选区激光熔覆钴基合金涂层修复高速列车损伤 制动盘的表面质量优化

王军鹏,宋飞,彭品皓,李德英,汪阿金,黎秋萍,赵火平

(华东交通大学材料科学与工程学院,江西南昌 330013)

摘要:为提高激光熔覆耐热耐磨涂层修复高速列车损伤制动盘的表面质量,本文通过选区激 光熔覆工艺在高速列车制动盘表面制备钴基合金涂层,研究激光旋转角度(0~90°)和激光扫 描间距(30~80 μm)对钴基合金涂层表面粗糙度和硬度的影响规律及其机理。当扫描间距在 50~80 μm之间,在不同激光旋转角度下涂层可获得较平整的宏观表面。当旋转角度不变,涂 层表面粗糙度随扫描间距的增大呈现减小趋势,当旋转角度为90°时,在扫描间距为70 μm时 获得最小粗糙度。当扫描间距不变,涂层硬度随旋转角度的增大先增大后减小,在旋转角度 为30°时硬度值最大。除0°以外,其他旋转角度在扫描间距为70 μm时获得最高硬度。旋转角 度和扫描间距的增大,改善了相邻层和熔道的搭接平整性,并且改变了组织中柱状晶和等轴 晶的比例,从而影响了涂层表面粗糙度和硬度。

关键词:激光熔覆; 钴基合金涂层; 制动盘; 表面质量

制动盘作为高速列车机械制动系统的核心组件之一,为高速列车的安全平稳运 行提供了重要保障^[1-2]。制动盘与制动闸片相互摩擦,把列车动能转化为热能耗散到 周围环境中,从而实现列车减速或停车。因我国高速铁路区域跨度大,列车运行工 况复杂(如高寒、高温、高湿、高盐、大风沙和长坡道等),加之高速列车制动过 程中制动盘温升较高,在复杂工况持续影响下导致制动盘出现过度磨损和热裂纹等 早期失效现象,这严重影响列车的安全运行^[3-5]。

针对早期失效的损伤制动盘,通常采用端面镟修工艺将损伤制动盘表面打磨修 复平整,以保证制动系统的稳定性,但通过镟修后的制动盘厚度减小,同等工况制 动摩擦热使制动盘温升更高,高温软化更严重,磨损和裂纹现象加剧,服役寿命显 著下降^[6]。这给列车的维护成本和效率带来了严峻挑战。研究人员尝试采用激光熔 覆技术制备耐磨涂层对损伤制动盘进行修复,以提高制动盘服役寿命。大量研究 表明^[7-10],采用钴基合金作为修复涂层材料,通过激光熔覆技术制备的钴基合金涂层 在常温和高温条件下的磨损量都显著小于制动盘。但激光熔覆工艺需要制动盘基体 进行预热,防止涂层因应力过大而开裂,且激光光斑大,熔道宽,使涂层表面较粗 糙,后续打磨抛光的加工余量大,降低了高成本钴基粉末的利用率。

基于粉末床的选区激光熔化工艺具有成形腔室,其基板温度、气氛、温度和湿 度都可控,且激光光斑小,涂层表面质量和性能有较好的一致性,能解决激光熔覆 工艺基板预热操作困难和涂层表面加工余量大等问题^[11-13]。选区激光熔化工艺影响涂 层表面质量的因素较多,在保证涂层无显著气孔和微裂纹的前提下,激光旋转角度 和扫描间距对涂层表面质量的影响较明显^[14-16]。因此,本文通过选区激光熔化工艺在 损伤制动盘表面制备钴基修复涂层,研究激光旋转角度和扫描间距对钴基合金涂层 组织和表面质量的影响及其机理,为高速列车损伤制动盘的修复提供技术和理论支 持。

作者简介: 王军鹏(2004-),男,本 科生,主要从事激光增材 制造技术相关研究。E-mail; 2630087959@qq.com 通信作者: 赵火平,男,博士,副教授。 E-mail: zhaohphust@126.

中图分类号:TG246 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2025) 05-0588-07

基金项目:

com

江西省自然科学基金项目 (20224BAB204049); 江西省教育厅科技项目 (GJJ2200602);大学生创 新训练项目(202410404009)。 收稿日期: 2024-11-29收到初稿, 2025-03-03收到修订稿。

1 试验方案

1.1 试验材料

在24CrNiMo高铁损伤制动盘中切割95 mm × 95 mm × 15 mm方块料作为基体材料,磨损表面通过机械加工

打磨平整,并用酒精进行超声冲洗后吹干待用。选用 中航新材有限公司制备的钴基合金球形粉末作为熔覆 材料,钴基粉末粒径为15~53 μm,其化学成分如表1所 示。

表1	钴基合金粉末的化:	学成分
Tab. 1 Chemical co	omposition of cobalt	-based alloy powder

w_B/%

Со	Cr	Мо	Mn	Si	Ni	С	Ν	
余量	27.00~30.00	5.00~7.00	≤1.00	≤1.00	≤0.50	≤0.35	≤0.25	

1.2 试样制备

采用EP-M150型选区激光熔覆设备在制动盘基体 表面制备钴基合金涂层,设备配备500 W光纤激光器, 光斑直径为50 μm,腔室最大成形尺寸为Φ150 mm × 80 mm,腔室环境为氩气。打印前,粉末进行2 h、120 ℃ 烘干处理,将基板安装到成形腔室,并将其加热到 100 ℃。根据前期预试验发现,当激光功率为150 W、 激光旋转角度67°(设备默认值)、扫描速度为 700 mm/s、层厚30 μm和扫描间距70 μm时能够制备出 无明显孔洞和微裂纹的钴基合金涂层。因此,本工作 通过改变激光旋转角度(0°、30°、67°、90°)和扫描 间距(30 μm、40 μm、50 μm、60 μm、70 μm、 80 μm),研究钴基合金涂层表面质量的变化。

1.3 分析测试

采用HNO₃+HCl+FeCl₃溶液对已抛光钴基合金涂层 试样进行腐蚀,通过Olympus BX51型光学显微镜进行 金相组织分析。采用HVS-1000Z型维氏硬度计对试样 表面进行显微硬度测试,加载载荷为300g,保载时间 为10s。通过岛津XRD-6100衍射仪对试样进行物相测 定,其靶材为Cu靶,对试样进行连续扫描的过程中, 设定测试电压为40kV,扫描角度为20°~100°,扫描速 度为5°/min。利用 Anton Paar,NHT3型纳米力学测试 系统测试涂层试样表面以及制动盘基体的硬度与弹性 模量,负载20mN,保载10s。通过ZeGageTM型光学 3D表面轮廓仪分析涂层三维形貌。通过SU8010型扫描 电镜(SEM)观察试样组织形貌,并通过电子能谱仪 (EDS)对元素进行分析。

2 试验结果分析

2.1 钴基合金涂层表面形貌

不同旋转角度和扫描间距参数下在同一基板制备 10 mm×10 mm×5 mm钴基合金涂层,其表面宏观形貌 如图1所示。当旋转角度为定值,随扫描间距增加,涂 层表面逐渐平整;而当扫描间距不变,随旋转角度的



图1 选区激光熔覆钴基合金涂层宏观形貌 Fig. 1 Macromorphology of selected laser cladding cobalt-based alloy coating

增加,涂层表面无显著变化规律。当扫描间距≤40 μm 时,不同旋转角度制备的涂层表面均有球化现象,这 是由于扫描间距较小时,提高了激光能量密度和搭接 率,使熔池温度升高,蒸气压增大^[17],液相失稳而金 属液滴飞溅,飞溅的液滴凝固后回落熔池表面,经逐 层堆积放大而形成表面球化现象。

为清晰表征不同旋转角度和扫描间距条件下选区 激光熔覆钴基合金涂层表面质量,通过光学3D表面轮 廓仪对涂层表面形貌和粗糙度进行了测量,结果如图2 所示。根据粗糙度数值可知,当旋转角度保持不变, 随扫描间距的增加,涂层表面粗糙度呈现减小趋势; 而当扫描间距在30~70 µm范围内为定值,随旋转角度 的增加,涂层表面粗糙度也呈现减小趋势,这是由于 较大的旋转角度使熔道堆积效果减弱。当旋转角度分 别为0°和30°时,在扫描间距为80 µm时获得最小粗糙 度,其值分别为8.858 µm和9.265 µm;当旋转角度分 别为67°和90°时,在扫描间距为70 µm时获得最小粗糙 度,其值分别为8.027 µm和6.793 µm。在旋转角度为0° 时,涂层表面有明显的熔道痕迹,这是由于激光扫描 角度没有发生变化,从首层逐层堆积放大所致;但随 590 病造 FOUNDRY 试验研究



图2 选区激光熔覆钴基合金涂层三维形貌 Fig. 2 Three-dimensional surface morphology of selected laser cladding cobalt-based alloy coating

着扫描间距的增加,使相邻熔道搭接率降低,熔道表 面轮廓变平整,其熔道痕迹逐渐淡化,粗糙度降低。

对不同旋转角度和扫描间距条件下选区激光熔覆 钴基合金涂层表面粗糙度进行统计,其结果如图3所 示。当扫描间距大于50 μm时,在不同旋转角度下的涂 层表面粗糙度值趋于稳定。而当扫描间距≤40 μm时, 涂层表面粗糙度较大。另由图1可知,扫描间距≤40 μm



图3 选区激光熔覆钴基合金涂层粗糙度极图 Fig. 3 Roughness pole diagram of selected laser cladding cobalt-based alloy coating

时,不同旋转角度下的涂层表面四周有明显翘曲,中 间有球化现象,结合涂层表面宏观形貌和表面粗糙度 值可知,扫描间距≤40 μm时,不适合制备高速列车损 伤制动盘的钻基修复涂层。

2.2 钴基合金涂层硬度与微观组织

因扫描间距≤40 μm的参数不适用,选取旋转角 度为0°~90°和扫描间距为50~80 μm的选区激光熔覆钴 基合金涂层进行硬度测试,其结果如图4所示。不同旋 转角度和扫描间距下制备的涂层硬度均高于HV 400, 而制动盘基体的硬度为HV370,涂层的硬度均高于制 动盘基体的硬度。在同一旋转角度下改变扫描间距, 其所对应的最高硬度并不在同一扫描间距,涂层硬度 值没有明显规律性变化。当旋转角度分别为0°、30°、 67°和90°时,获得最高硬度值时的扫描间距分别为 50 μm、70 μm、70 μm和70 μm,其所对应的硬度值分 别为HV456、HV470、HV467和HV462,除0°以外, 其他旋转角度在扫描间距为70 μm时获得最高硬度。当 扫描间距不变,涂层硬度随旋转角度的增大先增大后 减小,在旋转角度为30°时硬度值最大。因旋转角度为



图4 选区激光熔覆钴基合金涂层硬度 Fig. 4 The hardness of selected laser cladding cobalt-based alloy coating

低,且表面较粗糙,旋转角度为0°时不适合制备钴基合 金涂层。另外,扫描间距为80 µm时,不同旋转角度下

30° — 50µт

(a)旋转角度30°,扫描间距50 µm



(d)旋转角度30°,扫描间距60 µm



(g)旋转角度30°,扫描间距70 µm

67°—50μm <u>SU0010 15 0W 17 1mm x2 50k SE(UL)</u> 200um (b)旋转角度67°,扫描间距50 μm



(e)旋转角度67°,扫描间距60 µm



(h)旋转角度67°,扫描间距70 μm图5 选区激光熔覆钴基合金涂层显微组织

涂层硬度值也最低,综合考虑涂层表面质量,扫描间 距为80 μm也不适合制备钴基合金涂层。上述硬度值的 变化,可能是由于旋转角度和扫描间距的变化导致涂 层组织结构发生变化所致。

为研究不同旋转角度(30°、67°、90°)和扫描间 距(50 µm、60 µm、70 µm)对涂层硬度变化的影响机 理,首先对涂层组织结构进行了分析,其微观组织如 图5所示。不同参数下制备的钴基合金涂层中均无明显 孔洞和微裂纹,说明在旋转角度为30°~90°和扫描间距 为50~70 µm时可制备少空隙无裂纹的钴基合金涂层。 随旋转角度和扫描间距的递增或递减,激光熔覆工艺 形成的熔池大小和形态比较离散,熔池中以柱状晶和 等轴晶组织为主,但并无明显规律性变化。因旋转角 度和扫描间距的变化,激光熔覆过程中涉及相邻熔池 的重熔和凝固,使熔池热流传递变得极为复杂,导致 温度梯度*G*/凝固速率*R*比值发生非线性波动,从而使熔 池内部的晶粒生长方向和形态多样。在不同旋转角度



(c)旋转角度90°,扫描间距50 µm



(f)旋转角度90°,扫描间距60 μm





Fig. 5 The microstructure of selected laser cladding cobalt-based alloy coating



和扫描间距所形成的熔池中还可观察到柱状晶的外延 生长,其主要原因是相邻已凝固熔池还保持在较高温 度,温度梯度较小,其晶粒的生长在已凝固熔池中形 成的晶粒上长大,并最终形成柱状晶的外延生长。

通过image tool软件对不同参数下制备的钴基合金 涂层中的等轴晶面积进行了统计,其结果如图6所示。 在相同旋转角度下,涂层中的等轴晶组织面积随扫描 间距的增大先减小后增大,扫描间距为60 µm时获得 最小值。当扫描间距不变,随旋转角度的增大,涂层 中的等轴晶组织面积逐渐减小。等轴晶的形成依赖于 熔池前沿的成分过冷,而成分过冷的条件由温度梯度 G/凝固速率R比值决定。由于60 μm间距介于50 μm与 70 µm之间,可能存在临界搭接率,在熔池热流传递复 杂情况下,冷却速率发生了突变,使温度梯度与凝固 速率比值上升,成分过冷区缩小,等轴晶形核驱动力 下降,在此前提下,前一层部分重熔区的晶界被破坏 后,但新晶粒未充分生长,形成柱状晶与零星等轴晶 共存的过渡态组织[18-19]。另外,随旋转角度的增大,热 量分布趋于均匀,局部温度梯度G显著降低,抑制等轴 晶形核。另外,熔池的剧烈扰动还可能将枝晶碎片冲 离熔池前沿,减少有效形核位点,从而降低等轴晶比 例^[20]。



图6 选区激光熔覆钴基合金涂层等轴晶组织面积 Fig. 6 The area of equiaxed grain structure of selected laser cladding cobalt-based alloy coating

为进一步分析不同旋转角度和扫描间距获得的涂 层组织结构与硬度的关系,选取常规旋转角度67°时不 同扫描间距条件下制备的钴基合金涂层的等轴晶进行 纳米压痕硬度测试,其结果如图7所示。由图可知,不 同扫描间距下涂层组织中的等轴晶平均硬度都高于柱 状晶硬度,三种不同扫描间距获得的等轴晶硬度变化 不明显,结合图6中旋转角度67°时钴基合金涂层中的等 轴晶面积随扫面间距的增大先减小后增大,则其硬度 也应是随扫面间距的增大先减小后增大,对应了图4中



图7 旋转角度67°时钴基合金涂层等轴晶组织纳米压痕硬度 Fig. 7 Nanoindentation hardness of equiaxed crystal structure of cobalt-based alloy coating at rotation angle of 67°

旋转角度67°时涂层硬度的变化规律。

对扫描间距50 μm时不同旋转角度制备的钴基合金 涂层等轴晶进行了纳米压痕硬度测试,其结果如图8所 示,旋转角度由30°增加至90°时,其涂层组织中等轴晶 纳米压痕平均硬度略有下降趋势,因图6中随旋转角度 的增大,涂层中的等轴晶组织面积逐渐减小,则显微 硬度也表现为随旋转角度的增大而逐渐减小的趋势, 这与图4中扫描间距50 μm时不同旋转角度制备的涂层 硬度测试结果相对应。



 图8 扫描间距50 μm时钻基合金涂层等轴晶组织纳米压痕硬度
Fig. 8 Nanoindentation hardness of equiaxed crystal structure of cobalt-based alloy coating at hatch spacing for 50 μm

通过上述不同旋转角度和扫描间距的选区激光熔 覆钴基合金涂层表面质量、微观组织和硬度的测试分 析,当旋转角度分别为30°、67°和90°时,在扫描间距 为70 µm时的表面质量相对最好。通常,涂层具有优异 的表面质量且与基体结合良好是获得工程化应用的前 提,对扫描间距为70 µm时不同旋转角度的钴基合金涂 层与基体之间的元素分布进行了分析,其结果如图9所



Fig. 9 Element line scanning curve between of cobalt-based alloy coating and substrate at hatch spacing of 70 µm

示。因钴基合金中的Co和Cr元素含量较高,基体中的 Fe元素含量最高,由不同旋转角度条件下涂层与基体 元素分布曲线可知,Co和Cr元素在涂层中含量较高, 分布较均匀,而Fe元素含量在涂层中的含量趋于0。从 涂层过渡到基体, Co和Cr元素含量显著降低且在基体 中趋于稳定, Fe元素含量显著提高且在基体中达到最 高含量并趋于稳定。而Mo元素曲线变化不明显,这是 由于钴基合金粉末中Mo元素固有含量较低所致。Co、 Cr和Fe元素由涂层到基体发生显著变化的这一界面熔 合区,在不同旋转角度下的宽度并不一致,其随旋转 角度的增加而略微减小,即涂层和基体中元素相互扩 散的距离也减小。这是由于小的旋转角度使接近基体 的上下熔道的搭接率更大,其能量过渡累积对基体的 熔深较大,稀释率较高,表现为涂层与基体元素的扩 散范围更大,也更利于涂层与基体的界面冶金结合^[21-22]。 因随旋转角度的增加,基体的熔深减小,则从首层逐 层堆积放大至表面,随旋转角度的增加,涂层表面逐 渐变平整,这与图2中扫描间距为70 μm时不同旋转角 度下的涂层粗糙度变化规律相同。

时,选区激光熔覆钴基合金涂层的宏观表面较平整, 其粗糙度值随旋转角度和扫描间距的增大呈现减小趋势,在旋转角度为90°和扫描间距为70 µm时获得最小 表面粗糙度6.793 µm。

(2)当扫描间距为50~80 μm范围内,旋转角度由 0°逐渐增加至90°时,选区激光熔覆钴基合金涂层硬度 先增大后减小,在旋转角度为30°时获得最大硬度值; 旋转角度为0°时,钴基合金涂层硬度在扫描间距为50 μm 时获得最大值,其他旋转角度在扫描间距为70 μm时获 得最高硬度。

(3)旋转角度为0°时,不同扫描间距所制备的钴 基合金涂层硬度都较低,且表面较粗糙;另外,扫描 间距为80 μm时,不同旋转角度下涂层表面粗糙度虽然 较低,但在旋转角度为30°、67°和90°时的硬度值也最 低,综合考虑涂层表面质量,旋转角度为0°和扫描间距 为80 μm不适合制备钴基合金涂层。

(4)扫描间距的增大,减小了相邻熔道的搭接率,改善了熔道表面平整性,从而降低了表面粗糙度;而旋转角度和扫描间距的同时变化,改变了钴基合金涂层组织中等轴晶面积和硬度,从而影响了涂层硬度。

3 结论

(1) 在旋转角度为0°~90°, 扫描间距为50~80 µm

参考文献:

- KIM Y, SERGEY K, KIM H, et al. Residual stress development and thermo-elasto-plastic distortion in brake discs [J]. Tribology International, 2023, 190: 109056.
- [2] 项载毓,莫继良,朱松,等.高速列车制动界面摩擦自激振动抑制及能量收集[J].机械工程学报,2023,59(12):318-331.
- [3] LIU X, GAO P, CONG T, et al. Effects of thermal cracks on friction and wear properties of forged steel used in railway brake discs [J]. Wear, 2023, 520-521: 204650.
- [4] WANG Z, HAN J, DOMBLESKY J P, et al. Crack propagation and microstructural transformation on the friction surface of a high-speed railway brake disc [J]. Wear, 2019, 428–429: 45–54.
- [5] WU Y, LIU Y, CHEN H, et al. An investigation into the failure mechanism of severe abrasion of high-speed train brake discs on snowy days [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 101: 121–134.
- [6] 任德祥,陶功权,刘欢,等.机车多边形磨耗车轮镟修异常原因分析及改进措施 [J].中南大学学报(自然科学版),2019,50 (9):2317-2326.

- [7] MANOJ A, VERMA P C, NARALA S K R, et al. High-temperature tribological evaluation of cobalt-based laser cladded disc for automotive brake systems [J]. Ceramics International, 2024, 50 (24) : 54458–54472.
- [8] TANG G, HU H, HUANG Z, et al. Facile fabrication of Co-containing coating to enhance the wear resistance of 24CrNiMo steel at elevated temperature [J]. Wear, 2024, 554-555: 205484.
- [9] WU Y, ZOU G, LIU Y, et al. Temperature dependence of the tensile and thermal fatigue cracking properties of laser-deposited cobaltbased coatings for brake disc application [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 858: 144135.
- [10] 温飞娟,陶诗美,龙樟,等.工艺参数对24CrNiMo激光熔覆层组织及性能影响[J].应用激光,2023,43(8):18-31.
- [11] CUI X, ZHANG S, WANG Z Y, et al. Microstructure and fatigue behavior of 24CrNiMo low alloy steel prepared by selective laser melting [J]. Materials Science and Engineering A, 2022, 845: 143215.
- [12] ZHAO Y, WU Y, HU D, et al. Study of microstructure and mechanical properties and residual stresses of 24CrNiMo steel prepared by selective laser melting and laser melting deposition [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 4764–4777.
- [13] 杨晨,董志宏,迟长泰,等.选区激光熔化成形24CrNiMo合金钢的组织结构与力学性能[J].中国激光,2020,47(5):389-399.
- [14] FENG B, WANG C, ZHANG Q, et al. Effect of laser hatch spacing on the pore defects, phase transformation and properties of selective laser melting fabricated NiTi shape memory alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 840: 142965.
- [15] NONG X D, ZHOU X L. Effect of scanning strategy on the microstructure, texture, and mechanical properties of 15-5PH stainless steel processed by selective laser melting [J]. Materials Characterization, 2021, 174: 111012.
- [16] THIJS L, VERHAEGHE F, CRAEGHS T, et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V [J]. Acta Materialia, 2010, 58 (9): 3303–3312.
- [17] 吕源,李涛,刘捷,等.选区激光熔化成形高氮不锈钢组织与力学性能研究 [J]. 中国激光,2022,49(22):220201.
- [18] 王彦芳,赵晓宇,陆文俊,等.抽油杆接箍表面高速激光熔覆不锈钢涂层的组织与性能 [J].中国激光,2021,48(6):175-184.
- [19] 杨恬恬,闫岸如,王燕灵,等.K640高温合金选区激光熔化成形工艺及性能研究[J].应用激光,2016,36(1):1-8.
- [20] 闫晓玲,董世运,徐滨士,等.Fe901合金粉末激光熔覆层组织分布于缺陷产生机理分析 [J].制造技术与机床,2013 (12):115-118.
- [21] 段成红,池瀚林,罗翔鹏,等.激光熔化沉积稀释率对重熔行为与致密度的影响[J].材料导报,2023,37(6):21090124.
- [22] 裴明源,王磊,赵京涛,等.稀释率对激光熔覆层组织与硬度的影响[J].模具工业,2024,50(10):69-76.

Optimization of Surface Quality for Co-Based Alloy Coatings Repaired on High-Speed Train Brake Discs by Selective Laser Cladding

WANG Jun-peng, SONG Fei, PENG Pin-hao, LI De-ying, WANG A-jin, LI Qiu-ping, ZHAO Huo-ping (School of Materials Science and Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract:

To improve the surface quality of laser cladding thermal-resistant and wear-resistant coatings for repairing high-speed train damaged brake discs, this paper investigates the selective laser cladding process to prepare cobalt-based alloy coatings on the surface of high-speed train brake discs. The study examines the influence of laser rotation angle $(0-90^{\circ})$ and laser scanning pitch (30-80 µm) on the surface roughness and hardness of cobalt-based alloy coatings, as well as the underlying mechanisms. When the scanning pitch is between 50-80 µm, the coatings can achieve a relatively smooth macro surface under different laser rotation angles. When the rotation angle remains constant, the surface roughness of the coating decreases with an increase in the scanning pitch. When the rotation angle is 90°, the minimum roughness is obtained at a scanning pitch of 70 µm. When the scanning pitch is constant, the hardness of the coating first increases and then decreases with an increase in the rotation angle, reaching the maximum value at a rotation angle of 30°. For all rotational angles except 0°, the maximum hardness was attained at a scanning pitch of 70 µm. The increase in both rotation angle and scanning pitch improves the flatness of adjacent layers and molten tracks, and alters the proportions of columnar and equiaxed grains in the microstructure, thereby affecting the surface roughness and hardness of the coatings.

Key words:

laser cladding; Co-based alloy; coating; brake disc; surface quality