

2. Consecutive sub-sector scan mode with adjustable scan lengths for selective laser melting technology / W.X. Zhang, Y.S. Shi, B. Liu, L. Xu, W. Jiang // Int. J. Adv. Manuf. Tech. CrossRefGoogle Scholar. – 2009. – Vol. 41(7–8). – P. 706–713.

3. Yadroitsev I., Bertrand P., Smurov I. Parametric analysis of the selective laser melting process // Appl. Surf. Sci. CrossRefGoogle Scholar. – 2007. – Vol. 253(19). – P. 8064–8069

4. Wang F.D. Mechanical property study on rapid additive layer manufacture Hastelloy® X alloy by selective laser melting technology // Int. J. Adv. Manuf. Tech. – 2011. DOI: 10.1007/s00170-011-3423-2

5. Материаловедение. Версия 1.0: электрон. учеб. пособие / В.С. Биронт, Т.А. Орелкина, Т.Н. Дроздова [и др.]; ИПК СФУ. – Красноярск, 2008. – 9 Мб.

6. Минькова А.А., Бояршинов М.В. Исследование влияния термообработки на ФМХ и структуру деталей, изготовленных методом СЛС // Современное материаловедение: традиции отечественных научных школ и инновационный подход: материалы Всерос. молодеж. науч.-техн. конф., 28–29 сентября 2017 г. – Геленджик.

СЕЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ СПЕКАНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ ПОРИСТЫХ И КОМПАКТНО-ПОРИСТЫХ ПОРОШКОВЫХ СТРУКТУР

Д.В. Минько, К.Е. Бежавин

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь
e-mail: mitomd@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. Показано, что воздействие одиночных импульсов лазерного излучения приводит к образованию спеченных 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, отражение, мощность излучения, градиент.

SELECTIVE LASER SINTERING OF GRADIENT POROUS AND COMPACT-POROUS POWDER STRUCTURES

D.V. Minko, K.E. Belyavin

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
e-mail: mitomd@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. 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, pulse, laser, reflection, radiation power, gradient.

Получение функционально-градиентных материалов, имеющих сложную пространственную геометрию, анизотропию состава, структуры и свойств [1], из металлических, керамических и полимерных порошков является сложной и актуальной задачей современной техники, которая может быть решена с помощью селективного лазерного спекания (СЛС) порошков [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 получение 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.

С целью изучения были проведены исследования кинетики образования и роста контактов между частицами порошка.

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.

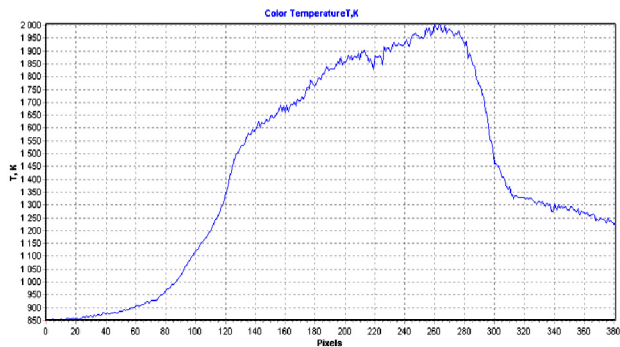
Экспериментальные исследования закономерностей формирования градиента структуры пористого материала при импульсном лазерном воздействии проводили на установке СЛС [5] с длиной волны лазерного излучения 1064 нм, средней мощностью лазерного импульса 150 Вт при диапазоне длительности 1–6 мс. Определение температуры в зоне спекания в режиме реального времени проводили при помощи входящей в состав установки специализированной цифровой видеокамеры с усилителем яркости, регистрирующей увеличенное в 5 раз изображение зоны лазерного спекания в спектральной области 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 $\pm 5\%$.

Известно [6], что поток лазерного излучения при попадании на поверхность порошковой насыпки рассеивается в основном только на двух верхних слоях порошковых частиц, образуя в местах просветов между частицами зоны многократного отражения. Механизм разогрева определяется коэффициентом поглощения материала порошка, а кинетика образования контактов между частицами порошка зависит от энергии и длительности лазерного воздействия.

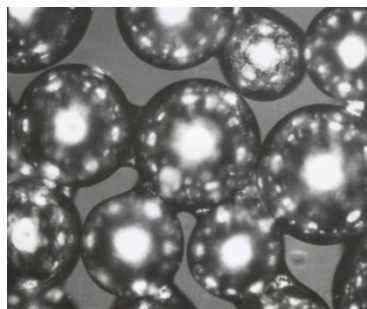
Теоретический расчет [7] показал, что при попадании лазерного луча на поверхность порошковой насыпки его энергия распределяется между частицами верхнего и нижнего слоев порошка неравномерно. Относительное количество тепла, идущее на разогрев поверхностей частиц нижнего слоя, зависит от их размера, коэффициента отражения и пористости порошковой насыпки и составляет от 21,2 до 27,6 %.

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 значений температуры 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 значений температуры 1900–2000 К (рис. 1, *a*) и образование спеченных градиентных структур 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. 1, 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.



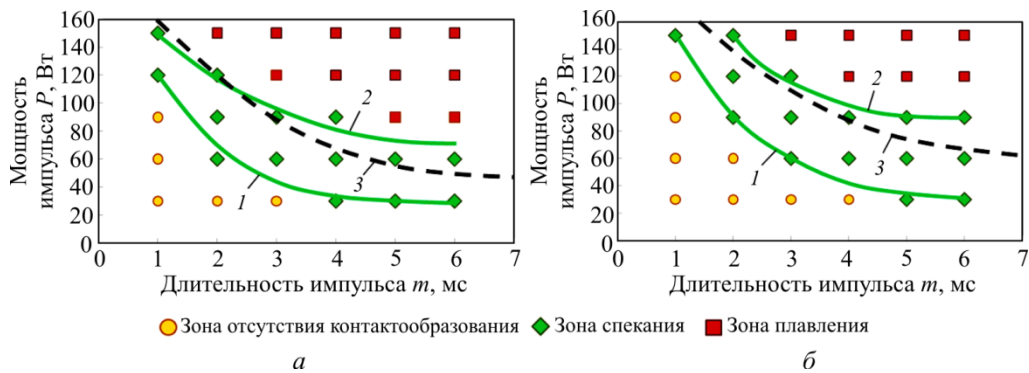
а



б

Рис. 1. Градиент температуры на поверхности монослоя сферических частиц порошка титана при воздействии одиночного импульса лазерного излучения (а) и образование контактов между частицами, $\times 50$ (б)

Зарегистрированы зоны устойчивого контактообразования частиц порошка титана ВТ1-0 при различных технологических режимах импульсного лазерного воздействия (рис. 2). Результаты экспериментов хорошо согласуются с проведенными теоретическими расчетами [8] критической мощности лазерного излучения, при которой происходит расплавление и конгломерация частиц порошка, сопровождающаяся каплеобразованием.



а

б

Рис. 2. Диаграммы состояния монослоя сферических частиц порошка ВТ1-0 фракционного состава $(-0,315+0,2)$ мм (а) и $(-0,4+0,315)$ мм, $\times 50$ (б) в зависимости от мощности и длительности одиночного импульса лазерного излучения: 1 – граница зоны отсутствия контактообразования; 2 – граница зоны расплавления; 3 – теоретическая кривая критической мощности лазерного излучения

Полученные результаты показывают, что требуемая для спекания частиц порошка мощность 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.

Анализ процесса СЛС сферического порошка титана позволил выделить из набора технологических параметров несколько основных, наиболее сильно влияющих на структурный градиент получаемого порошкового материала. В качестве основных управляющих параметров процесса целесообразно 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.

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

Список литературы

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. – Vol. 160 (5). – P. 33–36.
4. Fabrication of metallic porous media by semisolid processing using laser irradiation / H. Yasuda, I. Ohnako, H. Kaziura, Y. Nishivaki // *Materials Transactions.* – 2001. – Vol. 42 (2). – P. 309–315.
5. 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.
6. 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 Materialia.* – 2003. – Vol. 51. – P. 1651–1662.
7. 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 Metallurgy World Congress, 24–28 September 2006 / ВЕХСО. – Busan, Korea, 2006. – Part 1. – P. 518–519.

8. 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.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АТОМИЗАЦИИ РАСПЛАВА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОШКА МАРКИ ХН60М

К.В. Калинин, С.А. Оглезнева

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Россия
e-mail: kirk199@yandex.ru

Для изготовления металлического порошка марки ХН60М (ЭП367; 06Х15Н60М1) была использована технология газового распыления жидкого расплава аргоном на лабораторном атомайзере VIGA2B при температуре 1560 °С. При получении порошков варьировали давлением распыляющего газа.

Установлено, что при увеличении давления распыляющего газа уменьшались значения текучести, доли частиц с сателлитами, доля частиц с порами и повышалась доля сферических частиц. Значения диаметра Фере, среднего размера частиц и d_{50} изменились незначительно.

Представлена экспериментальная зависимость повышения выхода порошка целевой фракции (40–80) при уменьшении объема подачи распыляющего газа. Представлена экспериментальная зависимость повышения выхода порошка с малым количеством сферических частиц при уменьшении объема подачи распыляющего газа. Установлена обратно пропорциональная зависимость доли сферических частиц от целевой фракции.

Полученные данные позволяют прогнозировать величины выходных параметров порошков при атомизации стали ХН60М (ЭП367; 06Х15Н60М1). Характеристики порошков позволяют использовать их для изготовления изделий аддитивными технологиями.

Ключевые слова: моделирование, вязкость, технологические свойства, форма частиц, целевая фракция, порошок, давление газа, аддитивные технологии, сталь, газовая атомизация, атомайзер VIGA2B.

INFLUENCE OF PARAMETERS OF MELTING ATOMIZING TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE POWDER OF THE BRAND KHN60M

K.V. Kalinin, S.A. Oglezneva

Perm National Research Polytechnic University, Russian Federation
e-mail: kirk199@yandex.ru

To produce a metal powder of grade steel KhN60M (EP367; 06X15N60M1), the technology of gas atomization of liquid melt by argon on a laboratory atomizer VIGA2B was used at a temperature of 1560 °C. In the production of powders, the pressure of the atomizing gas was varied.