

Минько Д.В. Особенности формирования градиентных пористых и компактно-пористых порошковых структур при селективном лазерном спекании сферического порошка титана марки VT1-0 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 24–33. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.4.03

Minko D.V. Features of Formation of Gradient Porous and Compact Porous Powder Structures by Selective Laser Sintering of Titanium Grade VT1-0 Spherical Powder. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 24–33. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.4.03

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 20, № 4, 2018**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.4.03  
УДК 621.762

**Д.В. Минько**

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ ПОРИСТЫХ  
И КОМПАКТНО-ПОРИСТЫХ ПОРОШКОВЫХ СТРУКТУР ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ ЛАЗЕРНОМ  
СПЕКАНИИ СФЕРИЧЕСКОГО ПОРОШКА ТИТАНА МАРКИ VT1-0**

Показана возможность использования селективного лазерного спекания для получения градиентных пористых и компактно-пористых порошковых структур путем поверхностного плавления частиц порошка при сохранении твердого ядра. С целью изучения кинетики контактообразования предложено под минимальным значением энергии одиночного импульса лазерного излучения понимать значение, при котором обеспечивается получение некоторого структурного элемента диаметром, равным диаметру фокального пятна лазерного луча, и толщиной, равной среднему диаметру частицы порошка. Исследовано распределение температуры на поверхности структурного элемента из порошка титана марки VT1-0 фракционных составов  $(-0,315 + 0,2)$  и  $(-0,4 + 0,315)$  мм при воздействии одиночного импульса лазерного излучения различной мощности и длительности. Показано, что частицы порошка в центральной зоне фокального пятна разогреваются до значений температуры 1900–2000 К, в то время как частицы, находящиеся вне этой зоны, нагреваются до значений температуры всего 900–1000 К и не участвуют в процессе контактообразования. Установлены диапазоны технологических режимов СЛС, при которых происходит устойчивое контактообразование частиц порошка титана исследуемых фракционных составов. Экспериментально показана возможность формирования градиентных пористых и компактно-пористых порошковых структур путем управления параметрами импульсного лазерного воздействия. Установлено, что точное дозирование 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. Технология позволяет обеспечить внутрислойное и межслойное спекание порошков разного фракционного состава с заданным градиентом структуры при минимальных нарушениях исходной геометрии частиц.

**Ключевые слова:** порошок, титан, градиент, температура, импульс, лазер, излучение, отражение, мощность излучения, фокальное пятно.

**D.V. Minko**

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

**FEATURES OF FORMATION OF GRADIENT POROUS  
AND COMPACT POROUS POWDER STRUCTURES BY SELECTIVE LASER SINTERING  
OF TITANIUM GRADE VT1-0 SPHERICAL POWDER**

The possibility of using selective laser sintering (SLS) to obtain gradient porous and compact porous powder structures by surface melting of powder particles while maintaining a solid core is shown. In order to study the kinetics of contact formation, it was proposed to assume the minimum energy value of a single laser pulse as the value at which a certain structural element having a diameter equal to the diameter of the laser beam focal spot and the thickness equal to the powder particle average diameter, is obtained. The temperature distribution on the surface of the VT1-0 titanium powder structural element of the fractional composition  $(-0.315+0.2)$  mm and  $(-0.4+0.315)$  mm was investigated when exposed to a single laser pulse of various power and duration. It is shown that the powder particles in the central zone of the focal spot are heated to temperatures of 1900–2000 K, while particles outside this zone are heated to temperatures of only 900–1000 K and do not participate in the process of contact formation. Established the ranges of SLS technological modes, under which stable contact formation of titanium powder particles of the studied fractional compositions takes place. The possibility of forming gradient porous and compact porous powder structures by controlling the parameters of pulsed laser exposure was experimentally shown. It has been found that accurate dosing of energy and the number of pulses of laser radiation results in minimal shrinkage of powder layers within the absence of particle conglomeration, control the structural characteristics and properties of products, microstructure and phase composition preservation of the original materials. The technology allows providing intralayer and interlayer powder sintering of different fractional compositions with a given structure gradient with minimal disruption of the initial geometry of the particles.

**Keywords:** powder, titanium, gradient, temperature, pulse, laser, radiation, reflection, radiation power, focal spot.

## Введение

Получение функционально-градиентных материалов, имеющих сложную пространственную геометрию, анизотропию состава, структуры и свойств [1–3], из металлических, керамических и полимерных порошков является сложной и актуальной задачей современной техники. Данная задача может быть решена с помощью метода селективного лазерного спекания (СЛС) порошков, основанного на принципе послойного лазерного синтеза, в результате которого трехмерный объект заменяется совокупностью плоских слоев, физически связанных между собой [4–6]. 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 получение заданного комплекса предъявляемых к ним требований [7–9].

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 [10–12]. 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 [13] 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 разного фракционного состава с заданным градиентом структуры при минимальных нарушениях исходной геометрии частиц.

С целью изучения закономерностей формирования градиента структуры пористых и компактно-пористых порошковых материалов при импульсном лазерном воздействии были проведены исследования кинетики образования и роста контактов между частицами порошка титана, а также между частицами порошка титана и компактной титановой подложкой.

## Оборудование, материалы и методики экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования процесса получения градиентных пористых и компактно-пористых порошковых структур проводили на разработанной и изготовленной в Институте порошковой металлургии установке СЛС [14, 15], технические характеристики которой приведены в таблице.

### Технические характеристики установки СЛС

№ п/п	Наименование характеристики	Значение
1	Длина волны лазерного излучения, нм	1064
2	Режим работы	Импульсный
3	Максимальная частота следования лазерных импульсов, Гц	50
4	Средняя мощность лазерного импульса, Вт	150
5	Диапазон длительности лазерного импульса, мс	1–6
6	Максимальные габариты изделия, мм	50×200×200
7	Максимальная скорость перемещения оптической системы, мм/мин	1000
8	Точность позиционирования, мкм	20
9	Фокусное расстояние объектива, мм	250
10	Диапазон диаметра фокального пятна лазерного луча, мкм	200–1000

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

Температуру в зоне спекания определяли в режиме реального времени с помощью входящей в состав установки специализированной цифровой видеокамеры с усилителем яркости, регистрирующей увеличенное в 5 раз изображение зоны лазерного спекания в спектральной области регистрации 600–950 нм и позволяющей 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  $\pm 5$  %.

Для исследования механизма контактообразования между частицами порошка титана изготавливали экспериментальные образцы пористого материала в виде дисков диаметром 10 мм и высотой в один слой или в два-три слоя порошка при

толщине слоя, равной среднему диаметру частиц. При изготовлении образцов компактно-пористого материала пористые слои наносили на подложку из титана марки ВТ1-0 диаметром 10 мм и толщиной 1 мм. Сканирование поверхности порошковых слоев лазерным лучом 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

Известно [16], 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.

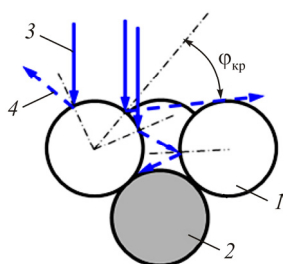


Рис. 1. Взаимодействие лазерного излучения с поверхностью частиц порошка: 1 – частицы верхнего слоя; 2 – частица нижнего слоя; 3 – падающие лучи; 4 – отраженные лучи;  $\varphi_{кр}$  – критический угол отражения

Исходя из этого предложено под минимальным значением энергии понимать такое значение, при котором с помощью одного импульса лазерного излучения обеспечивается получение некоторого структурного элемента диаметром, равным диаметру фокального пятна лазерного луча, и толщиной, равной среднему диаметру частицы порошка. Формирование структурного элемента порошкового материала происходит или на поверхности предыдущего (нижнего) слоя, или на поверхности компактной подложки.

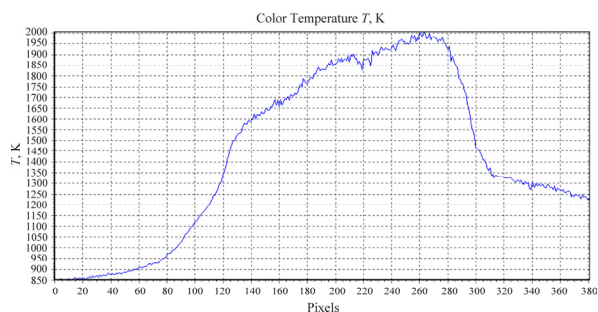
Проведенный энергетический расчет [17] показал, что при попадании лазерного луча на поверхность свободно насыпанного слоя порошка его энергия распределяется между частицами верхнего

и нижнего слоев неравномерно. Относительное количество тепла, идущее на разогрев поверхностей частиц нижнего слоя или подложки, зависит от их размера, коэффициента отражения поверхности частиц и пористости порошковой насыпки, и составляет от 21,2 до 27,6 %. Минимальное значение энергии импульса лазерного излучения (без учета явления теплообмена между порошковыми частицами и окружающей средой), которую необходимо затратить на получение пористого или компактно-пористого структурного элемента из порошка титана с размером частиц исследуемого диапазона, может составлять от 0,502 до 3,16 Дж при диаметре фокального пятна от 0,5 до 1,0 мм. Если готовое изделие представить в виде конечного набора плоских слоев толщиной, равной среднему диаметру частицы порошка, каждый из которых состоит из определенного числа структурных элементов, то, зная частоту следования импульсов и величину энергии импульса лазерного излучения, можно рассчитать общее время изготовления и относительную пористость всего изделия.

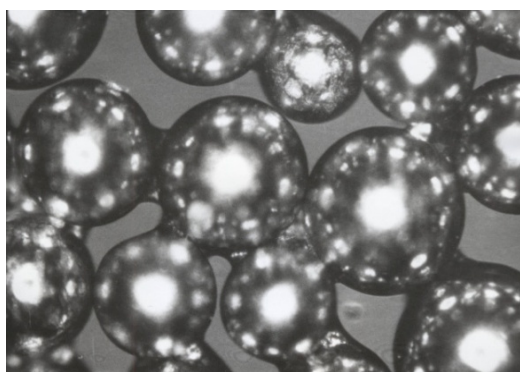
Исследуемые порошки были подвергнуты импульсному лазерному разогреву одиночными импульсами мощностью 30, 60, 90, 120 и 150 Вт, длительностью 1, 2, 3, 4, 5 и 6 мс, с фокальным пятном лазерного луча диаметром 0,2, 0,5 и 1,0 мм. Экспериментально установлено, что воздействие одиночных импульсов сфокусированного до 0,5 мм лазерного излучения мощностью 0–30 Вт, длительностью 1–3 мс на монослой из частиц порошка титана обоих фракционных составов вне зависимости от состояния их поверхности приводит к разогреву зоны воздействия до значений температуры ниже 1000 К и не сопровождается образованием контактов между частицами. В результате воздействия на порошок одиночного импульса лазерного излучения происходит нагревание поверхности частиц в зоне фокального пятна и быстрый теплоотвод вглубь частиц. В связи с отсутствием металлических контактов между частицами, попавшими в зону фокального пятна, и частицами, находящимися вне этой зоны, существенный теплоперенос между ними отсутствует. В результате формируется зона с высокими температурными градиентами вблизи границы пятна фокусировки лазерного луча.

При воздействии на монослой одиночных импульсов сфокусированного до 0,5 мм лазерного излучения мощностью 30–90 Вт, длительностью более 3–4 мс происходит разогрев зоны воздействия до значений температуры 1900–2000 К (рис. 2, а), приводящий к образованию контактных шеек между частицами и формированию спеченных структурных элементов, имеющих диаметр, примерно равный диаметру фокального пятна. Частицы порош-

ка, 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 значений температуры всего 900–1000 К и не участвуют в процессе контактообразования.



а



б

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 и длительностью 3 мкс (а) и образование контактов между частицами,  $\times 50$  (б)

Необходимо отметить, что в результате воздействия одиночного импульса сфокусированного до 0,2 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 одиночного импульса сфокусированного до 0,5 мм лазерного излучения мощностью 90–150 Вт и длительностью 4–6 мс приводит к локальному разогреву поверхности частиц до температуры кипения титана. В результате быстрого теплоотвода за счет испарения дальнейший рост температуры на поверхности частиц прекращается, однако за счет теплоотвода вглубь частиц темпера-

тура в их объеме резко повышается, при этом происходит их полное или почти полное расплавление и конгломерация в крупные капли, что приводит к нарушению исходной сферической формы и размеров частиц.

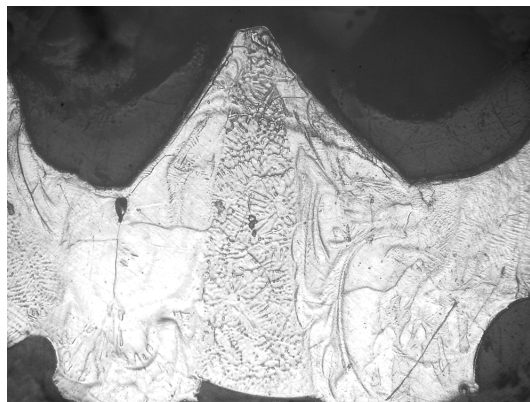


Рис. 3. Образование кратеров на сферической поверхности частицы титана ВТ1-0 фракционного состава  $(-0,315 + 0,2)$  мм в результате воздействия одиночного импульса лазерного излучения с диаметром фокального пятна 0,2 мм,  $\times 100$

С целью предотвращения образования кратеров на поверхности частиц порошка и их конгломерации была предпринята попытка уменьшить градиент температуры на поверхности монослоя частиц. Установлено, что, сфокусировав 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 фокусировка луча до диаметра 1 мм 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.

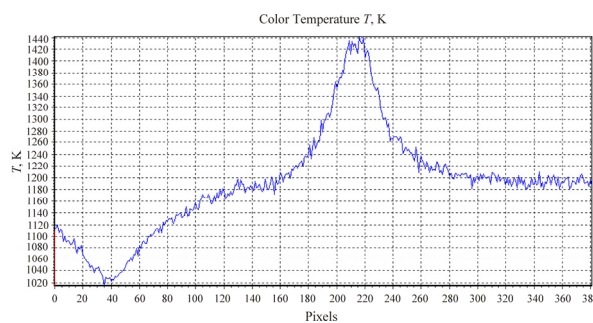


Рис. 4. Градиент температуры на поверхности монослоя частиц сферического порошка титана ВТ1-0 фракционного состава  $(-0,4 + 0,315)$  мм при воздействии одиночного импульса лазерного излучения мощностью 120 Вт, длительностью 5 мкс, с диаметром фокального пятна 1 мм

Дальнейшие экспериментальные исследования при сфокусированном 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 [18] критической мощности лазерного излучения, при которой происходит расплавление и конгломерация частиц порошка, сопровождающиеся разрушением контактных шеек.

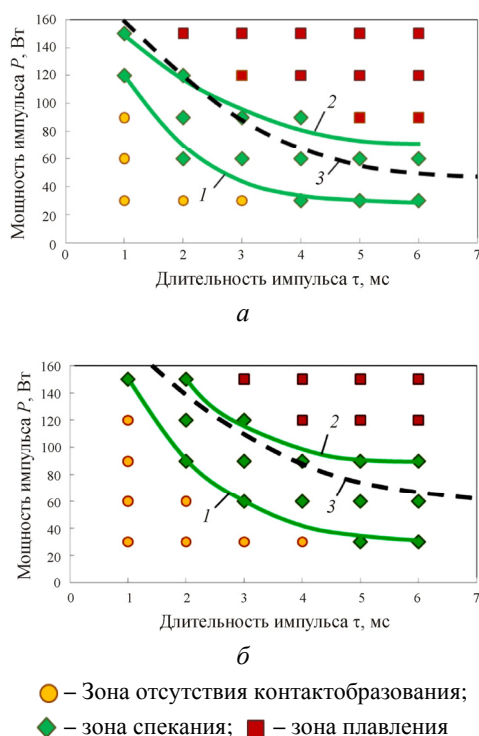


Рис. 5. Диаграммы состояния монослоя сферических частиц порошка ВТ1-0 фракционного состава  $(-0,315 + 0,2)$  мм (а) и  $(-0,4 + 0,315)$  мм (б) в зависимости от мощности и длительности одиночного импульса лазерного излучения с диаметром фокального пятна 1 мм: 1 – граница зоны отсутствия контактообразования;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

Получение экспериментальных образцов пористых и компактно-пористых порошковых материалов проводили путем сканирования лазерного луча по поверхности порошковой насыпки с линейной скоростью  $V$  в диапазоне 5–9 мм/с и частот следования импульсов  $f$ , составляющей 10 Гц. При этом задавались следующие технологические параметры импульсного лазерного воздействия: средняя мощность одиночного импульса лазерного излучения  $P$  в диапазоне 60–120 Вт; длительность импульса  $\tau$  в диапазоне 3–5 мс. Диаметр фокально-

го пятна  $D$  составлял 0,5–1,0 мм; шаг сканирования  $t$  равнялся среднему диаметру частиц порошка исследуемых фракций.

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

Поскольку при генерации лазерного излучения его интенсивность по площади фокального пятна распределяется по закону Гаусса, очевидно, что 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.

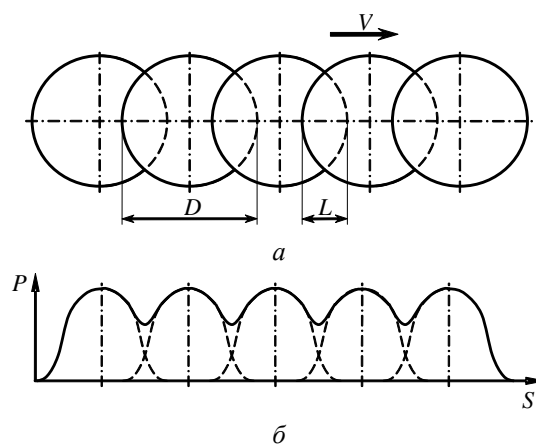


Рис. 6. Схема перемещения (а) и распределения средней мощности (б) лазерного луча при сканировании:  $V$  – скорость сканирования;  $D$  – диаметр пятен фокусировки;  $L$  – длина перекрытия пятен;  $P$  – мощность лазерного излучения;  $S$  – перемещение при сканировании

Полученные в результате импульсного лазерного воздействия многослойные пористые экспериментальные образцы имели характерные металлический блеск и цвет, аналогичные блеску и цвету 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 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).

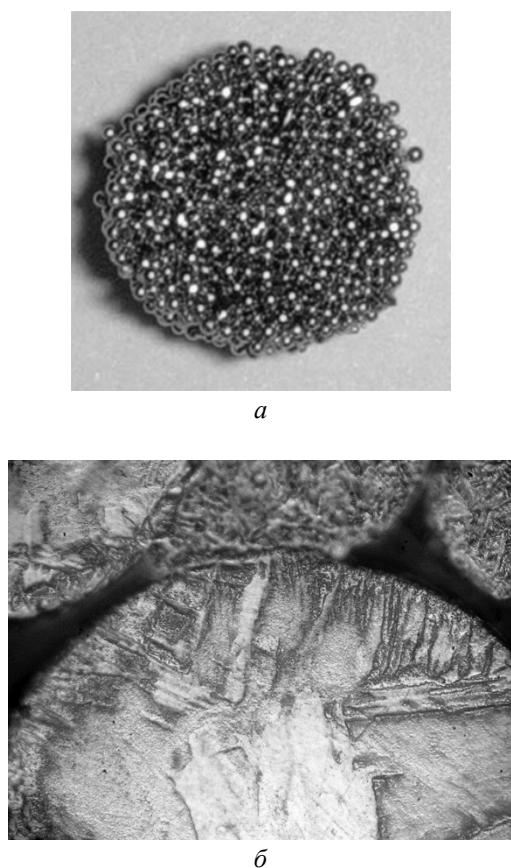
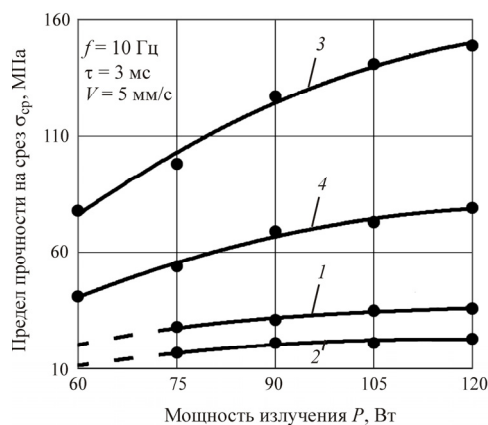


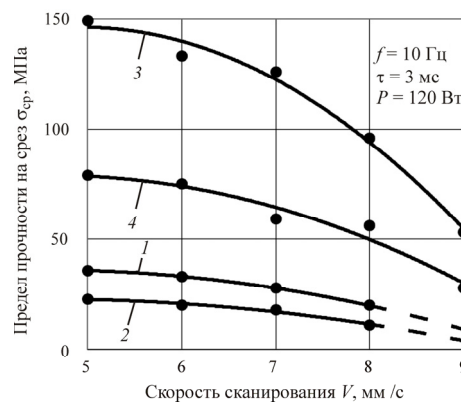
Рис. 7. Экспериментальный образец (а) из сферического порошка титана ВТ1-0 фракционного состава  $(-0,4 + 0,315)$  мм и микроструктура частиц,  $\times 500$  (б) после импульсного лазерного воздействия

Изучение прочности сцепления порошкового слоя с подложкой из компактного титана ВТ1-0 позволило установить [19], что применяемые для получения пористых образцов параметры им-

пульсного лазерного воздействия не могут быть использованы для надежного закрепления порошкового слоя на титановой подложке. Прочность контактов между частицами порошка первого слоя и титановой подложкой оказалась значительно меньше, чем между частицами порошка лежащих выше слоев (рис. 8, кривые 1 и 2). По-видимому, это объясняется недостаточным образованием жидкой фазы из-за быстрого отвода тепловой энергии лазерного излучения с поверхности вглубь подложки. Обозначенные пунктиром зоны на кривых говорят о разрушении образцов при их извлечении из технологической камеры установки СЛС.



а



б

Рис. 8. Зависимость предела прочности на срез компактно-пористых образцов из сферического порошка титана ВТ1-0 различного фракционного состава от мощности импульса лазерного излучения (а) и скорости сканирования (б) лазерного луча с диаметром пятна 1 мм (кривые 1 и 2) и 0,5 мм (кривые 3 и 4): 1, 3 – фракция  $(-0,315 + 0,2)$  мм; 2, 4 – фракция  $(-0,4 + 0,315)$  мм

Попытки усилить интенсивность процесса тепловыделения путем изменения оптических свойств поверхности подложки, создания макро- и микронеровностей не дали положительного результата. Увеличение средней мощности импульса

лазерного излучения до 150 Вт и уменьшение скорости сканирования лазерного луча до 3 мм/с привело к полному расплавлению частиц порошкового слоя на поверхности подложки (рис. 9), не расплавив ее поверхность.

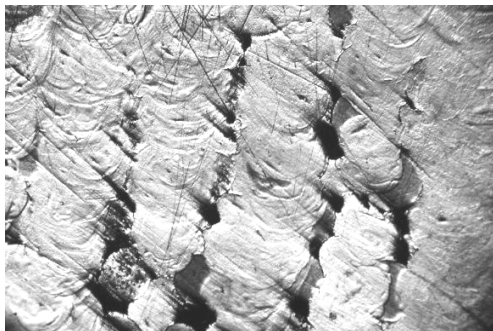


Рис. 9. Расплавление поверхности порошкового слоя сферического порошка титана ВТ1-0 фракционного состава  $(-0,315 + 0,2)$  мм на подложке из титана ВТ1-0,  $\times 100$

Решить проблему позволила фокусировка лазерного луча до диаметра 0,5 мм. При этом дефекты (кратеры), образующиеся на поверхности частиц порошка первого слоя, можно перекрыть последующими слоями, спекаемыми лазерным лучом, сфокусированным до диаметра 1 мм.

Экспериментальные образцы компактно-пористого материала, полученные путем сканирования первого слоя частиц лазерным лучом с диаметром фокального пятна 0,5 мм, а последующих слоев – лазерным лучом с диаметром фокального пятна 1,0 мм, показали повышение прочности на срез до 6–7 раз (см. рис. 8, кривые 3 и 4).

Повышенную прочность сцепления с подложкой более мелких частиц порошка можно объяснить увеличением относительного количества жидкой фазы, образующейся в результате импульсного лазерного воздействия с одной и той же удельной энергией импульса. Эту закономерность можно использовать при создании градиентных структур на компактной подложке путем последовательного нанесения слоев с все более крупным размером частиц по мере удаления от ее поверхности.

#### Обсуждение результатов исследования

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 (значений температуры 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 превышает 10–20 % объема частицы, что будет обеспечивать спекание порошка, быстрое остывание расплава за счет теплоотвода, но при этом не приведет к перегреву расплава и его испарению.

Увеличение длительности импульса лазерного излучения и уменьшение диаметра фокального пятна приводит 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, приводит 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 значений температуры 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 30–150 Вт, длительности 2–5 мс расфокусированным лучом с диаметром фокального пятна 1 мм.

Поверхность спеченного слоя частиц, независимо от состояния поверхности исходных порошков, после воздействия одиночного импульса лазерного излучения приобретала металлический блеск и цвет, аналогичные блеску и цвету порошков в состоянии поставки. Результаты измерений коэффициента отражения поверхности слоев, полученных из частиц с различной морфологией поверхности, показали, что их оптические свойства стали примерно одинаковыми. Скорее всего, выравнивание оптических свойств происходит в результате растворения оксидной пленки в жидкой фазе, возникающей на поверхности частиц, подвергшихся разогреву в вакууме или в инертном газе [20].

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 управ-

ляющих 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 VT1-0 при сохранении их твердого ядра. Изложенные 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 градиентных порошковых структур 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 значений 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, функционально-градиентные и композиционные материалы инструментального, электротехнического и медицинского назначения; сложных механически легированных материалов, металлов с включениями из сверхтвердых материалов.

### Список литературы

1. Koizumi M. The concept of FGM // *Ceramic Trans.* – 1993. – Vol. 34. – P. 3–11.
2. Niino M., Hirai T., Watanabe R. The functionally gradient materials // *J. Jpn. Soc. Compos. Mater.* – 1987. – Vol. 13. – P. 257–264.
3. Kieback B., Neubrand A., Riedek H. Processing techniques for functionally graded materials // *Mater. Sci. Eng.* – 2003. – Vol. A362. – P. 81–105.
4. Deckard C.R., Beaman J.J. Recent advances in selective laser sintering // *Proc. of the 14th Conf. on Prod. Research and Techn.* – Michigan, 1987. – P. 447–451.
5. Meteinick J. The technology of rapid prototyping // *Innovation Summer.* – 1992. – P. 30–32.
6. Fischer P. Sintering of commercially pure titanium powder with a Nd:YAG laser source // *Acta Mater.* – 2003. – Vol. 51. – P. 1651–1662.
7. Hanninen J. Direct metal laser sintering // *Adv. Mater. & Proc.* – 2002. – Vol. 160(5). – P. 33–36.
8. Yap C.Y. Review of selective laser melting: materials and applications // *Appl. Phys. Rew.* – 2015. – Vol. 2. – P. 041101. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.4935926> (accessed 30 October 2018).



9. Additive manufacturing of metals / D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann // *Acta Mater.* – 2016. – Vol. 117. – P. 371–392.

10. Fabrication of Metallic Porous Media by Semisolid Processing Using Laser Irradiation / H. Yasuda, I. Ohnako, H. Kaziura, Y. Nishivaki // *Mater. Transact.* – 2001. – Vol. 42(2). – P. 309–315.

11. Dilip J.J.S. Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti–6Al–4V alloy parts fabricated by selective laser melting // *Progress in Add. Manuf.* – 2017. – Vol. 2. – P. 157–167.

12. Fischer P. Microstructure of near-infrared pulsed laser sintered titanium samples // *Appl. Phys.* – 2004. – Vol. A78. – P. 1219–1227.

13. New technology of selective laser sintering / K.E. Belyavin, D.V. Minko, Yu.A. Chivel, V.K. Pavlenko // *EURO PM2005 Cong. and Exhib. Proc.*, 2–5 October 2005, Prague, Czech Republic. – 2005. – Vol. 2. – P. 171–176.

14. Установка порошковой лазерной стереолитографии: пат. 2299787 Рос. Федерация / Белявин К.Е., Минько Д.В., Кузнецик О.О., Чивель Ю.А., Павленко В.К. Опубл. 27.05.2007. Бюл. № 5.

15. Установка порошковой лазерной стереолитографии и области ее применения / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Ю.А. Чивель, В.К. Павленко // *Порошковая металлургия / НАН Беларуси.* – Минск, 2007. – Вып. 30. – С. 35–43.

16. Sintering of commercially pure titanium powder with a Nd:YAG laser source / P. Fischer, V. Romano, H.P. Weber, N.P. Karapatis, E. Boillat, R. Glardon // *Acta Mater.* – 2003. – Vol. 51. – P. 1651–1662.

17. Investigation of influence of Pulse-periodical laser radiation power on stability of liquid-metal contacts between powder Particles during selective laser sintering / K.E. Belyavin, D.V. Minko, R.P. Bykov, O.O. Kuznechik // *Extended Abstracts of 2006 Powder Metal. World Cong.*, 24–28 Septembe 2006, BEXCO, Busan, Korea. – 2006. – Part 1. – P. 518–519.

18. Исследование влияния мощности импульсно-периодического лазерного излучения на устойчивость жидкометаллических контактов между частицами порошка при селективном лазерном спекании / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Р.П. Быков, О.О. Кузнецик // *Порошковая металлургия / НАН Беларуси.* – Минск, 2006. – Вып. 29. – С. 268–272.

19. Solid-state laser fusion of spherical titanium powders / K.E. Belyavin, D.V. Minko, O.O. Kuznechik, R.P. Bykov, D.A. Zatyagin // *Powder Metal. and Metal Ceramics.* – 2008. – Vol. 47(7–8). – P. 500–505.

20. Колачев Б.А., Габидуллин Р.М., Пигузов Ю.В. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов: учеб. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1980. – 280 с.

## References

1. Koizumi M. The concept of FGM. *Ceramic Trans.*, 1993, vol. 34, pp. 3–11.

2. Niino M., Hirai T., Watanabe R. The functionally gradient materials. *Journal Japan Society for Composite Materials*, 1987, vol. 13, pp. 257–264.

3. Kieback B., Neubrand A., Riedek H. Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering*, 2003, vol. A362, pp. 81–105.

4. Deckard C.R., Beaman J.J. Recent advances in selective laser sintering. *Proc. of the 14th Conf. on Prod. Research and Techn.* Michigan, 1987, pp. 447–451.

5. Meteinick J. The technology of rapid prototyping. *Innovation Summer*, 1992, pp. 30–32.

6. Fischer P. Sintering of commercially pure titanium powder with a Nd:YAG laser source. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, pp. 1651–1662.

7. Hanninen J. Direct metal laser sintering. *Journal of Advanced Materials and Processing*, 2002, vol. 160(5), pp. 33–36.

8. Yap C.Y. Review of selective laser melting: materials and applications. *Applied Physics Reviews*, 2015, vol. 2, pp. 041101. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4935926> (accessed 30 October 2018).

9. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 2016, vol. 117, pp. 371–392.

10. Yasuda N., Ohnako I., Kaziura H., Nishivaki Y. Fabrication of Metallic Porous Media by Semisolid Processing Using Laser Irradiation. *Mater. Transact.*, 2001, vol. 42(2), pp. 309–315.

11. Dilip J.J.S. Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti–6Al–4V alloy parts fabricated by selective laser melting. *Progress in Add. Manuf.*, 2017, vol. 2, pp. 157–167.

12. Fischer P. Microstructure of near-infrared pulsed laser sintered titanium samples. *Appl. Phys.*, 2004, vol. A78, pp. 1219–1227.

13. Belyavin K.E., Minko D.V., Chivel Yu.A., Pavlenko V.K. New technology of selective laser sintering. *EURO PM2005 Cong. and Exhib. Proc.*, 2–5 October 2005, Prague, Czech Republic, 2005, vol. 2, pp. 171–176.

14. Belyavin K.E., Minko D.V., Kuznechik O.O., Chivel' Yu.A., Pavlenko V.K. Ustanovka poroshkovoi lazernoi stereolitografii [Installation of a powder laser stereolithograph]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2299787 (2007).

15. Belyavin K.E., Minko D.V., Chivel' Yu.A., Pavlenko V.K. Ustanovka poroshkovoi lazernoi stereolitografii i oblasti ee primeneniia [Installation of a powder laser stereolithograph and field of its application]. *Poroshkovaia metallurgii. NAN Belarusi.* Minsk, 2007, iss. 30, pp. 35–43.

16. 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.

17. 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 Metal. World Cong.*, 24–28 Septembe 2006, BEXCO, Busan, Korea, 2006, part 1, pp. 518–519.

18. Belyavin K.E., Minko D.V., Bykov R.P., Kuznechik O.O. Issledovanie vliianiia moshchnosti impul'sno-periodicheskogo lazernogo izlucheniia na ustoiчивost' zhidkometallicheskih kontaktov mezhdou chastitsami poroshka pri selektivnom lazernom spekanii [A research of

influence of power of pulse and periodic laser radiation on stability of zhidkometallichesky contacts between powder particles at selective laser agglomeration]. Poroshkovaia metallurgiiia. NAN Belarusi. Minsk, 2006, iss. 29, pp. 268–272.

19. Belyavin K.E., Minko D.V., Kuznechik O.O., Bykov R.P., Zatyagin D.A. Solid-state laser fusion of spherical titanium powders. *Powder Metal. and Metal Ceramics.*, 2008, vol. 47(7–8), pp. 500–505.

20. Kolachev B.A., Gabidullin R.M., Piguzov Iu.V. Tekhnologiiia termicheskoi obrabotki tsvetnykh metallov i splavov: uchebnoe posobie dlia vuzov [Technology of heat treatment of non-ferrous metals and alloys]. Moscow.: Metallurgiiia, 1980, 280 p.

Получено 16.10.18

Опубликовано 20.12.18

#### Сведения об авторе

**Минько Дмитрий Вацлавович** (Минск, Республика Беларусь) – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и технологии обработки металлов давлением Белорусского национального технического университета; e-mail: dminko@bntu.by.

#### About the author

**Dmitry V. Minko** (Minsk, Republic of Belarus) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Machines and Technology of Metal Forming, Belarusian National Technical University; e-mail: dminko@bntu.by.