УДК 621.373.826

Дин Кай Цзянь

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОСРЕДСТВОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Аннотация: автором установлены оптимальные режимы селективного лазерного плавления для изготовления деталей из жаропрочного порошкового материала на отечественной установке ПТК-ПС. Исследован фазовый состав и определены физико-механические свойства образцов, изготовленных по оптимальным режимам селективного лазерного плавления.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, сплавы на основе кобальта.

Ding Kai Jian

THE STUDY MODIFICATION PROCESSES OF THE SURFACE LAYER AND FABRICATION OF THREE-DIMENSIONAL MACHINE PARTS BY SELECTIVE LASER MELTING

Abstract: the SLM-process has been optimized for manufacturing of parts from Co-base alloy powder on the machine $\Pi TK - \Pi C$. The XRD analysis is researched and physic-mechanical properties of the samples made on optimum parameters of selective laser melting are defined.

Keywords: selective laser melting, co-based alloys.

Селективное лазерное плавление (СЛП) – это новаторская и уникальная технология прямого изготовления трехмерных объектов с определенными механическими свойствами из металлических порошков. При СЛП происходит последовательное послойное расплавление порошкового металлического материала с помощью лазерного излучения [1].

Технология обеспечивает изготовление сложных по форме и структуре деталей с высокой точностью в полном соответствии с техническими требованиями к изделию и механическим свойствам. Метод СЛП обладает высоким потенциалом для применения в машиностроении,так как обеспечивает возможность:

– получения сложнопрофильных и уникальных деталей без применения
5-координатных станков и дорогостоящей оснастки;

– управления физико-механическими свойствами создаваемого изделия. Метод СЛП подразумевает большую номенклатуру используемых порошковых материалов от пластика и керамики до практически любых видов сталей и сплавов.

Одними из перспективных являются жаропрочные сплавы на основе кобальта. Кобальтовые сплавы достаточно часто используют в качестве жаропрочных, коррозионно-стойких и износостойких сплавов, работающих при высоких температурах в агрессивных средах.

Цель настоящей работы – изучение возможности изготовления сложнопрофильных деталей из жаропрочных кобальтовых сплавов методом СЛП.

Методика проведения исследований

В качестве исходного материала для изготовления опытных образцов и деталей был выбран порошок на основе жаропрочного сплава CoCrMo, полученный газовой атомизацией (табл. 1).

Таблица 1

Со	Cr	Мо	Si, Mn	Fe	С	Ni
6065	2630	57	Менее 1	Менее 0.75	Менее 0.16	Менее 0.10

Химический состав порошка на основе сплава CoCrMo, %

Гранулометрический состав исследуемого порошка определяли при помощи микроскопа «ОССНІО 500nano» фирмы «ОССНІО» S. A. (Бельгия) со встроенным программным обеспечением Callisto для статистической обработки данных.

Химический состав порошка был исследован при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) «VEGA 3 LM» фирмы «Tescan» (Чехия) со встроенным энергодисперсионным анализатором «EDX».

Поиск оптимальных параметров СЛП (мощность лазерного излучения, защитная атмосфера, толщина порошкового слоя, скорость сканирования, диаметр пятна лазера, расстояние между соседними векторами, тип стратегии сканирования), изготовление опытных образцов и деталей осуществлялось на отечественной установке ПТК-ПС (рис. 1).

3



б)

Рис. 1. Установка ПТК-ПС: внешний вид (а), герметичная камера (б)

Установка оснащена иттербиевым волоконным лазером ЛК-200 (производитель ООО НТО «ИРЭПолюс») с максимальной выходной мощностью 200 Вт, длиной волны 1070 нм, возможностью непрерывного режима работы, и трехосевым сканатором «FOCUSSHIFTER» (фирмы «RAYLISE»), позволяющим варьировать скорость сканирования лазерным изучением (далее скорость сканирования) от 0 до 7 м/с. Диаметр пятна лазера в установке составляет 150 мкм. Установка ПТК-ПС имеет возможность создания защитной атмосферы (аргонной, азотной и др.) и нагрева рабочего пространства до температуры 100 °С. Для достижения точности линейных размеров изготовленных деталей ±50 мкм, толщина порошкового слоя составляла 50 мкм [2; 11].

При изготовлении опытных образцов и деталей применялась «двухзонная» стратегия сканирования лазерным излучением [3], так как она обеспечивает оптимальные механические свойства. Расстояние между соседними проходами лазерных векторов (или треков) составляло 100 мкм. Селективное лазерное плавление проводили в защитной атмосфере азота.

Качество сформированных треков, а также микроструктура опытных образцов анализировались при помощи оптического микроскопа «Olimpys BX51» (Япония).

Рентгеноструктурный фазовый анализ (РФА) проводили на рентгеновском аппарате для структурного анализа «ALT X'TRA» (фирма «Thermo-Fisher Scientific», Швейцария).

Шероховатость поверхностей опытных образцов измеряли на профилографе-профилометре «HOMMELTESTER T800» (Германия), твердость – по стандартной методике на автоматическом твердомере «ERCOTEST DIGI 25RS».

Изучение механических свойств – предела прочности на растяжение, предела текучести, относительного удлинения – проводилось согласно ГОСТ 1497-84 на испытательной машине «MTS Insight 100» (фирма «MTS Systems Corporation», США). Ударную вязкость измеряли согласно ГОСТ 4647-80 на испытательной машине «Walter and Bai PH 50» (Швейцария).

Результаты исследований и их обсуждение

Исследование порошкового материала.

По результатам гранулометрического анализа построены интегральная и дифференциальная (гистограмма) кривые распределения частиц порошка CoCrMo по размерам (рис. 2). Каждая точка на кривой соответствует сумме фракций меньше определенного диаметра. Гистограмма распределения частиц порошка показывает процентное содержание частиц данного размера. Для исследуемого порошка распределение частиц по размерам соответствует нормальному закону. На графике также приведены основные параметры фракционного состава: объемная доля частиц размером меньше d5 не превышает 5%, d95 – 95%, а медиана d50 представляет собой такой размер частиц, при котором интегральная кривая распределения принимает значение 50%. Средний размер частиц dcp определен как математическое ожидание дифференциальной кривой распределения. Установлено, что средний размер частиц порошка CoCrMo составляет dcp = 30,5 мкм.



6 https://interactive-plus.ru

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (СС-ВУ 4.0)

Рис. 2. Интегральная кривая и гистограмма распределения частиц порошка CoCrMo

Частицы порошка обладают высоким показателем сферичности (среднее значение 67,1%) и низким значением неровности (среднее значение 2,4%), что необходимо для нанесения равномерного и однородного слоя [4].

На рис. 3 показан снимок поверхности частиц порошка, полученный при помощи сканирующего микроскопа. По полученному изображению можно судить о морфологии отдельных гранул. Частицы порошка имеют глобулярную форму.



Рис. 3. Морфология поверхности частиц порошка CoCrMo (×1200)

Химический анализ частиц показал, что состав порошка соответствует заявленному (см. табл. 1).

Выбор оптимальных параметров селективного лазерного плавления.

Для достижения максимальной производительности мощность лазерного излучения устанавливали 200 Вт, скорость сканирования варьировалась от 150 до 550 мм/с. В результате экспериментального подбора было установлено оптимальной значение – 400 мм/с (рис. 4). Длина отдельных треков составляла 15 мм.



Рис. 4. Внешний вид сформированных треков (а),

поперечное сечение треков стабильной зоны (б)

На рис. 4а видно, что стабильные треки формируются при скоростях сканирования 380...410 мм/с, однако лучшим сцеплением с подложкой (в качестве материала подложки использовалась сталь 12Х18Н10Т) обладает трек, сформированный со скоростью 400 мм/с (рис. 4б) [5]. Таким образом, выбираем параметры:

- режим работы лазера «Непрерывный»;

– длина волны, нм 1070;

– мощность, Вт 200;

- защитная атмосфера Азот;

- толщина порошкового слоя, мкм 50;

- скорость сканирования, мм/с 400;

– диаметр пятна лазера, мкм 150;

– расстояние между соседними векторами, мкм 100;

- тип стратегии сканирования «Двухзонная».

Исследование опытных образцов и изготовление деталей. По оптимальным параметрам были изготовлены опытные образцы, детали и проведен ряд исследований. Значения точности линейных размеров, шероховатости поверхности, плотности опытных образцов составили:

– точность линейных размеров, мкм \pm 60;

- шероховатость поверхности Ra, мкм 6...10;

- плотность, г/см³ 8,3.

Следует отметить, что плотность сплава КХС-«Д» (российского аналога порошка CoCrMo) после литья составляет 8,4 г/см³, что практически идентично плотности опытных образцов.

Опытные образцы обладают плотной структурой (рис. 5), поры и пустоты практически отсутствуют, что подтверждает правильность выбора оптимальных параметров СЛП для установки ПТК-ПС.



Рис. 5. Микроструктура опытных образцов, увеличение ×100

Рентгеноструктурный фазовый анализ показал, что структура образцов, изготовленных СЛП, состоит из пересыщенного твердого раствора на основе гексагональной низкотемпературной (α-Со) и кубической высокотемпературной (β-Со) модификаций кобальта. Равновесная структура литого сплава КХС-«Д» представляет собой твердый раствор на основе гексагональной низкотемпературной (α-Со) модификации кобальта. Наличие в образцах, полученных СЛП, кубической высокотемпературной (β-Со) модификации объясняется легированием кобальта одновременно хромом и молибденом в условиях быстрого охлаждения.

Результаты сравнительных механических испытаний приведены в табл. 2. Анализ полученных данных показывает, что механические характеристики опытных образцов гораздо выше, чем у литого сплавааналога, что характерно для сплавов, полученных в результате лазерной обработки с оплавлением поверхности [6–9].

Таблица 2

Механические характеристики образцов, полученных СЛП на установке ПТК-ПС, и литого сплава КХС-«Д»

Метод	Предел текучести о _{0.2} , МПа	Предел прочност и о _в , МПа	Относительное удлинение б, %	Ударная вязкость КСU, Дж/см ²	Твердость, HRC
СЛП	1050 ± 150	1300 ± 150	Не менее 6	21±1	3846
Литье	600±50	850±50	Не менее 7.5		3236

На рис. 6 изображены детали, изготовленные методом СЛП на установке ПТК-ПС. Вставка (рис. 6а) может использоваться в конструкции экспериментального роторного волнового криогенератора, описанного в работе [10].



Рис. 6. Детали, полученные на установке ПТК-ПС: вставка (а), экспериментальная лопатка с сетчатой структурой (б), турбина (в) *Выводы*

1. Порошок на основе сплава CoCrMo удовлетворяет требованиям, предъявляемым к материалам, используемым для селективного лазерного плавления, так как обладает хорошей сыпучестью (среднее значение сферичности равно 67,1%, среднее значение неровности 2,4%) и обеспечивает возможность получения слоев толщиной 0,05 мм (размеры частиц варьируются от 14,5 до 45,9 мкм, средний размер составляет 30,5 мкм).

2. Определены оптимальные режимы СЛП для порошка на основе сплава CoCrMo для отечественной установки ПТК-ПС: режим работы лазера – непрерывный, длина волны – 1070 нм, мощность – 200 Вт, защитная атмосфера – азотная, толщина порошкового слоя – 50 мкм, скорость сканирования – 400 мм/с, диаметр пятна лазера – 150 мкм, расстояние между соседними векторами – 100 мкм, стратегия сканирования – «двухзонная».

3. Выявлены механизмы формирования структуры исследуемого сплава, характерные для СЛП. При высоких скоростях охлаждения образуется неравновесная структура, состоящая из пересыщенного твердого раствора на основе двух модификаций кобальта: гексагональной низкотемпературной (α-Co) и кубической высокотемпературной (β-Co).

4. Определены точностные и физико-механические свойства образцов исследуемого сплава, изготовленных по оптимальным режимам СЛП: точность линейных размеров ±60 мкм, шероховатость поверхности Ra 6...10 мкм, плотность 8,3 г/см³, предел текучести $\sigma_{0,2} = (1050\pm150)$ МПа, предел прочности $\sigma_{\rm B} =$ (1300±150) МПа, относительное удлинение δ не менее 6%, ударная вязкость KCU (21±1) Дж/см², твердость HRC 38...46.

5. Показано, что механические характеристики образцов, полученных СЛП, не уступают, а иногда и превышают (по прочности и твердости) механические характеристики образцов, полученных традиционными методами формообразования.

Список литературы

 Шишковский И.В. Лазерный синтез функциональноградиентных мезоструктур и объемных изделий / И.В. Шишковский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 424 с.

 Григорьев С.Н. Решение задач технологического перевооружения машиностроения / С.Н. Григорьев // ИТО: Инструмент, технология, оборудование. – 2008. – №10. – С. 14–19. Волосова М.А. Пути оптимизации процесса селективного лазерного плавления при помощи выбора стратегии обработки лазерным лучом / М.А. Волосова, А.А. Окунькова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. №4 (2). – С. 587–591.

4. Григорьев С.Н. Микролазерная наплавка сплавов системы Al-Si /
С.Н. Григорьев, Т.В. Тарасова, Г.О. Гвоздева // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – №5. – С. 16–21.

5. Тарасова Т.В. Исследование процесса селективного лазерного плавления жаропрочных кобальтовых сплавов / Т.В. Тарасова, А.П. Назаров // Доклад на международном симпозиуме «Фундаментальные основы лазерных микро- и нанотехнологий» (FLAMN13); Санкт-Петербург; 24–28 июня, 2013.

6. Григорьев С.Н. Микро- и наноструктурные особенности Au-Ni сплавов, полученных на никеле при различных режимах импульсного лазерного легирования / С.Н. Григорьев, В.Ю. Фоминский, А.В. Гусаров // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – №1. – С. 34–40.

7. Григорьев С.Н. Зависимость механических и трибологических свойств алмазоподобных углеродных покрытий от режимов лазерного осаждения и легирования металлами / С.Н. Григорьев, Р.И. Романов, В.Ю. Фоминский // Трение и износ. – 2012. – Т. 33. №4. – С. 342–350.

8. Fominskii V.Y. Effect of the pulsed laser deposition conditions on the tribological properties of thin-film nanostructured coatings based on molybdenum diselenide and carbon / V.Y. Fominskii, R.I. Romanov, S.N. Grigoriev // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. – 2012. – T. 57. No. 4. – P. 516–523. 9. Тарасова Т.В. Перспективы использования лазерного излучения для повышения износостойкости коррозионностойких сталей / Т.В. Тарасова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2010. – №6. – С. 54–58.

10. Архаров А.М. Анализ рабочих процессов в роторном волновом криогенераторе / А.М. Архаров, В.Ю. Семенов, А.И. Савицкий // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. – №7. – С. 15–20.

11. Сапрыкин А.А. Повышение производительности процесса селективного лазерного спекания при изготовлении прототипов // Диссертация канд. техн. наук: 05.03.01, 05.16.01 / А.А. Сапрыкин. – Юрга, 2006. – 161 с. – РГБ ОД, 61:07–-5/317.

12. Тарасова Т. Исследование процесса селективного лазерного плавления жаропрочных кобальтовых сплавов / Т. Тарасова, А. Назаров [Электронный реcypc]. – Режим доступа: https://www.stankoinstrument.su/journal/article/5000 (дата обращения: 31.03.2023).

Дин Кай Цзянь – канд. техн. наук, профессор Технологического университета Китая, Китайская Народная Республика.

Ding Kai Jian – Candidate of Technical Sciences, Professor, Technological University of China. People's Republic of China.