



Ключевые слова:
селективное лазерное плавление, сплавы на основе кобальта

Keywords:
selective laser melting Co-based alloys

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ КОБАЛЬТОВЫХ СПЛАВОВ

Татьяна ТАРАСОВА, Алексей НАЗАРОВ

В статье рассказывается о новейшей технологии изготовления сложных по форме и структуре деталей с высокой точностью в полном соответствии с техническими требованиями к изделию и механическими свойствами, как были установлены оптимальные режимы селективного лазерного плавления для изготовления деталей из жаропрочного порошкового материала на отечественной установке ПТК-ПС, а также исследован фазовый состав и определены физико-механические свойства образцов, изготовленных по оптимальным режимам селективного лазерного плавления.

The article tells about the latest technology for manufacturing of complex shape and structure of parts with high accuracy in full compliance with the technical requirements of the product and mechanical properties, how the SLM-process has been optimized for manufacturing of parts from Co-base alloy powder on the machine ПТК-ПС (Russia) and the XRD analysis is researched and physic-mechanical properties of the samples made on optimum parameters of selective laser melting are defined.

Селективное лазерное плавление (СЛП) — это новаторская и уникальная технология прямого изготовления трехмерных объектов с определенными механическими свойствами из металлических порошков. При селективном лазерном плавлении 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 механическими свойствами.

Метод СЛП подразумевает большую номенклатуру используемых порошковых материалов от пластика и керамики до практически любых видов сталей и сплавов. Одними из перспективных сплавов являются жаропрочные сплавы на основе кобальта. Кобальтовые сплавы достаточно часто используют в качестве жаропрочных, коррозион-

нстойких и износостойких сплавов, работающих при высоких температурах в агрессивных средах. Изделия, полученные СЛП из порошкового материала на основе кобальтовых сплавов, обладают высоким потенциалом для применения в машиностроении [2], поскольку объединяют в себе уникальные возможности метода СЛП и физико-механические свойства кобальтовых сплавов. А именно:

- возможность получения сложнопрофильных и уникальных деталей без применения пятикоординатных станков и дорогостоящей оснастки;
- возможность управления физико-механическими свойствами создаваемого изделия.

Для изучения возможности изготовления сложнопрофильных деталей из жаропрочных кобальтовых сплавов методом селективного лазерного плавления было проведено исследование в лаборатории технологического полигона Государственного инженерингового центра ФГБОУ ВО «МГТУ

«СТАНКИН». В качестве исходного материала для изготовления опытных образцов и деталей был выбран порошок на основе жаропрочного сплава CoCrMo, полученный газовой атомизацией. Химический состав порошка приведен в *табл. 1*.

Таблица 1. Химический состав порошка на основе сплава CoCrMo

Химический элемент	Co	Cr	Mo	Si, Mn	Fe	C	Ni
Порошок CoCrMo	60–65	26–30	5–7	менее 1	менее 0,75	менее 0,16	менее 0,10

Гранулометрический состав исследуемого порошка определяли при помощи микроскопа *OSCHIO 500 nano* фирмы *Oschio S. A.* (Бельгия) со встроенным программным обеспечением для статистической обработки данных.

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

Поиск оптимальных параметров селективного лазерного плавления (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*).

Установка оснащена иттербиевым волоконным лазером ЛК-200 (производитель ООО НТО «ИРЭ-Полус») с максимальной выходной мощностью 200 Вт, длиной волны 1070 нм, возможностью непрерывного режима работы. Установка ПТК-ПС оснащена трехосевым сканатором, позволяющим

варьировать скорость сканирования лазерным излучением (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°C. С целью достижения точности линейных размеров ±50 мкм для изготовленных деталей, толщина порошкового слоя составляла 50 мкм [2].

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 анализировалась при помощи оптического микроскопа *Olimpys BX51* (Япония). Рентгеноструктурный фазовый анализ (РФА) проводили на рентгеновском аппарате для структурного анализа *ARL X'TRA* фирмы *Thermo Fisher Scientific* (Швейцария). Измерение шероховатости поверхностей опытных образцов проводили на профилографе-профилометре *HOMMEL-TESTER T800* (Германия). Измерение твердости опытных образцов проводили по стандартной методике на автоматическом твердометре *ERCOTEST DIGI 25 RS* фирмы *LTF S.p.A.* (Италия). Изучение механических свойств – предел прочности на растяжение, предел текучести, относительное удлинение – проводилось согласно ГОСТ 1497-84 на испытательной машине *MTS Insight 100* от *MTS Systems Corporation* (США). Ударная вязкость измерялась согласно ГОСТ 4647-80 на испытательной машине *Walter+Bai AG PH-50* (Швейцария).

По результатам гранулометрического анализа построена интегральная и дифференциальная

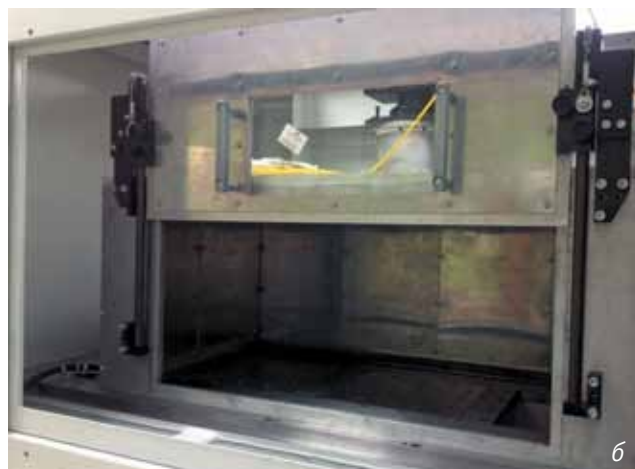


Рис. 1. Установка ПТК-ПС: внешний вид (а), герметичная камера (б)

(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 d_5 не превышает 5%, d_{95} — 95%, а медиана d_{50} представляет собой такой размер частиц, при котором интегральная кривая распределения частиц по размерам достигает значения 50%. Средний размер частиц $d_{\text{сред}}$ определен как математическое ожидание дифференциальной кривой распределения частиц по размерам. Установлено, что средний размер частиц порошка CoCrMo составляет $d_{\text{сред}} = 30,5$ мкм.

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

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

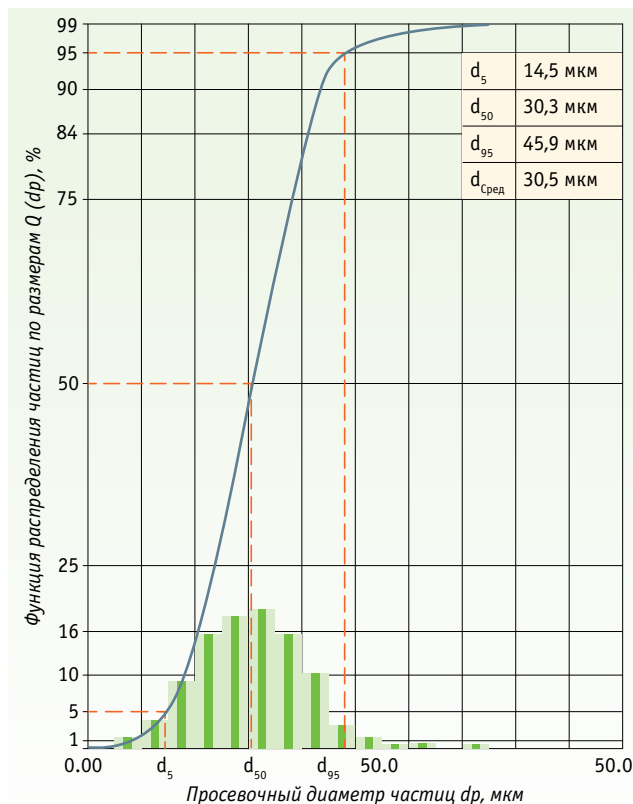


Рис. 2. Интегральная кривая и гистограмма распределения частиц порошка CoCrMo

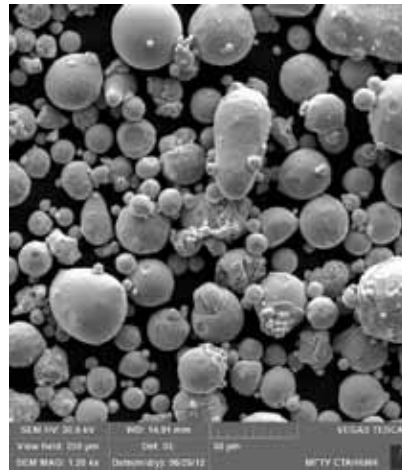


Рис. 3. Морфология поверхности частицы порошка CoCrMo (x1200)

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

Для достижения максимальной производительности мощность лазерного излучения устанавливали 200 Вт. В результате экспериментального подбора оптимальной скорости сканирования было установлено значение 400 мм/с (рис. 4). Скорость сканирования варьировалась от 150 до 550 мм/с. Длина отдельных треков составляла 20 мм.

На рис. 4, а видно, что стабильные треки формируются при скоростях сканирования 380–410 мм/с, однако наиболее лучшим сцеплением с подложкой (в качестве материала подложки использовалась сталь 12Х18Н10Т) обладает трек, сформированный со скоростью 400 мм/с (рис. 4, б) [5]. Таким образом, выбираем параметры, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Оптимальные параметры для изготовления деталей методом СЛП на установке ПТК-ПС

Режим работы лазера / Длина волны, нм / Мощность, Вт	Защитная атмосфера	Толщина порошкового слоя, мкм	Скорость сканирования, мм/с	Диаметр пятна лазера, мкм	Расстояние между соседними векторами, мкм	Тип стратегии сканирования
Непрерывный / 1070 / 200	Азот	50	400	150	100	«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 приведены в табл. 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 (табл. 3).

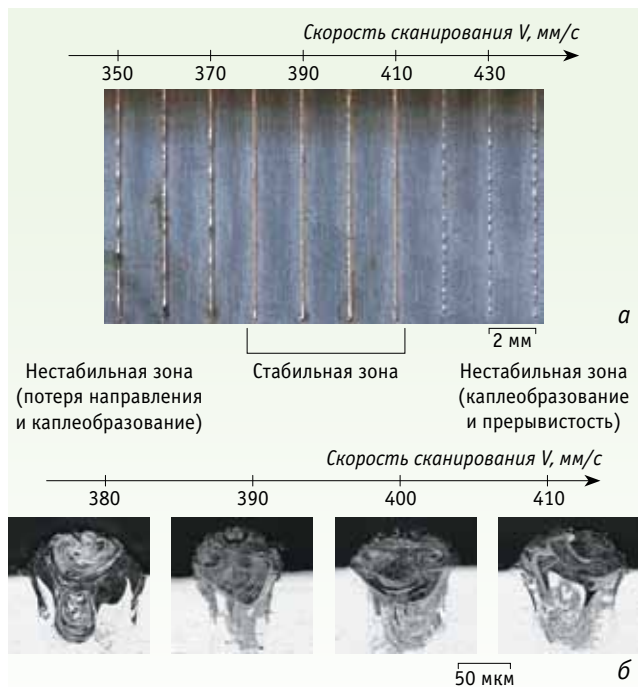


Рис. 4. Внешний вид сформированных треков (а), поперечное сечение треков стабильной зоны (б). Мощность лазерного излучения P = 200 Вт

Таблица 3. Точность линейных размеров, шероховатость поверхности, плотность опытных образцов

Точность линейных размеров, мкм	Шероховатость поверхности Ra, мкм	Плотность, г/см ³
± 60	6–10	8,3

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

Рентгеноструктурный фазовый анализ показал, что структура образцов, изготовленных селективным лазерным плавлением, состоит из пересыщенного твердого раствора на основе гексагональной низкотемпературной (α-Co) и кубической высокотемпературной (β-Co) модификаций кобальта. Равновесная структура литого сплава КХС-«Д» (анало-

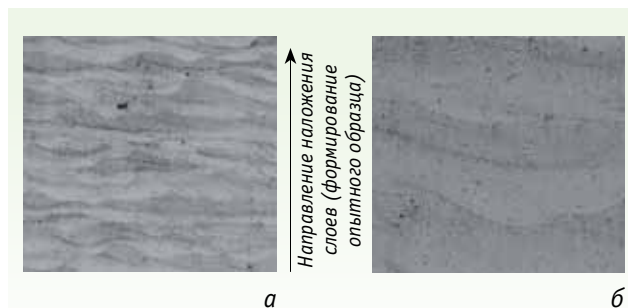


Рис. 5. Микроструктура опытных образцов: увеличение x100 (а), увеличение x500 (б)

га сплава CoCrMo) представляет собой твердый раствор на основе гексагональной низкотемпературной (α-Co) модификации кобальта. Наличие в образцах, полученных СЛП, кубической высокотемпературной (β-Co) модификации кобальта объясняется легированием кобальта одновременно хромом и молибденом в условиях быстрого охлаждения.

Результаты сравнительных механических испытаний приведены в табл. 4. Анализ полученных данных показывает, что механические характеристики опытных образцов гораздо выше, чем у литого сплава-аналога, что характерно для сплавов, полученных в результате лазерной обработки с оплавлением поверхности [6, 7, 8, 9].

Таблица 4. Механические характеристики образцов, полученных СЛП на установке ПТК-ПС и литого сплава КХС-«Д»

Характеристика	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности $\sigma_{вг}$, МПа	Относит. удлинение δ , %	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²	Твердость, HRC
СЛП, порошок CoCrMo	1050±150	1300±150	не менее 6	21±1	38–46
Литье КХС-«Д»	600±50	850±50	не менее 7,5	—	32–36

На рис. 6 изображены детали, изготовленные методом СЛП на установке ПТК-ПС. Деталь «Вставка» (рис. 6, а) может использоваться в конструкции



Рис. 6. Детали, полученные на установке ПТК-ПС: «Вставка» (а), экспериментальная лопатка с сетчатой структурой (б), «Турбина» (в)

экспериментального роторного волнового криогенератора, описанного в работе [10].

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

Оптимальными режимами СЛП для порошка на основе сплава CoCrMo для отечественной установки ПТК-ПС являются:

- непрерывный режим работы лазера (длина волны 1070 нм, мощность 200 Вт);
- азотная защитная атмосфера;
- толщина порошкового слоя 50 мкм;
- скорость сканирования 400 мм/с;
- диаметр пятна лазера 150 мкм;
- расстояние между соседними векторами 100 мкм;
- «двузонная» стратегия сканирования.

Выявлены механизмы формирования структуры исследуемого сплава, характерные для селективного лазерного плавления. 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).

Точностные и физико-механические свойства образцов исследуемого сплава, изготовленные по оптимальным режимам СЛП следующие:

- точность линейных размеров ± 60 мкм;
- шероховатость поверхности Ra 6–10 мкм;
- плотность 8,3 г/см³;
- предел текучести $\sigma_{0,2} = 1050 \pm 150$ МПа;
- предел прочности $\sigma_B = 1300 \pm 150$ МПа;
- относительное удлинение δ не менее 6%;
- ударная вязкость KCU 21 \pm 1 Дж/см²;
- твердость HRC 38–46.

Выводы

Это доказывает, что образцы, полученные СЛП, не только не уступают, но в чем-то (по прочности и твердости) иногда и превосходят физико-механические характеристики образцов, полученных традиционными методами формообразования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шишковский И.В.* Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. — М.: ФИЗМАТЛИТ. 2009. С. 424.

2. *Григорьев С.Н.* Решение задач технологического перевооружения машиностроения // ИТО: Инструмент — технология — оборудование. — 2008. № 10. С. 14–19.
3. *Волосова М.А., Окунькова А.А.* Пути оптимизации процесса селективного лазерного плавления при помощи выбора стратегии обработки лазерным лучом // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4 (2).
4. *Григорьев С.Н., Тарасова Т.В., Гвоздева Г.О., Новотни С.* Микро-лазерная наплавка сплавов системы Al-Si // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 2013. № 5. С. 16–20.
5. *Тарасова Т.В., Назаров А.П.* Исследование процесса селективного лазерного плавления жаропрочных кобальтовых сплавов // Доклад на международном симпозиуме «Фундаментальные основы лазерных микро- и нанотехнологий» (FLAMN-13). СПб. 2013.
6. *Григорьев С.Н., Фоминский В.Ю., Гусаров А.В.* Микро- и наноструктурные особенности Au-Ni сплавов, полученных на никеле при различных режимах импульсного лазерного легирования // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 2012. № 1. С. 8–11.
7. *Григорьев С.Н., Романов Р.И., Фоминский В.Ю.* Зависимость механических и трибологических свойств алмазоподобных углеродных покрытий от режимов лазерного осаждения и легирования металлами // *Трение и износ.* 2012. Т. 33. № 4. С. 342–350.
8. *Fominskii V.Y., Romanov R.I., Grigoriev S.N., Nevolin V.N.* Effect of the Pulsed Laser Deposition Conditions on the Tribological Properties of Thin-Film Nanostructured Coatings Based on Molybdenum Diselenide and Carbon // *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics.* 2012. V. 57. № 4. P. 516–523.
9. *Тарасова Т.В.* Перспективы использования лазерного излучения для повышения износостойкости коррозионностойких сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 2010. № 6. С. 54–58.
10. *Архаров А.М., Семенов В.Ю., Савицкий А.И.* Анализ рабочих процессов в роторном волновом криогенераторе // *Химическое и нефтегазовое машиностроение.* 2012. № 7. С. 15–20.

Алексей Петрович НАЗАРОВ —
аспирант МГТУ «СТАНКИН»

Татьяна Васильевна ТАРАСОВА —
кандидат технических наук,
доцент МГТУ «СТАНКИН»