

**ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ
В ЛАБОРАТОРИЯХ**

УДК 539.12.04

**УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
ПОВЕРХНОСТНО-СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ
ПОРОШКОВЫХ БИОСОВМЕСТИМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

© 2019 г. Н. В. Минаев, Е. Н. Антонов, С. А. Минаева, С. Н. Чурбанов

Поступила в редакцию 03.08.2018 г.

После доработки 03.08.2018 г.

Принята к публикации 15.08.2018 г.

DOI: 10.1134/S003281621901018X

Поверхностно-селективное лазерное спекание (п.с.л.с.) — это аддитивная технология на основе процесса селективного лазерного спекания, разработанная в ИПЛИТ РАН [1, 2] для формирования трехмерных матриксов из мелкодисперсных порошков биосовместимых, биорезорбируемых полимеров. Особенностью данного метода является наличие сенсibilизатора на поверхности частиц полимера, что обеспечивает более эффективное поглощение лазерной энергии и более высокую температуру нагрева поверхности частиц по сравнению с температурой внутри их объема. Таким образом, спекание полимерных частиц может происходить за счет плавления только поверхностных слоев частиц полимера, без перегрева их внутреннего объема. Данный метод позволяет включать в матриксы термолabile вещества, что открывает перспективы применения их в тканевой инженерии [3, 4].

Нашей научной группой предложен метод п.с.л.с., позволяющий использовать в качестве сенсibilизатора воду [5]. Схема процесса п.с.л.с. с водой приведена на рис. 1а. Сначала формируется слой порошка (1), затем он увлажняется (2), после чего по заданной траектории происходит процесс облучения лазером (3). Вода поглощает излучение, нагревает поверхности частиц и испаряется. Полученная структура состоит из оплавленных по поверхности и сплавленных друг с другом частиц (4). Пример сформированного трехмерного матрикса приведен на рис. 1б.

Для отработки этой технологии и подбора оптимальных параметров спекания необходимо было разработать и создать установку на современной элементной базе, позволяющую провести исследования физико-химических процессов при п.с.л.с. различных новых материалов и способную работать с небольшим количеством специ-

фических материалов, синтез которых в больших объемах весьма затруднен.

Коммерчески доступные установки предназначены для работы с большими объемами серийно выпускаемых материалов, причем номенклатура материалов сильно ограничена и, как правило, нельзя использовать другие оригинальные материалы. Практически все системы работают по принципу полного переплавления материала, что не позволяет их использовать в режиме п.с.л.с. для формирования трехмерных структур из биосовместимых мелкодисперсных порошков.

Для проведения исследований процессов п.с.л.с. мелкодисперсных порошков полимеров с использованием воды в качестве сенсibilизатора нагрева была разработана установка ПСЛС-1.9 (рис. 1в). Установка приспособлена для работы с небольшим количеством материала. Для послойного нанесения порошка разработано специальное устройство (5). Оно включает в себя три бункерных отделения: для подачи порошка, для формирования структуры и для сбора отработанного порошка. Формирование новых слоев порошка осуществляется с помощью разравнивающего ножа (6). Все части устройства оборудованы шаговыми двигателями и сервомоторами, подключенными к микроконтроллеру Arduino MEGA 2560 (7), управляемому от компьютера (8), что позволяет реализовать автоматический процесс работы со слоями мелкодисперсного порошка. Процесс нанесения водного аэрозоля на поверхность частиц порошка осуществляется с помощью ультразвукового увлажнителя воздуха (Stadler Form Jack J-020, Швейцария) и специальных щелевых сопел, изготовленных методом трехмерной экструзионной печати.

Для спекания использовалось непрерывное инфракрасное излучение тулиевого волоконного лазера с длиной волны 1960 нм (НТО “ИРЭ-Полус”,

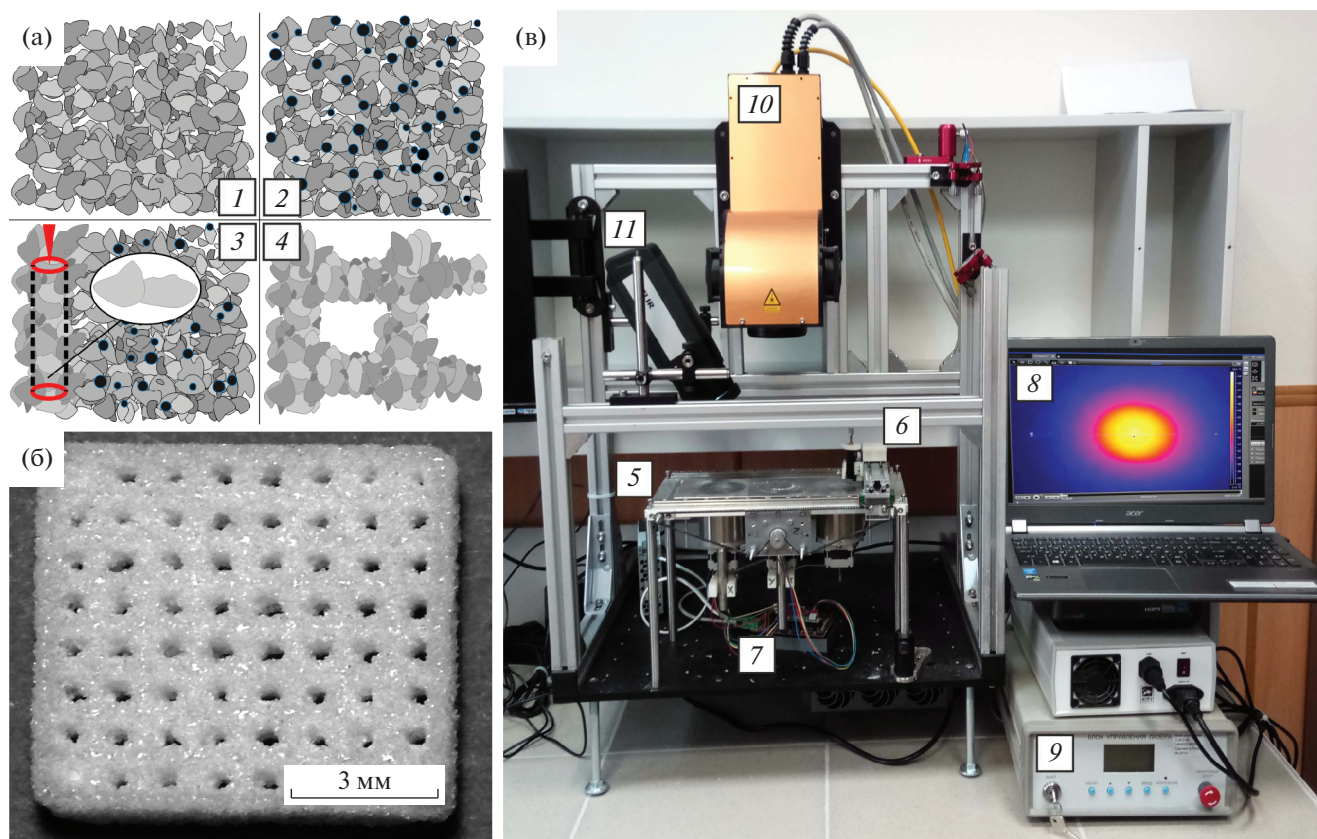


Рис. 1. а – схема процесса п.с.л.с. порошковых материалов с водой (1 – исходный порошок, 2 – увлажненный порошок, 3 – процесс спекания, 4 – структура из спеченных частиц); б – фотография изготовленного на установке матрикса; в – внешний вид установки ПСЛС-1.9 (5 – система послойного нанесения порошка, 6 – разравнивающий нож, 7 – управляющий микроконтроллер, 8 – компьютер, 9 – волоконный лазер, 10 – гальваносканирующая система управления лазерным излучением; 11 – тепловизионная камера).

Россия) (9), которое слабо ($\kappa_{\text{полгл}} \sim 1 \text{ см}^{-1}$) поглощается полимером, в то время как вода имеет сильную полосу поглощения ($\sim 100 \text{ см}^{-1}$) в этой области. Лазерное излучение доставляется на рабочую поверхность с помощью гальваносканирующей системы LscanH-10 (Атеко, Россия) (10) с F-theta объективом SL-2000-100-160 (Ronar-Smith, Сингапур). Оптическая система позволяет формировать лазерное пятно диаметром от 80 до 600 мкм с требуемой мощностью, а также перемещать его по заданной траектории по поверхности спекаемого материала с необходимой скоростью. Используемое программное обеспечение LDesigner SLS (Атеко, Россия) позволяет подготовить управляющую программу для лазерной части установки для проведения процесса формирования трехмерных объектов по заданной трехмерной модели.

На установке закрепляется тепловизионная камера FLIR (A600-series, США) (11), оборудованная макрообъективом. С ее помощью проводятся исследования кинетики и пространствен-

ного распределения температуры для частиц порошка полимера в зоне лазерного воздействия в зависимости от параметров спекания и условий смачивания. Для анализа состояния порошковых материалов в процессе нанесения слоев установка также может быть оборудована скоростной камерой “Fastcam SA3” (Photron, США), которая позволяет контролировать поведение частиц полимера в процессе формирования новых слоев и таким образом отследить возможное переувлажнение порошка и скорректировать процесс его нанесения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН в части развития аддитивной технологии п.с.л.с. биodeградируемых полимерных материалов и РФФИ (16-02-00473) в части создания биоактивных матричных структур для тканеинженерных конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Antonov E.N., Bagratashvili V.N., Howdle S.M., Kononov A.N., Popov V.K., Panchenko V.Y. // *Laser Physics*. 2006. V. 16. № 5. P. 774.
2. Антонов Е.Н., Евсеев А.В., Попов В.К. Патент РФ на полезную модель № 2010122007 // Бюл. № 1. Оpubл. 10.01.2011.
3. Kanczler J.M., Mirmalek-Sani S.-H., Hanley N.A., Ivanov A.L., Barry J. J.A., Upton C., Shakesheff K.M., Howdle S.M., Antonov E.N., Bagratashvili V.N., Popov V.K., Oreffo R. O.C. // *Acta Biomaterialia*. 2009. V. 5. P. 2063.
4. Бухарова Т.Б., Антонов Е.Н., Попов В.К., Фатхудинов Т.Х., Попова А.В., Волков А.В., Бочкова С.А., Баграташвили В.Н., Гольдштейн Д.В. // *Клеточные технологии в биологии и медицине*. 2010. № 1. С. 40.
5. Antonov E.N., Krotova L.I., Minaev N.V., Minaeva S.A., Mironov A.V., Popov V.K., Bagratashvili V.N. // *Quantum Electronics*. 2015. V. 45. № 11. P. 1023.

Адрес для справок: Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пионерская, 2, Институт фотонных технологий ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН. Тел.: +7-915-053-21-03. E-mail: minaevn@gmail.com (Минаев Никита Владимирович).