

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2020 г. Н. В. Минаев<sup>а,\*</sup>, А. В. Миронов<sup>а</sup>, С. А. Минаева<sup>а</sup>, О. А. Миронова<sup>а</sup>,  
М. А. Сячина<sup>а</sup>, Е. Krumins<sup>б</sup>, S. Howdle<sup>б</sup>, В. К. Попов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт фотонных технологий ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН  
Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пионерская, 2

<sup>б</sup> School of Chemistry, University of Nottingham, Nottingham, England

\*e-mail: minaevn@gmail.com

Поступила в редакцию 18.11.2019 г.

После доработки 21.11.2019 г.

Принята к публикации 22.11.2019 г.

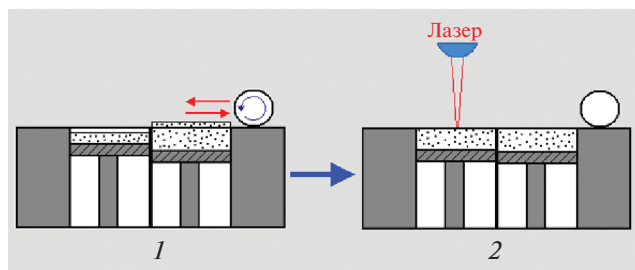
Описана установка для селективного лазерного спекания порошков микронной и субмикронной фракции. Установка позволяет проводить исследования с малыми объемами полимерных порошков, а также водных и спиртовых суспензий для отработки параметров процесса спекания с целью достижения высокого пространственного разрешения (порядка 10 мкм). Сформированы тонкие (около 20 мкм) слои из сферических микрочастиц полиметилметакрилата (п.м.м.а.) со средним диаметром от 0.5 до 3 мкм. Оптимизация параметров селективного лазерного спекания и поэтапного формирования одиночных слоев п.м.м.а. позволила получить 3D структуры с разрешением менее 100 мкм.

DOI: 10.31857/S0032816220020135

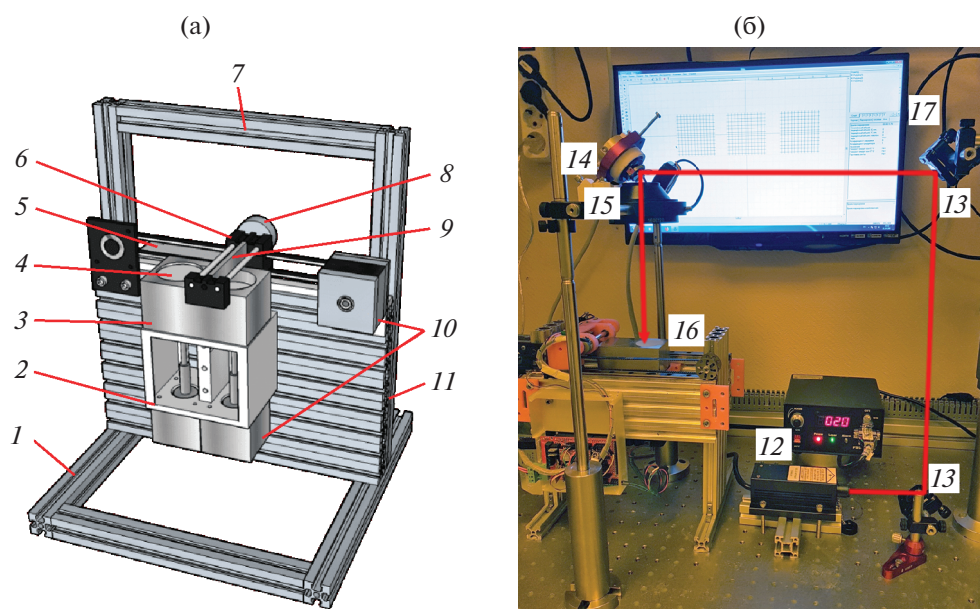
Селективное лазерное спекание (с.л.с.) является сегодня одной из основных и хорошо развитых технологий аддитивного производства. Она основана на послойном лазерно-индуцированном спекании порошковых материалов различных типов (металлы, керамика, полимеры) [1]. Современные технологические комплексы с.л.с. позволяют с высокой производительностью и достаточно хорошим (порядка 100 мкм) пространственным разрешением изготавливать трехмерные объекты различной архитектоники по их 3D компьютерным моделям [2]. В то же время потенциальные возможности технологии с.л.с. в случае полимерных материалов реализованы далеко не в полной мере. Основными причинами этого являются: ограниченность выбора подходящих для этого полимеров (главным образом, полиамидов и полистиролов, а также их композитов), неидеальная (отличная от сферической) форма и морфология поверхности частиц их мелкодисперсных (характерный диаметр порядка 40–80 мкм) порошков с широким распределением по размерам, а также их реологические и оптические свойства.

Для дальнейшего развития технологии с.л.с., исследования возможности применения новых материалов, отработки параметров процесса с.л.с., в частности, для достижения высокого простран-

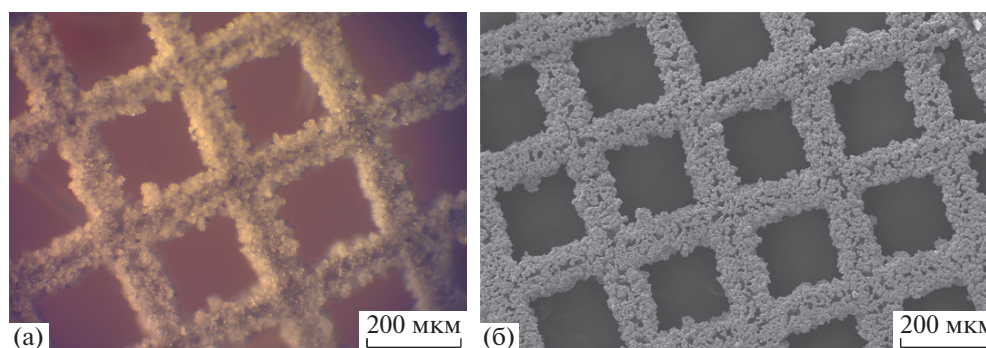
ственного разрешения (порядка 10 мкм) необходимо иметь возможность экспериментировать с малыми объемами исходных материалов, с высокой точностью контролируя параметры процесса их лазерного спекания. Это нельзя сделать, используя существующие коммерческие установки с.л.с., так как они предназначены для работы с большими объемами стандартизированных материалов при заданных параметрах, что не позволяет достичь желаемых результатов. Для решения этой проблемы нами разработана, изготовлена и отлажена лабораторная установка, позволяющая



**Рис. 1.** Принципиальная схема работы 3D принтера для порошковых материалов. 1 – формирование слоя порошка; 2 – процесс спекания порошка излучением лазера по заданной траектории.



**Рис. 2.** а – схема модуля для формирования слоев тонкодисперсных порошков в установках селективного лазерного спекания; б – фотография модуля развертки лазерного излучения. 1 – рама; 2 – корпус привода поршней; 3 – блок рабочих камер; 4 – поршни; 5 – блок питания установки; 6 – корпус разравнивающего устройства; 7 – крепление модуля развертки лазерного излучения (гальваносканера); 8 – механический или пьезоэлектрический активатор разравнивающего устройства; 9 – рабочий элемент разравнивающего устройства; 10 – шаговые приводы; 11 – микроконтроллер; 12 – лазер; 13 – зеркала; 14 – гальваносканер; 15 – объектив; 16 – рабочий слой порошка; 17 – управляющий компьютер.



**Рис. 3.** Фотографии с оптического (а) и со сканирующего электронного (б) микроскопов полученных структур. Глубина структуры 80 мкм.

проводить исследование процессов селективного лазерного спекания различных новых полимерных материалов микронной и субмикронной дисперсности.

Принцип действия установки основан на формировании трехмерного объекта путем послойного лазерно-индуцированного сплавления мелкодисперсных (с характерным диаметром от 0.3 до 5 мкм) полимерных частиц (рис. 1). Тонкий слой исходного порошка (толщина регулируется в диапазоне 5–100 мкм) переносится с загрузочной поверхности на рабочую при помощи специализированного устройства 1. В слое порошка

осуществляется локальное сплавление частиц сфокусированным лазерным пучком по траектории, соответствующей определенному срезу цифровой модели 2. После завершения печати одного слоя, наносится следующий слой, и цикл повторяется необходимое число раз. Такой подход позволяет получить трехмерную структуру практически любой геометрии.

Схема модуля формирования порошковых слоев показана на рис. 2а. Его основой является блок 3, выполненный из коррозионно-стойкой стали и содержащий две цилиндрические камеры с поршнями 4. Каждый поршень имеет диаметр

36 мм и снабжен индивидуальным шаговым приводом 10, обеспечивающим максимальное перемещение по вертикальной оси (оси Z) 30 мм с минимальным шагом 5 мкм. Контактующие поверхности рабочих камер и поршней имеют чистоту обработки поверхности 10 класса и притерты с зазором, не превышающим 5 мкм. Это обеспечивает перемещение полимерных частиц микронного размера без потерь, а также позволяет использовать в качестве исходных материалов их водные и спиртовые суспензии. Одна из камер выполняет функции резервуара и дозирующего устройства, а поршень второй камеры является рабочей поверхностью для процесса с.л.с., шаг перемещения которой задает требуемую толщину порошкового слоя. Перенос порошка и формирование однородного по толщине и плотного слоя на рабочей поверхности осуществляются специализированным устройством, состоящим из электрически изолированного корпуса 6, на котором закреплен механический или пьезоэлектрический активатор. Устройство имеет рабочий элемент — полированный вал 9 диаметром 8 мм, выполненный из нержавеющей стали марки 08X18H10, который вращается с необходимой скоростью вокруг своей оси. Для подавления поверхностных электростатических эффектов (приводящих к агрегации и налипанию полимерных частиц на разравнивающие поверхности) компоненты разравнивающего устройства (6, 8, 9), блока с поршнями (3, 4, 6) электрически изолированы от корпуса остальной установки и могут быть заземлены либо на них может быть подан потенциал, изменяемый в пределах  $\pm 36$  В. Управление электромеханическими приводами установки осуществляется микроконтроллером Atmel ATmega 2560 с электронной обвязкой, аналогичной описанной нами ранее в [3] и обеспечивающей функционирование четырех униполярных шаговых двигателей с номинальными рабочими токами до 1.8 А.

Фотография модуля развертки лазерного излучения представлена на рис. 26. Для спекания использовалось непрерывное излучение DPSS лазера MDL-III-405 (Changchun New Industries Optoelectronics Tech. Co., Ltd, P.R. China) 12 с длиной волны 405 нм. Лазерное излучение фокусировалось на рабочую поверхность спекаемого порошкового слоя с помощью зеркал 13 и однозеркальной гальваносканирующей системы LScanXY (Атеко, Россия) 14 с F-theta объективом TSL-405-29-55Q (Ronar-Smith, Сингапур) 15. Оптическая система позволяет собирать лазерное излучение мощностью до 100 мВт в пятно диаметром от 10 мкм, а также перемещать его по необходимой траекто-

рии по поверхности сформированного слоя 16 со скоростью от 0.1 до 100 мм/с.

Автоматическое управление лазерной частью установки обеспечивается с помощью компьютера 17 с предустановленным программным обеспечением (п.о.) LDesigner SLS (Атеко-ТМ, Россия), а управление ее механической частью — с помощью оригинального п.о. собственной разработки. Используемое п.о. обеспечивает подготовку управляющей программы, с помощью которой установка реализует процесс с.л.с. требуемого объекта по его компьютерной 3D модели.

Для удобства работы оператора и контроля поведения микрочастиц полимера в ходе формирования новых порошковых слоев в оптическом тракте установки также может быть размещена микрокамера, оборудованная телескопическим объективом. С ее помощью можно осуществлять визуальный контроль процесса спекания полимерных частиц в зоне лазерного воздействия и изучать его зависимость от параметров спекания (мощности лазерного излучения, скорости его сканирования и др.). Примеры модельных структур, сформированных с помощью описанной установки методом с.л.с. из трехмикронных сферических частиц полиметилметакрилата, синтезированных с использованием сверхкритического диоксида углерода [4], показаны на рис. 3.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН в части развития аддитивных лазерных технологий и РФФИ (17-53-10014 КО\_а) в части разработки методики синтеза порошков микронного размера.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rajesh R., Sudheer S., Mithun V.K.* // Int. J. of Current Engineering and Scientific Research. 2015. V. 2. Issue 10. P. 91.
2. *Savalani M.M., Hao L., Dickens P.M., Zhang Y., Tanner K.E., Harris R.A.* // Rapid Prototyping J. 2012. V. 18. P. 16. <https://doi.org/10.1108/13552541211193467>
3. *Минаев Н.В., Антонов Е.Н., Минаева С.А., Чурбанов С.Н.* // ПТЭ. 2019. № 1. С. 150. <https://doi.org/10.1134/S003281621901018X>
4. *McAllister T.D., Farrand L.D., Howdle S.M.* // Macromolecular Chemistry and Physics. 2016. V. 217 (20). P. 2294. <https://doi.org/10.1002/macp.201600131>