



УДК 621.762
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-88-94

Поступила 19.06.2018
Received 19.06.2018

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТА СТРУКТУРЫ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ПОРОШКА ТИТАНА

Д. В. МИНЬКО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр-т Независимости, 65. E-mail: dminko@bntu.by

Показана возможность селективного лазерного спекания градиентных пористых и компактно-пористых структур поверхностным оплавлением частиц порошка при сохранении твердого ядра, приводящего к образованию межчастичных контактов в присутствии жидкой фазы. Рассмотрено взаимодействие светового потока импульса лазерного излучения с поверхностью частиц порошка при многократном отражении. Показано, что воздействие одиночных импульсов лазерного излучения приводит к образованию спеканных структурных элементов порошкового материала, имеющих диаметр, примерно равный диаметру фокального пятна. Установлены технологические режимы импульсного лазерного воздействия, при которых происходит устойчивое контактообразование частиц порошка титана исследуемых фракционных составов. Экспериментально показана возможность получения порошковых материалов с градиентной структурой путем управления параметрами импульсного лазерного воздействия. Установлено, что точное дозирование тепловой энергии и количества импульсов лазерного излучения позволяет обеспечить минимальную усадку слоев порошка при отсутствии конгломерации частиц, управлять структурными характеристиками и свойствами изделий, сохранять микроструктуру и фазовый состав исходных материалов.

Ключевые слова. Порошок, титан, импульс, лазер, сканирование, трек, градиент, микроструктура, фазовый состав.

Для цитирования. Минько, Д. В. Влияние параметров импульсного лазерного воздействия на формирование градиента структуры пористых материалов из порошка титана / Д. В. Минько // *Литье и металлургия*. 2018. Т. 92. № 3. С. 88–94. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-88-94.

INFLUENCE OF PARAMETERS OF IMPULSE LASER IMPACT ON THE FORMATION OF THE GRADIENT OF THE STRUCTURE OF POROUS TITANIUM POWDER

D. V. MINKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
E-mail: dminko@bntu.by

The possibility of selective laser sintering of graded porous and compactly porous structures by surface fusion of powder particles is demonstrated while maintaining a solid core, which leads to the formation of interparticle contacts in the presence of a liquid phase. The interaction of the light flux of the laser pulse with the surface of the powder particles under multiple reflection is considered. It is shown that the effect of single pulses of laser radiation leads to the formation of sintered structural elements of a powder material having a diameter approximately equal to the diameter of the focal spot. Technological regimes of pulsed laser action are established at which steady contact formation of titanium powder particles of the fractional compositions under study occurs. The possibility of obtaining powder materials with a gradient structure by controlling the parameters of pulsed laser action is experimentally demonstrated. It was found that accurate dosing of thermal energy and the number of pulses of laser radiation makes it possible to minimize shrinkage of powder layers in the absence of particle conglomeration, to control the structural characteristics and properties of products, to preserve the microstructure and phase composition of the initial materials.

Keywords. Powder, titanium, impulse, laser, scanning, track, gradient, microstructure, phase composition.

For citation: Minko D. V. Influence of parameters of impulse laser impact on the formation of the gradient of the structure of porous titanium powder. *Foundry production and metallurgy*, 2018, vol. 92, no. 3, pp. 88–94. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-88-94.

Введение

Получение функционально-градиентных материалов (ФГМ), имеющих сложную пространственную геометрию, анизотропию состава, структуры и свойств [1], из металлических, керамических и полимерных порошков является сложной и актуальной задачей современной техники. Данная задача может быть

решена с помощью селективного лазерного спекания (СЛС) порошков, основанного на принципе плоского лазерного синтеза, в результате которого трехмерный объект заменяется совокупностью плоских слоев, физически связанных между собой [2]. Применяемые в настоящее время технологии СЛС порошков ориентированы в основном на реализацию процессов построения новых пространственных структур, связанных с полным расплавлением подаваемых в зону лазерного синтеза материалов, которые при этом теряют свои первоначальные свойства и не всегда могут обеспечить получения заданного комплекса предъявляемых к ним требований [3].

Возможность получения порошковых материалов, обладающих градиентом структуры, базируется на идее использования энергии импульсного лазерного излучения для поверхностного оплавления частиц порошка при сохранении твердого ядра, что приводит к образованию межчастичных контактов в присутствии жидкой фазы [4]. Применение импульсного лазерного воздействия за счет точного дозирования тепловой энергии импульса позволяет обеспечить минимальную усадку слоев при отсутствии конгломерации частиц, управлять структурными характеристиками и физико-механическими свойствами изделий, сохранять микроструктуру и фазовый состав исходных материалов. Особенно перспективно [5] использование импульсного лазерного воздействия при получении изделий с градиентом пористости из порошков крупных фракций (100–1000 мкм). Технология позволяет обеспечить внутрислойное и межслойное спекание порошков разных фракционных составов с заданным градиентом структуры при минимальных нарушениях исходной геометрии частиц.

С целью изучения закономерностей формирования градиента структуры пористого материала из порошка титана при импульсном лазерном воздействии были проведены исследования кинетики образования и роста контактов между частицами порошка.

Оборудование, материалы и методики экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования процесса получения порошковых ФГМ проводили на разработанной и изготовленной в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси установке СЛС [6], технические характеристики которой приведены в таблице.

Технические характеристики установки селективного лазерного спекания (СЛС)

Наименование характеристики	Значение
Длина волны лазерного излучения, нм	1064
Режим работы	импульсный
Максимальная частота следования лазерных импульсов, Гц	50
Средняя мощность лазерного импульса, Вт	150
Диапазон длительности лазерного импульса, мс	1–6
Максимальные габариты изделия, мм	50x200x200
Максимальная скорость перемещения оптической системы, мм/мин	1000
Точность позиционирования, мкм	20
Фокусное расстояние объектива, мм	250
Диапазон диаметра фокального пятна лазерного луча, мкм	200–500

В качестве материала для проведения исследований использовали порошок титана марки ВТ1-0 с частицами сферической формы двух фракционных составов: $(-0,315 + 0,2)$ мм и $(-0,4 + 0,315)$ мм.

Определение температуры в зоне спекания в режиме реального времени обеспечивает входящая в состав установки специализированная цифровая видеочкамера с усилителем яркости, регистрирующая увеличенное в 5 раз изображение зоны лазерного спекания в спектральной области регистрации 600–950 нм и позволяющая измерять динамическое распределение температуры на поверхности спекаемого слоя порошка в диапазоне $(1-3) \cdot 10^3$ К с временным разрешением 100 мкс и относительной погрешностью ± 5 %.

Для исследования механизма контактообразования между частицами порошка титана на подложке из кварцевого стекла изготавливали экспериментальные образцы пористого материала в виде дисков диаметром 10 мм, толщиной в один слой или в два-три слоя порошка. При получении образцов сканирование поверхности порошковых слоев осуществляли по кольцевым траекториям с расстоянием между треками, равным среднему диаметру частиц порошка спекаемого фракционного состава.

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert» (Австрия).

Результаты исследования

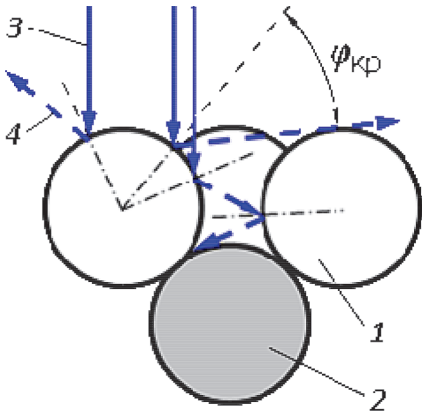


Рис. 1. Взаимодействие лазерного излучения с поверхностью частиц порошка: 1 – частицы верхнего слоя; 2 – частица нижнего слоя; 3 – падающие лучи; 4 – отраженные лучи; $\phi_{кр}$ – критический угол отражения

Известно [7], что поток лазерного излучения при попадании на поверхность порошковой насыпки рассеивается в основном только на двух верхних слоях порошковых частиц, каждый из которых имеет высоту, равную среднему диаметру частиц, образуя в местах просветов между частицами зоны многократного отражения (рис. 1). Механизм разогрева определяется коэффициентом поглощения материала порошка в области инфракрасного излучения, а кинетика образования контактов между частицами порошка зависит от энергии лазерного излучения и длительности воздействия.

Теоретический расчет [8] показал, что при попадании лазерного луча на поверхность порошковой насыпки его энергия распределяется между частицами верхнего и нижнего слоев порошка неравномерно. Относительное количество тепла, идущее на разогрев поверхностей частиц нижнего слоя, зависит от их размера, коэффициента отражения и пористости порошковой насыпки и составляет от 21,2 до 27,6%.

Исследуемые порошки были подвергнуты импульсному лазерному разогреву одиночными импульсами мощностью до 150 Вт, длительностью 1–6 мс с фокальным пятном лазерного луча диаметром 0,2–1,0 мм.

Установлено, что воздействие одиночных импульсов лазерного излучения мощностью менее 30 Вт, длительностью 1–3 мс на монослой частиц порошка титана обоих фракционных составов приводит к разогреву зоны воздействия до температур ниже 1000 К и не сопровождается образованием контактов между частицами. При воздействии на монослой одиночных импульсов лазерного излучения мощностью 30–90 Вт, длительностью более 3–4 мс происходит разогрев зоны воздействия до температур 1900–2000 К (рис. 2, а) и образование спеченных структурных элементов порошкового материала, имеющих диаметр, примерно равный диаметру фокального пятна. Частицы порошка, попавшие в зону фокального пятна, прочно соединены друг с другом посредством контактных шеек (рис. 2, б), в то время как частицы, находящиеся вне зоны лазерного воздействия, нагреваются до температур всего 900–1000 К и не участвуют в процессе контактообразования.

Необходимо отметить, что при воздействии одиночного импульса сфокусированного до 0,2–0,5 мм лазерного излучения на поверхности частиц порошка в центре фокального пятна образуются характерные кратеры (рис. 3), возникающие в результате испарения материала частиц. Размеры кратеров зависят от морфологии поверхности частиц порошка. Эксперименты показали, что, чем меньше коэффициент отражения поверхности частиц порошка, тем больше размер кратера.

Воздействие сфокусированного до 0,2–0,5 мм одиночного импульса лазерного излучения мощностью 90–150 Вт и длительностью 4–6 мс приводит к локальному разогреву поверхности частиц до тем-

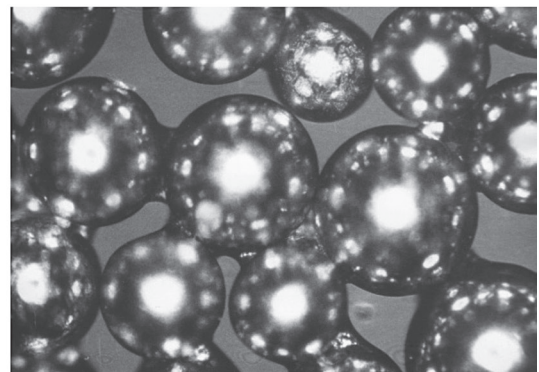
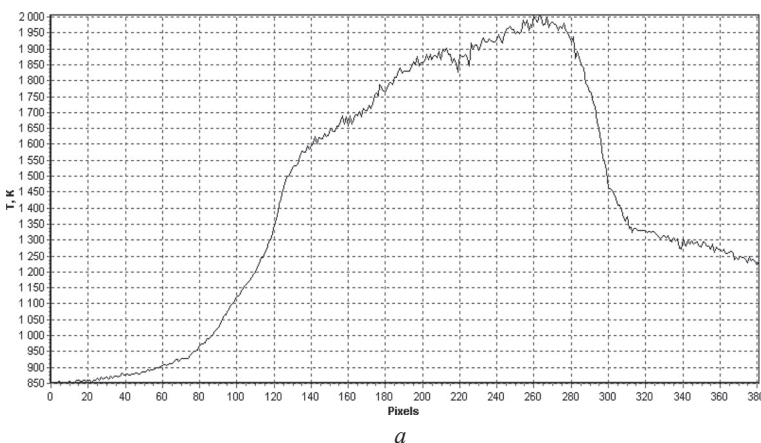


Рис. 2. Градиент температуры на поверхности монослоя сферических частиц порошка титана ВТ1-0 фракционного состава (–0,4 + 0,315) мм при воздействии одиночного импульса лазерного излучения мощностью 60 Вт, длительностью 3 мс (а) и образование контактов между частицами (б). б – $\times 50$

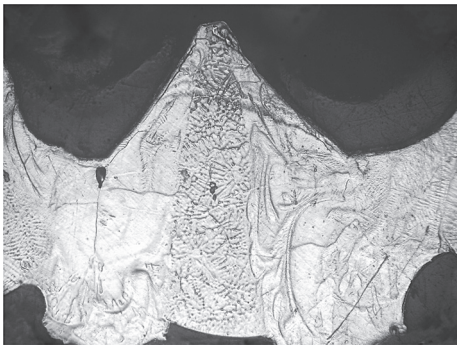


Рис. 3. Образование кратеров на сферической поверхности частицы титана ВТ1-0 фракционного состава $(-0,315 + 0,2)$ мм в результате воздействия одиночного импульса лазерного излучения с диаметром фокального пятна 0,2 мм, $\times 100$

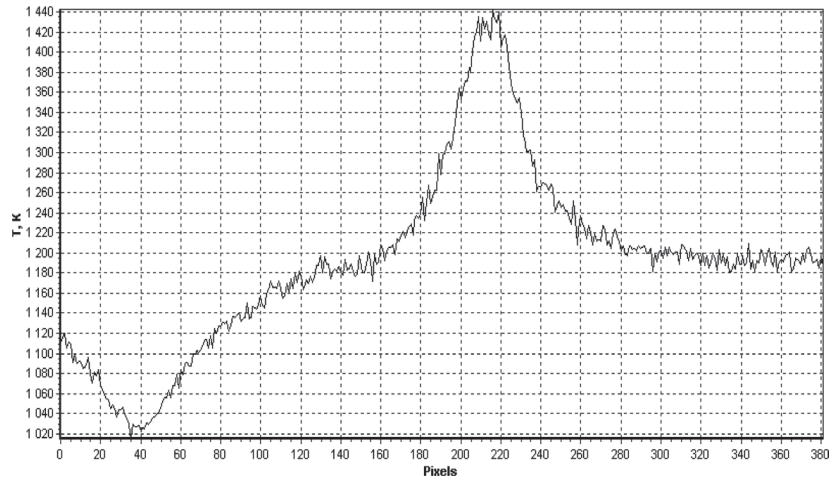


Рис. 4. Градиент температуры на поверхности монослоя частиц сферического порошка титана ВТ1-0 фракционного состава $(-0,4 + 0,315)$ мм при воздействии одиночного импульса лазерного излучения мощностью 120 Вт и длительностью 5 мс с диаметром фокального пятна 1 мм

пературы кипения титана. В результате быстрого теплоотвода за счет испарения дальнейший рост температуры на поверхности частиц прекращается, однако за счет теплоотвода в глубь частиц температура в их объеме резко повышается, при этом происходит их полное или почти полное расплавление и конгломерация в крупные капли, приводящее к нарушению исходной сферической формы и размеров частиц.

С целью предотвращения образования кратеров на поверхности частиц порошка и их конгломерации была предпринята попытка уменьшить градиент температуры на поверхности монослоя частиц. Установлено, что, расфокусировав лазерный луч до диаметра 1 мм, можно изменить характер распределения мощности лазерного излучения по площади пятна и, таким образом, уменьшить влияние температурного градиента. При мощности лазерного излучения 120 Вт и длительности 5 мс расфокусировка луча привела к уменьшению температуры в зоне воздействия до 1350–1450 К (рис. 4). Полученные структурные элементы имели диаметр около 1 мм, при этом на поверхности частиц образования кратеров и конгломератов не наблюдалось.

Дальнейшие экспериментальные исследования при расфокусированном до диаметра 1 мм лазерном луче позволили установить зоны устойчивого контактообразования частиц порошка титана ВТ1-0 исследуемых фракционных составов при различных технологических режимах импульсного лазерного воздействия (рис. 5). Результаты экспериментов хорошо согласуются с проведенными теоретическими расчетами [9] критической мощности лазерного излучения, при которой происходит расплавление и конгломерация частиц порошка, сопровождающаяся разрушением контактных шеек.

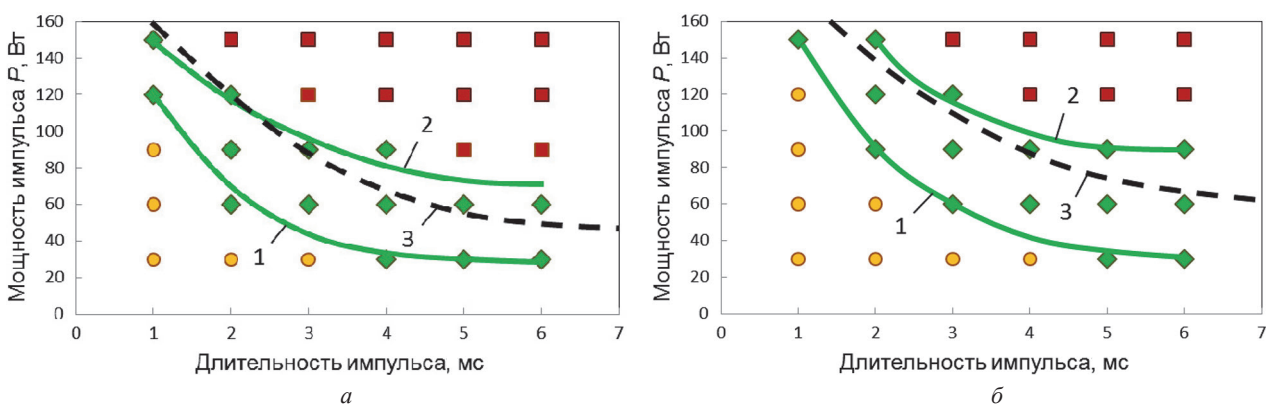


Рис. 5. Диаграммы состояния монослоя сферических частиц порошка ВТ1-0 фракционного состава $(-0,315 + 0,2)$ мм (а) и $(-0,4 + 0,315)$ мм (б) в зависимости от мощности и длительности одиночного импульса лазерного излучения с диаметром фокального пятна 1 мм: 1 – граница зоны отсутствия контактообразования; 2 – граница зоны расплавления; 3 – теоретическая кривая критической мощности лазерного излучения; ● – зона отсутствия контактообразования; ◆ – зона спекания; ■ – зона плавления

Полученные результаты показывают, что требуемая для спекания частиц порошка мощность одиночного импульса лазерного излучения при фиксированных значениях длительности зависит от температуры фазовых переходов материала порошка (температур плавления и кипения), среднего размера и коэффициента отражения поверхности частиц. В свою очередь, величина мощности излучения оказывает влияние на динамику образования жидкой фазы на поверхности частиц порошка. Для протекания процесса контактообразования важно подобрать такое значение мощности излучения, при котором количество жидкой фазы не превышало 10–20 % объема частицы, что обеспечивало бы спекание порошка, быстрое остывание расплава за счет теплоотвода, но при этом не приводило к перегреву расплава и его испарению.

Увеличение длительности импульса лазерного излучения и уменьшение диаметра фокального пятна приводят к перегреву области лазерного воздействия и интенсивному испарению материала с поверхности частиц порошка, при этом не наблюдается существенного увеличения доли образовавшейся жидкой фазы. Уменьшение длительности импульса и увеличение диаметра фокального пятна, напротив, приводят к более равномерному разогреву порошкового слоя, при этом поверхность частиц уже не оплавляется, так как тепловая энергия эффективно отводится в объем материала. Наблюдаемое сокращение доли образовавшейся жидкой фазы не позволяет осуществить консолидацию частиц посредством образования жидкофазных мостиков и процесс идет по пути диффузионного спекания в твердой фазе.

Таким образом, проведенное исследование градиентов температур в зоне воздействия одиночного импульса лазерного излучения показало, что консолидация частиц сферического порошка титана ВТ1-0 при отсутствии полного их расплавления возможна при средней мощности лазерного излучения в диапазоне 30–150 Вт, длительности – в диапазоне 2–5 мс расфокусированным лучом с диаметром фокального пятна 1 мм.

Получение экспериментальных образцов порошковых ФГМ проводили путем сканирования лазерного луча по поверхности порошковой насыпки с линейной скоростью V и частотой следования импульсов f . При этом к регулируемым технологическим параметрам импульсного лазерного воздействия относились средняя мощность одиночного импульса лазерного излучения P ; длительность импульса τ ; диаметр фокального пятна D ; шаг сканирования t .

Средняя мощность лазерного излучения, приходящаяся на единицу площади поверхности порошковой насыпки, зависела от скорости сканирования лазерного луча V , связанной с частотой следования импульсов f : $V = fD(1 - k)$, где $k = L/D$ – коэффициент перекрытия лазерных пятен ($k \leq 1$). Шаг сканирования t , т. е. расстояние между соседними траекториями движения лазерного луча, также выбирали с учетом перекрытия лазерных пятен.

Так как при генерации лазерного излучения его интенсивность по площади фокального пятна распределяется по закону Гаусса, то, очевидно, можно подобрать такую скорость сканирования, при которой подведенная энергия лазерного излучения равномерно распределится вдоль траектории перемещения центра лазерного луча при сканировании (рис. 6). При этом создаются условия для осуществления непрерывного плавления слоя порошка импульсным лазерным излучением, в результате чего формируется зона плавления, перемещающаяся при движении лазерного луча по заданной траектории.

Полученные в результате импульсного лазерного воздействия многослойные пористые экспериментальные образцы имели характерный металлический блеск и цвет, аналогичный порошкам в состоянии поставки (рис. 7, а).

Металлографический анализ показал, что при импульсном лазерном воздействии контактообразование между частицами порошка каждого отдельного слоя идет по механизму жидкофазного спекания. Под действием энергии лазерного излучения поверхность частиц порошка оплавляется и происходит их

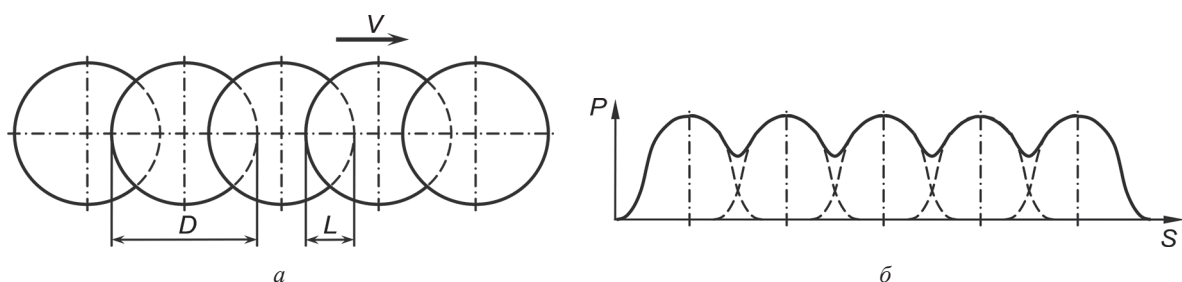


Рис. 6. Схема перемещения (а) и распределения средней мощности (б) лазерного луча при сканировании: V – скорость сканирования; D – диаметр пятен фокусировки; L – длина перекрытия пятен; P – мощность лазерного излучения; S – перемещение при сканировании

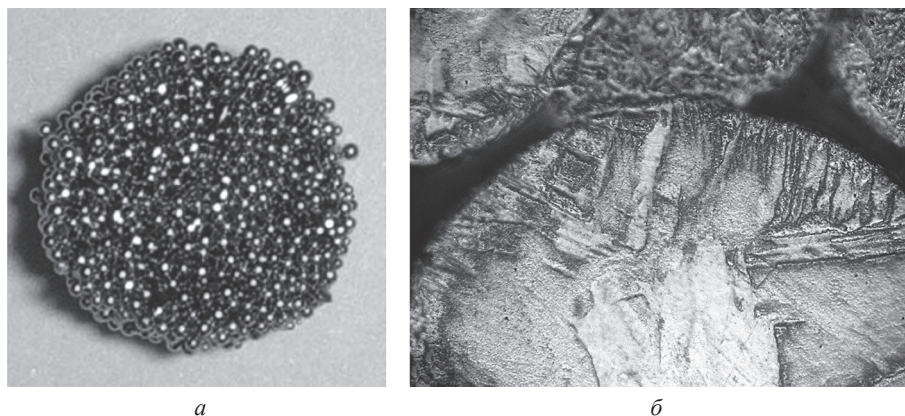


Рис. 7. Экспериментальный образец (а) из сферического порошка титана ВТ1-0 фракционного состава $(-0,4 + 0,315)$ мм и микроструктура частиц (б) после импульсного лазерного воздействия. б – $\times 500$

слияние друг с другом, сопровождаемое растеканием жидкой фазы в горизонтальном направлении. При этом преимущественное образование контактных шеек происходит на глубину проникновения лазерного луча в просветы между частицами. В то же время механизм контактообразования между слоями порошка скорее диффузионный, о чем свидетельствуют сравнительно небольшие размеры контактных шеек между частицами верхнего и нижнего слоев и рост зерна внутри частиц порошка. Измельчение зеренной структуры титана на поверхности частиц порошка говорит о быстром разогреве и последующей рекристаллизации материала при остывании, что подтверждает механизм поверхностного оплавления частиц порошка с сохранением твердой фазы в центре (рис. 7, б).

Обсуждение результатов исследования

Анализ процесса СЛС сферического порошка титана позволил выделить из набора технологических параметров несколько основных, наиболее сильно влияющих на структуру получаемого порошкового материала. В качестве основных управляющих параметров процесса лучше использовать среднюю мощность одиночного импульса и скорость сканирования лазерного луча, а изменение длительности и частоты следования импульсов применять в качестве дополнительного. Важным параметром является глубина проникновения лазерного излучения, которая в отличие от основных параметров не является легко регулируемой, поскольку зависит от способов подготовки порошка перед обработкой. Тем не менее, учет этого параметра необходим при задании основных технологических параметров импульсного лазерного воздействия.

Проведенное исследование позволило установить диапазоны регулирования технологических параметров импульсного лазерного воздействия, при которых происходит жидкофазное спекание сферических частиц порошка титана ВТ1-0 при сохранении твердого ядра.

Полученные результаты показывают, что реализация процесса СЛС в условиях расфокусированного луча позволяет не только получать необходимый градиент структуры порошкового материала, но и существенно снизить временные и энергетические затраты при изготовлении изделий.

Выводы

Существующие в настоящее время аддитивные технологии, использующие импульсное лазерное воздействие, позволяют получать широкий спектр материалов, предназначенных для использования во многих отраслях техники. Одной из характерных особенностей метода импульсного лазерного воздействия является возможность управления структурной неоднородностью материалов, что открывает возможность регулирования неоднородности их физических свойств.

Проведенные исследования показали, что получение порошковых ФГМ путем импульсного лазерного воздействия – сложный физический процесс, связанный с неоднородным распределением тепловой энергии лазерного излучения по поверхности и объему частиц порошка и формированием за счет выделившегося тепла межчастичных контактов. Для целенаправленного выбора технологических режимов импульсного лазерного воздействия, обеспечивающих формирование материалов с заданным градиентом структуры и свойств, необходимо установить связь между характеристиками исходных порошков, параметрами процесса и свойствами получаемых материалов.

Экспериментально показана возможность получения порошковых материалов с градиентной структурой путем управления технологическими параметрами импульсного лазерного воздействия. Установлено, что точное дозирование тепловой энергии и количества импульсов лазерного излучения позволяет обеспечить минимальную усадку слоев порошка при отсутствии конгломерации частиц, управлять структурными характеристиками изделий, сохранять микроструктуру и фазовый состав исходных материалов. Необходимо отметить, что кратковременность импульсного лазерного воздействия является также и существенным недостатком, так как высокие скорости нагрева–охлаждения приводят к возникновению в получаемых материалах термических напряжений, устранение которых путем дополнительной термообработки может привести к потере преимуществ сохраненных исходных структур.

Однако имеющиеся преимущества значительно превышают отмеченные недостатки. Высокие градиенты температуры, вызванные импульсным лазерным воздействием, малая длительность процесса нагрева–охлаждения, совмещение в одной операции формования и спекания позволяют получать материалы из порошков на основе тугоплавких металлов и соединений, химически активных материалов, склонных к быстрому окислению, плохо формуемых сферических порошков. Особо следует отметить перспективность применения технологий, связанных с импульсным лазерным воздействием, для получения материалов со специальными свойствами, таких, как металлические стекла, ФГМ и композиты из разнородных материалов – твердых сплавов и сталей, сложных механически легированных материалов, металлов с включениями из сверхтвердых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Niino M., Hirai T., Watanabe R. The functionally gradient materials // J. Jpn. Soc. Compos. Mater. 1987. Vol. 13. P. 257–264.
2. Meteinick J. The technology of rapid prototyping. Innovation Summer, 1992. P. 30–32.
3. Hanninen J. Direct metal laser sintering. Advanced Materials & Processes. 2002, v. 160(5), pp. 33–36.
4. Yasuda H., Ohnako I., Kaziura H., Nishivaki Y. Fabrication of Metallic Porous Media by Semisolid Processing Using Laser Irradiation // Materials Transactions. 2001. Vol. 42(2). P. 309–315.
5. Belyavin K. E., Minko D. V., Chivel Yu. A., Pavlenko V. K. New Technology of Selective Laser Sintering. EURO PM2005 Congress and Exhibition. Proceedings. 2–5 October 2005, Prague, Czech Republic, 2005, vol. 2, pp. 171–176.
6. Белявин К. Е., Минько Д. В., Чивель Ю. А., Павленко В. К. Установка порошковой лазерной стереолитографии и области ее применения // Порошковая металлургия. 2007. Вып. 30. С. 35–43.
7. Fischer P., Romano V., Weber H. P., Karapatis N. P., Boillat E., Glardon R. Sintering of commercially pure titanium powder with a Nd: YAG laser source // Acta Materialia. 2003. Vol. 51. P. 1651–1662.
8. Belyavin K. E., Minko D. V., Bykov R. P., Kuznechik O. O. Investigation of influence of Pulse-periodical laser radiation power on stability of liquid-metal contacts between powder Particles during selective laser sintering. Extended Abstracts of 2006 Powder Metallurgy World Congress, September 24–28, 2006. BEXCO, Busan, Korea, 2006, part 1, pp. 518–519.
9. Белявин К. Е., Минько Д. В., Быков Р. П., Кузнецик О. О. Исследование влияние мощности импульсно-периодического лазерного излучения на устойчивость жидкометаллических контактов между частицами порошка при селективном лазерном спекании // Порошковая металлургия. 2006. Вып. 29. С. 268–272.

REFERENCES

1. Niino M., Hirai T., Watanabe R. The functionally gradient materials. J. Jpn. Soc. Compos. Mater. 1987, vol. 13, pp. 257–264.
2. Meteinick J. The technology of rapid prototyping. Innovation Summer, 1992, pp. 30–32.
3. Hanninen J. Direct metal laser sintering. Advanced Materials & Processes. 2002, vol. 160(5), pp. 33–36.
4. Yasuda H., Ohnako I., Kaziura H., Nishivaki Y. Fabrication of Metallic Porous Media by Semisolid Processing Using Laser Irradiation. Materials Transactions. 2001, vol. 42(2), pp. 309–315.
5. Belyavin K. E., Minko D. V., Chivel Yu. A., Pavlenko V. K. New Technology of Selective Laser Sintering. EURO PM2005 Congress and Exhibition. Proceedings. 2–5 October 2005, Prague, Czech Republic, 2005, vol. 2, pp. 171–176.
6. Belyavin K. E., Minko D. V., Chivel Yu. A., Pavlenko V. K. Ustanovka poroshkovoj lazernoj stereolitografii i oblasti ee primenenija [Equipment of powder laser stereolithography and the field of its application]. *Poroshkovaja metallurgija = Powder metallurgy*, 2007, vyp. 30, pp. 35–43.
7. Fischer P., Romano V., Weber H. P., Karapatis N. P., Boillat E., Glardon R. Sintering of commercially pure titanium powder with a Nd: YAG laser source. Acta Materialia. 2003, vol. 51, pp. 1651–1662.
8. Belyavin K. E., Minko D. V., Bykov R. P., Kuznechik O. O. Investigation of influence of Pulse-periodical laser radiation power on stability of liquid-metal contacts between powder Particles during selective laser sintering. Extended Abstracts of 2006 Powder Metallurgy World Congress, September 24–28, 2006. BEXCO, Busan, Korea. 2006, part 1, pp. 518–519.
9. Belyavin K. E., Minko D. V., Bykov R. P., Kuznechik O. O. Issledovanie vlijanie moshhnosti impul'sno-periodicheskogo lazernogo izlucheniya na ustojchivost' zhidkometallicheskih kontaktov mezhdu chasticami poroshka pri selektivnom lazernom spekanii [Investigation of the influence of pulsed-periodic laser radiation on the stability of liquid metal contacts between powder particles under selective laser sintering]. *Poroshkovaja metallurgija = Powder metallurgy*, 2006, vyp. 29, pp. 268–272.