持式荧光光谱仪分析合金层表面元素成分;利用型号为 TESCAN LYRA3 的聚焦离子束扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)分析合金层表面、截面的微观组织,利用能谱分析仪(energy dispersive spectrometer, EDS)分析有、无白斑合金层部分区域的成分强度。



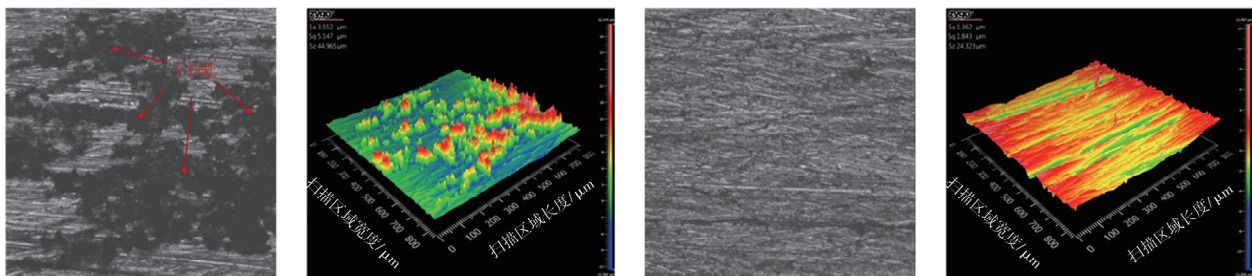
a) 有白斑合金层 b) 无白斑合金层

图 1 有、无白斑衬套合金层表面

2 合金层表面白斑成分

2.1 三维形貌

为确定白斑在合金层表面的附着状态,利用三维白光干涉表面形貌仪分析有、无白斑合金层表面三维形貌,结果如图 2 所示。



a) 有白斑 b) 白斑对应区域三维形貌 c) 无白斑 d) 无白斑对应区域三维形貌

图 2 有、无白斑合金层表面三维形貌

由图 2 可知:对比有、无白斑合金层表面三维形貌,白斑在合金层表面为浮凸,白斑附着高度大约为 30 μm ,表明白斑附着在合金层表面。

2.2 物相分析

利用 XRD 对有白斑、无白斑、白斑打磨后 3 种试样进行分析,确定白斑物相组分,3 种试样 XRD 测试结果如图 3 所示,图中的红、黑三角形分别为 $\alpha\text{-Al}$ 和 $\beta\text{-Sn}$ 相。

由图 3 可知:3 种试样合金层均主要由 $\alpha\text{-Al}$ 相和 $\beta\text{-Sn}$ 相组成,未检测到其他物相。分析原因为合金层试样表面不平整、带有一定弧度,可

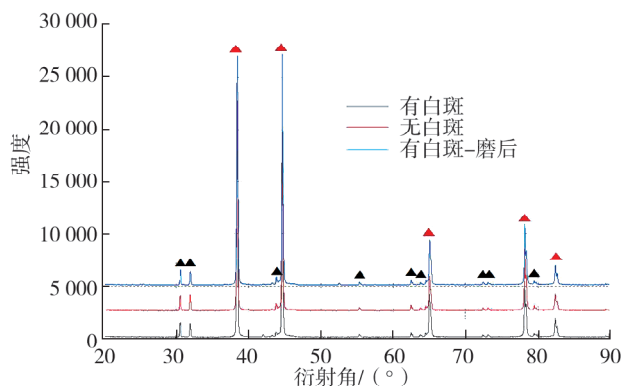


图 3 3 种试样 XRD 对比测试结果

能导致物相测试结果不准确,应采用其他方法确定物相成分。

2.3 元素分析

荧光光谱仪精度高、稳定性好,采用荧光光谱仪测试合金层表面宏观区域元素成分,取有白斑、无白斑、白斑打磨后3种试样(分别定义为样品1、2、3),每个试样上随机选取3点,测试每点对应的合金元素质量分数 w ,并以3点平均合金元素质量分数作为样品合金元素质量分数,测试3种试样合金层表面宏观区域元素质量分数如表1所示。

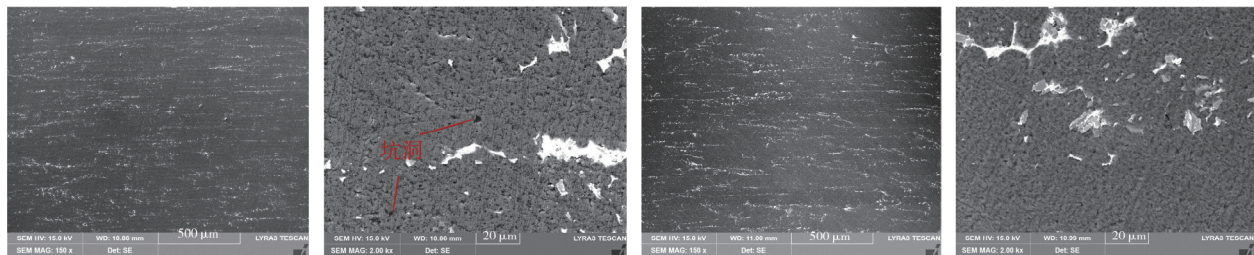
数据采集位置	$w(\text{Al})$	$w(\text{Sn})$	$w(\text{Cu})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{Fe})$	$w(\text{Si})$	
样品1	点1	82.20	8.29	2.73	2.26	0.52	2.98
	点2	82.85	8.02	2.64	2.20	0.51	2.77
	点3	85.29	7.18	2.57	2.07	0.48	1.38
	平均值	83.45	7.83	2.65	2.18	0.50	2.38
样品2	点1	88.02	6.32	2.42	1.97	0.44	0
	点2	88.53	6.19	2.26	1.87	0.41	0
	点3	87.51	6.64	2.44	2.03	0.42	0
	平均值	88.02	6.38	2.37	1.96	0.42	0
样品3	点1	89.60	5.38	2.17	1.79	0.44	0
	点2	89.31	5.51	2.17	1.79	0.43	0
	点3	88.99	5.84	2.25	1.82	0.43	0
	平均值	89.30	5.58	2.20	1.80	0.43	0

由表1可知:有白斑试样合金层中除含有与无白斑试样一致的Al、Sn、Cu、Ni、Fe等元素外,还有一定量的非合金层元素Si;将有白斑试样表面的白斑打磨干净后,未发现元素Si,证实了白斑的主要成分为Si;对比无白斑试样,白斑打磨后试样合金层中 $w(\text{Sn})$ 减小, $w(\text{Al})$ 增大。

3 合金层表面白斑成因

3.1 微观组织分析

为了分析合金层表面成分差异产生的原因,利用SEM分别对有、无白斑试样合金层表面微观组织放大150倍、2000倍,并对有、无白斑试样合金层截面微观组织局部放大,分析有、无白斑合金层表面、截面微观组织,结果如图4、5所示。



a) 有白斑放大150倍组织

b) 有白斑放大2000倍组织

c) 无白斑放大150倍组织

d) 无白斑放大2000倍组织

图4 合金层表面微观组织放大

由图4可知:有、无白斑合金层表面微观组织均为黑色基体中分布着一定方向的呈条状和岛状的浅灰色和亮白色相,分布方向可能与合金层轧制方向有关;有白斑合金层表面微观组织致密性较差,有更明

显的坑洞。

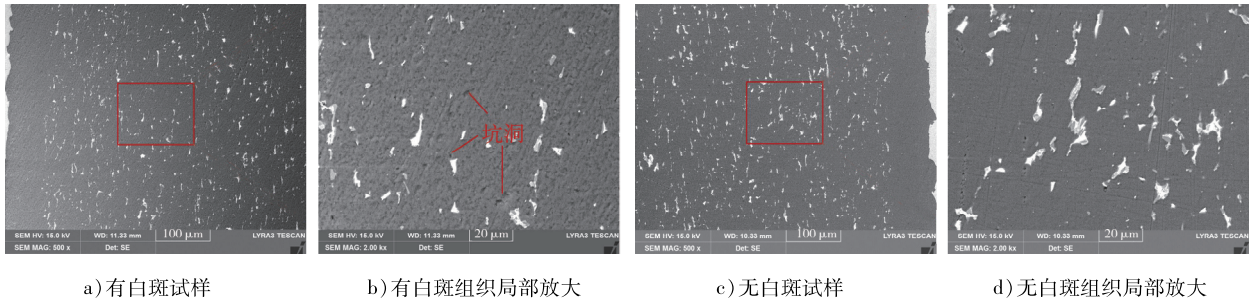


图5 合金层截面微观组织

由图5可知:有、无白斑合金层截面微观组织中均为黑色基体中分布着呈条状和岛状的浅灰色和亮白色相,与图4基本一致,但截面组织相均匀分布;有白斑合金层截面组织也存在较明显的坑洞,无白斑合金层组织致密、组织相分布相对密集。

3.2 成分分析

采用EDS,在有、无白斑合金层截面微观组织的黑色、亮白色、浅灰色、外表面分别取区域1、2、3、4,取样示意如图6所示,有、无白斑合金层截面各区域能谱分析结果如图7所示。

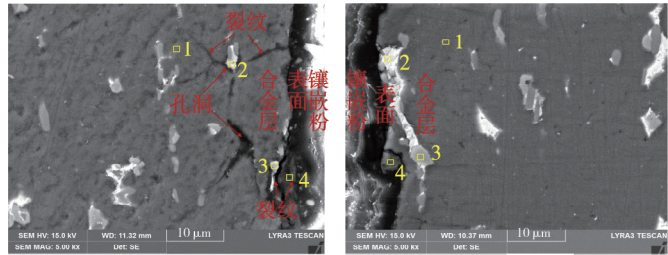


图6 有、无白斑合金层截面微观组织取样示意图

由图6可知:有白斑合金层靠近外表面的区域有微裂纹和孔洞,无白斑合金层靠近外表面区域未发现微裂纹和孔洞。由图7可知:有、无白斑合金层区域1主要元素为Al,区域2主要元素为Sn、Al,区域3主要元素为Al、Ni,主要元素的种类一致;有白斑区域2、3均有少量Si元素,无白斑区域2有极微量的Si元素;有白斑区域4除C、O、Al元素外,还有一定的Si、Ca、Na等元素,无白斑区域4主要元素为Al、C、O,未发现Si、Ca、Na等元素。

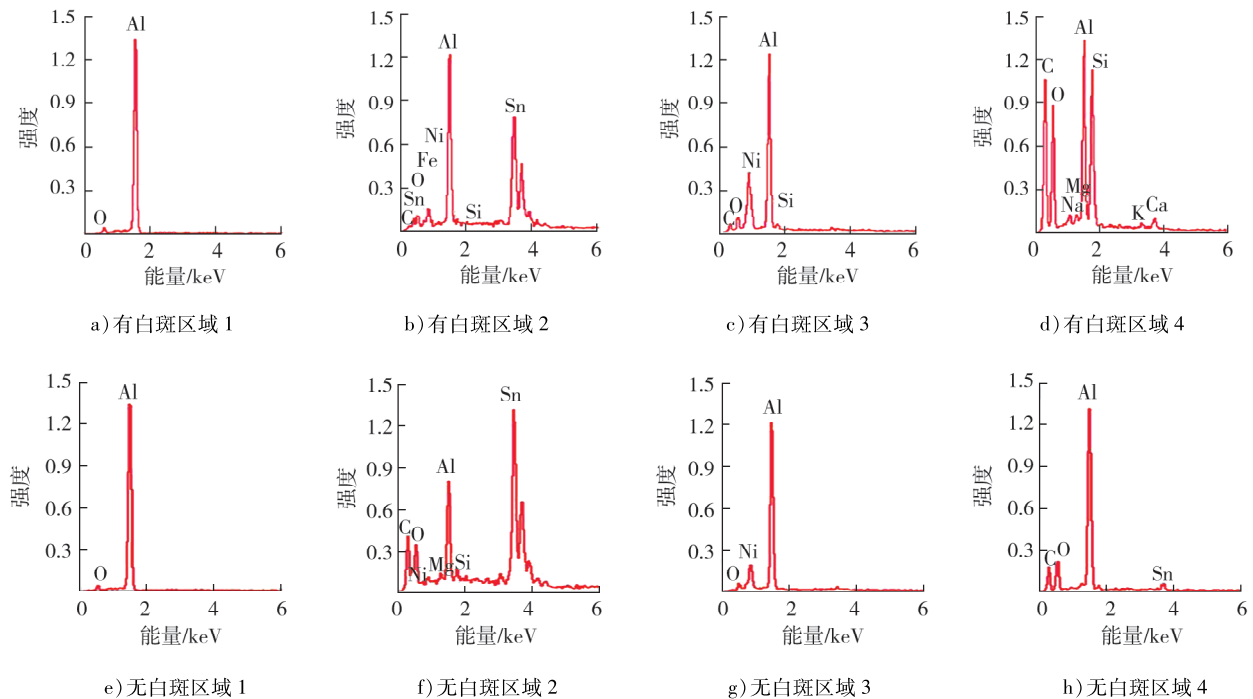


图7 有、无白斑合金层截面各区域能谱分析结果

经以上分析,白斑合金层靠近外表面区域出现微裂纹和孔洞,导致浸泡过程中清洗剂中的硅酸钠浸入,使合金层外表面形成白斑,合金层靠近外表面区域的微裂纹和孔洞是形成白斑的直接原因。

3.3 白斑形成原因

铝基轴瓦合金材料组织为硬基体上均匀分布着软质点,其显微组织由连续分布的金属基体和弥散分布的锡相组成,合金材料内部的微观缺陷如空位、孔洞、位错、晶界等导致性能降低^[14]。优化合金材料成分,可提高合金硬度,增强 Sn 相均匀分布,提高合金耐磨性能,但造成成分偏析、耐蚀性降低等^[15]。热处理工艺可使合金组织均匀化,形成细晶组织,起到弥散强化的作用,提高合金硬度,增强合金耐摩擦磨损性能。

研究表明铝锡合金轴瓦制造中,瓦带白点缺陷是在生产时再结晶退火过程中出现的,形成原因与最终退火温度有关,退火温度越高, β -Sn 相分布越均匀,平均晶粒尺寸增大,若退火温度大于 Sn 熔点,会出现锡汗现象^[16]。本文中同一批次合金衬套部分有白斑,且白斑合金衬套 $w(\text{Sn})$ 减小、 $w(\text{Al})$ 增大,分析原因可能为 Sn 熔点较低,为 231 °C, Al 熔点较高,为 660 °C,合金层轧制完热处理退火温度较高,部分 Sn 熔化流出, β -Sn 相重熔在 α -Al 晶粒周围,Sn 熔化流出使合金层外表面形成坑洞缺陷,引发表面微裂纹,使清洗剂附着在合金层表面,形成白斑。应严格按照生产工艺控制合金层退火温度,以获得良好的合金层组织性能。

4 结论

1)对凸轮轴衬套 AlSn6CuNi 合金层有、无白斑表面进行三维形貌、表面物相、合金成分、微观组织形态和区域成分等对比分析,发现白斑主要附着在合金层外表面或近外表面,附着物含有一定的 Si 元素,分析原因为浸泡过程中,清洗剂中的硅酸钠黏附在合金层表面,形成白斑。

2)白斑合金层中 Sn 元素质量分数降低、Al 元素质量分数增加,分析原因为轧制完热处理时退火温度较高,部分 Sn 熔化流出,在表面形成坑洞缺陷,该缺陷引发表面微裂纹,使清洗剂附着在合金层表面。

参考文献:

- [1] 夏绍彤,魏伟.缸体凸轮轴成品衬套压装工艺实践[J].装备制造技术,2018(7):100-102.
- [2] KOTADIA H R, DAS A, DOERNBERG E, et al. A comparative study of ternary Al-Sn-Cu immiscible alloys prepared by conventional casting and casting under high-intensity ultrasonic irradiation[J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 131: 241-249.
- [3] 王祺.铜铝合金轴瓦材料的连续浇铸工艺及组织性能研究[D].北京:北京有色金属研究总院,2020.
- [4] 曾美琴,鲁忠臣,陈进添,等.铝基滑动轴承合金的研究进展[J].机械工程材料,2018,42(6):7-14.
- [5] 高荣,陈永红.国产高性能 AlSn40-钢双金属轴瓦板材研制探讨[J].柴油机,2019,41(1):49-53.
- [6] SONG K Q, LU Z C, ZHU M, et al. A remarkable enhancement of mechanical and wear properties by creating a dual-scale structure in an Al-Sn-Si alloy[J]. Surface & Coating Technology, 2017, 325: 682-688.
- [7] 薛锋.激光冲击微造型改善铝锡轴承合金表面摩擦学性能研究[D].镇江:江苏科技大学,2020.
- [8] 于哲.可倾瓦轴承-刚性轴转子系统的运动分析及主动控制[D].济南:山东大学,2019.
- [9] 李洲.发动机箱体凸轮轴衬套压装专用设备的设计与研究[D].武汉:武汉理工大学,2013.
- [10] ANUSHA E, KUMAR A, SHARIFF S M. Diode laser surface treatment of bearing steel for improved sliding wear performance[J]. Journal for Light-and Electronoptic, 2020, 206: 1-15.
- [11] 韦炫辰,张方旭,唐红云,等.铝锡轴承合金的摩擦磨损机理与性能[J].广西科学,2018,25(6):639-644.
- [12] 段莉萍,唐家耘,齐子诚.某柴油机供油凸轮轴衬套开裂分析[C]//中国机械工程学会失效分析分会,中国机械工程学会理化检验分会.2015年全国失效分析学术会议论文集.北京:机械工业出版社,2015.
- [13] 冯继军,陶景光,周家文,等.铝锡合金轴瓦制造缺陷分析[J].汽车工艺与材料,2001(2):40-43.
- [14] 裴畅贵,白培康.凸轮轴制造工艺及国内外发展趋势[J].新技术新工艺,2009(3):35-39.
- [15] LUCCHETTA M C, SAPORITI F, AUDEBERT F. Improvement of surface properties of an Al-Sn-Cu plain bearing alloy

produced by rapid solidification[J]. *Journal of Alloys and Compounds: An Interdisciplinary Journal of Materials Science and Solid-state Chemistry and Physics*, 2019, 805: 709–717.

[16] 李宝营. 喷射成形 AlSn20Cu 合金靶材制备工艺与组织控制研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2021.

Analysis of the causes of white spots on the surface of alloy layer of engine camshaft bearing

WANG Heng¹, LI Yang¹, HU Zhiqin¹, WU Yun², ZHAO Yabin³, ZHOU Cong¹

1. Milestone Metal (Changzhou) Co., Ltd., Changzhou 213399, China;

2. Erzhong (Deyang) Heavy Equipment Co., Ltd., Deyang 618000, China;

3. Neway Valve(Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215004, China

Abstract: To address the issue of numerous white spots on the surface of the AlSn6CuNi alloy layer of a certain diesel engine camshaft bearing, a comprehensive analysis is conducted using white light interferometry, X-ray diffraction, X-ray fluorescence spectroscopy, scanning electron microscopy, and energy dispersive spectroscopy. The analysis focuses on the three-dimensional morphology, phase composition, alloy composition, microstructural characteristics, and elemental intensity of the alloy layer surface to determine the cause of the white spots. The results indicate that the white spots adhered to the surface of the alloy layer is primarily consisting of Si. Compare to the alloy without white spots, the Sn mass fraction in the alloy layer with white spots decrease, while the Al mass fraction increase. The surface and microstructure of the white spot alloy layer exhibit poor density and significant pitting. The outer surface of the white spot area contains certain elements such as Si, Ca, and Na. It is determined that the formation of the white spots are due to the high annealing temperature during heat treatment, which cause partial melting and leakage of Sn, resulting in pitting defects on the alloy layer surface and leading to micro-cracks. This allows sodium silicate from the cleaning agent to adhere to the surface during the soaking process. To achieve good organizational performance of the alloy layer, it is essential to strictly control the annealing temperature according to the production process.

Keywords: camshaft bearing; AlSn6CuNi alloy layer; white spot; heat treatment annealing temperature

(责任编辑: 胡晓燕)