



Модернизация установок лазерной стереолитографии серии ЛС

В. В. Внук, Е. В. Ипполитов, С. В. Камаев, С. В. Козлов, М. А. Марков, М. М. Новиков, С. А. Чербыло
Институт проблем лазерных информационных технологий РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
г. Шатура, Московская обл., Россия

В статье приведена информация о модернизации установок лазерной стереолитографии, проведенной в ИПЛИТ РАН, филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в 2017–2018 годы. Рассмотрена конструкция установки лазерной стереолитографии на примере установки ЛС-250. Приведены основные технические характеристики установок серии ЛС. Рассматриваются особенности и результаты модернизации установок.

Ключевые слова: аддитивные технологии, лазерная стереолитография, компьютерное моделирование, фотополимеризация.

Статья получена: 19.07.2019. Принята к публикации: 16.09.2019.

Modernization of the Laser Stereolithography Sets LS-Series

V. V. Vnuk, E. V. Ippolitov, S. V. Kamaev, S. V. Kozlov, M. A. Markov, M. M. Novikov, S. A. Cherebyl
Institute of Laser Information Technology Problems of the Russian Academy of Sciences – Branch of the Federal Research Center for Crystallography and Photonics of the Russian Academy of Sciences, Shatura, Moscow Region, Russia

The article provides information on the modernization of laser stereolithography installations carried out at IPLIT RAS, a branch of the Federal Research Center for Crystallography and Photonics of the Russian Academy of Sciences in 2017–2018. The design of a laser stereolithography installation is considered using the LS-250 installation as an example. The main technical characteristics of the LS series units are given. The features and results of the modernization of installations are considered.

Key words: additive technologies, laser stereolithography, computer simulation, photopolymerization.

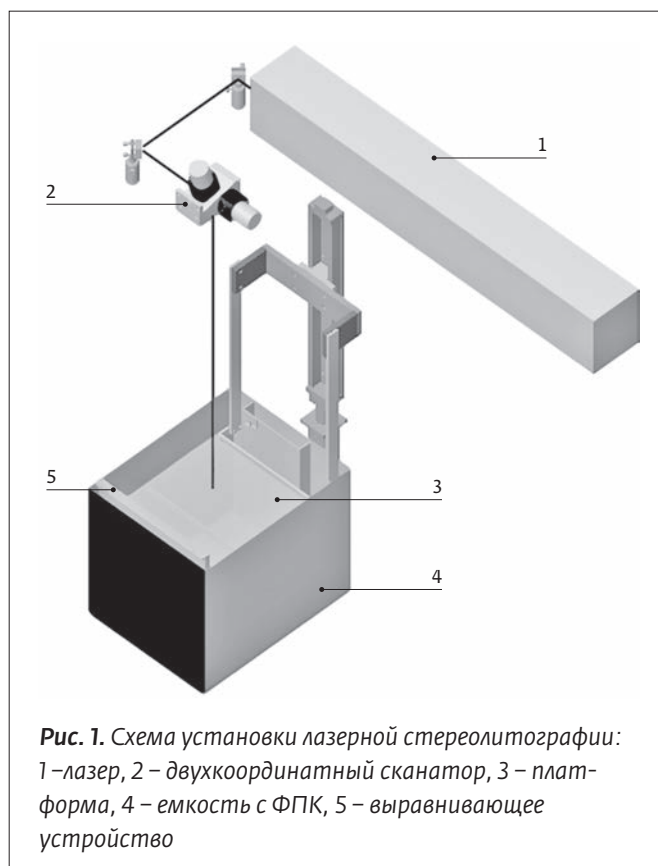
Received: 19.07.2019. Accepted: 16.09.2019.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время более конкурентоспособно производство, имеющее возможность быстрой смены ассортиментного ряда выпускаемых изделий. Увеличивается доля продукции, выпускаемой малыми сериями или в единичных экземплярах. Современные системы автоматизированного проектирования (Computer Aided Design – CAD) существенно уменьшают затраты

времени и средств на разработку изделий в электронном виде. При этом изготовление детали сложной формы в материальном виде все еще требует существенных временных и материальных затрат.

Интенсивно развивающиеся в последние годы аддитивные технологии (Additive Manufacturing – AM) позволяют значительно снизить подобные затраты. В традиционных технологиях



(фрезерование, точение) изделие формируется за счет удаления материала заготовки. Системы для АМ изготавливают деталь путем дискретного (послойного) или непрерывного добавления материала. Модели, полученные с помощью подобных устройств, имеют самое широкое применение [1-4]. Одной из технологий АМ является лазерная стереолитография (Laser Stereolithography Apparatus – SLA), с нее началось развитие аддитивных технологий [5].

В установках для лазерной стереолитографии модель изготавливается из жидкой фотополимеризующейся композиции (ФПК), отверждаемой лазерным излучением. Схема установки лазерной стереолитографии приведена на рис. 1. Излучение лазера (1), как правило ультрафиолетового диапазона, воспроизводит на поверхности жидкой фотополимеризующейся композиции тонкую полимерную пленку, повторяющую поперечное сечение модели. Коэффициент поглощения излучения достаточно велик, так что оно практически полностью поглощается в тонком (0,1-0,2 мм) слое ФПК. Управляется лазерный луч двухкоординатным сканатором (2). Переход от одного слоя к другому осуществляется путем погружения платформы (3), на которой

выращивается деталь, в емкость с жидкой ФПК (4) на глубину, равную толщине следующего слоя.

Выравнивающее устройство (5) обеспечивает равномерную толщину слоя по всей площади платформы. При полимеризации последующего слоя он приклеивается к предыдущему, что обеспечивает жесткость всего изделия. По завершении процесса модель отмывают от остатков ФПК, удаляют технологические подпорки. Затем изделие подвергается дополнительной полимеризации УФ излучением в специальной камере. Исходными материалами для технологии лазерной стереолитографии являются жидкие ФПК на акриловой или эпоксидной основе.

Основным мировым производителем оборудования для лазерной стереолитографии является компания 3DSystems (США), основанная в 1986 году. Коммерческое распространение SLA систем началось в 1988 году с момента создания установки SLA-190. В настоящее время компания выпускает системы серии ProJet и ProX [6].

УСТАНОВКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ СЕРИИ ЛС

Более 20 лет в ИПЛИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН – ведутся работы по разработке отечественной версии технологии лазерной стереолитографии [7-10]. За это время нами созданы установки лазерной стереолитографии ЛС-120, ЛС-250 и ЛС-350 для оперативного изготовления трехмерных объектов практически любой степени сложности из отверждаемых под действием лазерного излучения полимерных (в том числе композитных) материалов. Освоено производство экспериментальных образцов установок в рамках опытного производства. Также в институте разработаны ФПК ИПЛИТ-3 и ИПЛИТ-4 для применения в установках для лазерной стереолитографии [11, 12] и подобраны оптимальные параметры технологического процесса.

На рис. 2 приведены внешний вид и габаритные размеры установок ЛС-120, ЛС-250 и ЛС-350. В табл. 1 приведены основные технические характеристики установок серии ЛС. Минимальный воспроизводимый размер определяется размером лазерного пятна и означает, что геометрические особенности модели, меньшие 0,2 мм, не могут быть воспроизведены. На рис. 3 представлена конструкция установки ЛС-250.

МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТАНОВОК СЕРИИ ЛС

В 2017-2018 годы в ИПЛИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН проведены

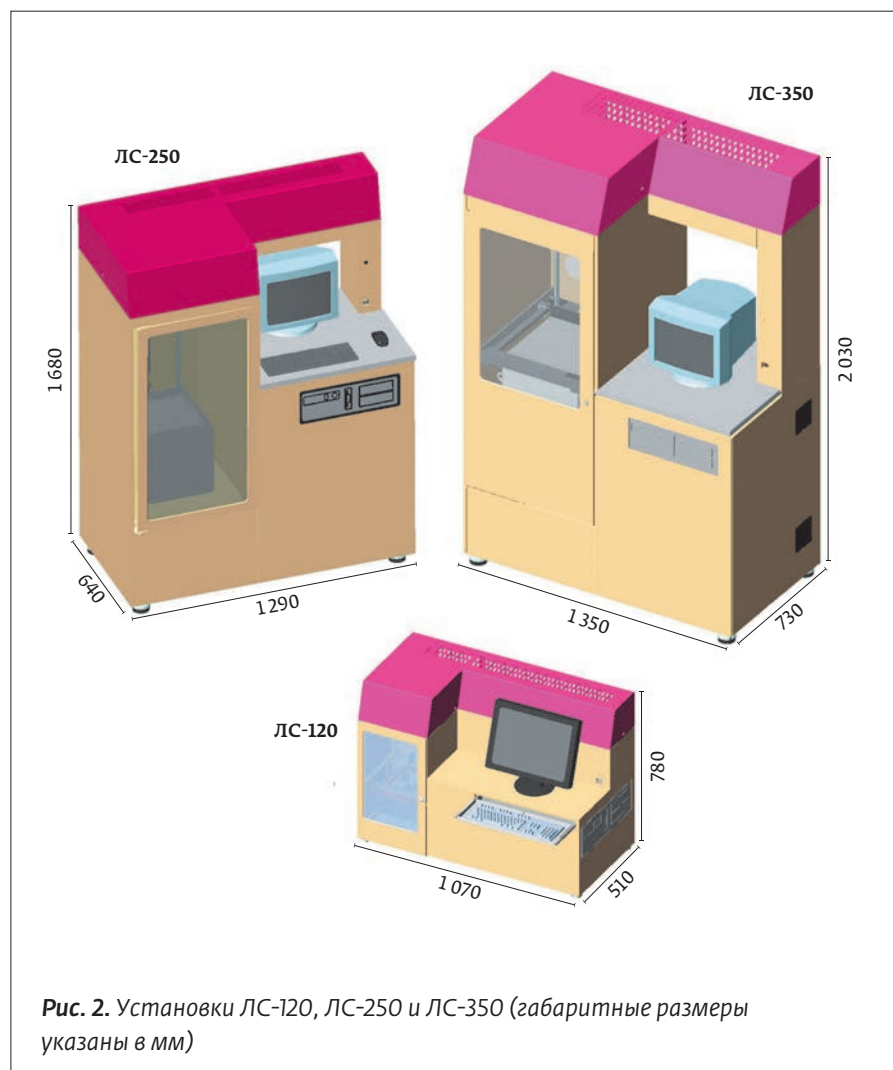


Рис. 2. Установки ЛС-120, ЛС-250 и ЛС-350 (габаритные размеры указаны в мм)

работы по модернизации установок серии ЛС, позволившие снизить себестоимость установок, их материалоемкость и ограничить применение дорогостоящих импортных комплектующих.

До сих пор для перемещения рабочей платформы по вертикали использовался линейный модуль производства Германии (фирмы BoschRexroth) серии PSK либо с собственным сервоприводом, либо с сервоприводом производства Кореи (фирмы Metronix). В настоящее время используется более дешевый линейный модуль производства КНР (фирмы HIWIN) с шаговым двигателем в качестве привода. Точность позиционирования линейного модуля PSK050 на всей длине перемещения (220 мм) составили 0,25 мм согласно протоколу испытаний, который прислан производителем. Точность позиционирования линейного модуля HIWIN KK50 длиной 250 мм согласно каталогу HIWIN Kompakt составляет 0,02 мм при повторяемости $\pm 0,003$ мм.

Таблица 1. Основные технические характеристики установок серии ЛС

Параметры	ЛС-120	ЛС-250	ЛС-350
Максимальные габариты изготавливаемой детали, мм	120 × 120 × 120	250 × 250 × 250	350 × 350 × 500
Толщина слоя, мм	0,010–0,300	0,100–0,300	0,100–0,300
Предел допустимой погрешности изготовления, мм	0,100	0,100	0,100
Отклонение размеров после дополимеризации, мм	$\pm 0,2-0,5$	$\pm 0,2-0,5$	$\pm 0,2-0,5$
Минимальный воспроизводимый размер, мм	0,2	0,2	0,2
Габаритные размеры, см	107×51×78	129×64×168	135×73×203
Вес, кг	55	300	550

Примечание: значения величин, отмеченных знаком *, зависят от геометрии детали, параметров технологии и материала

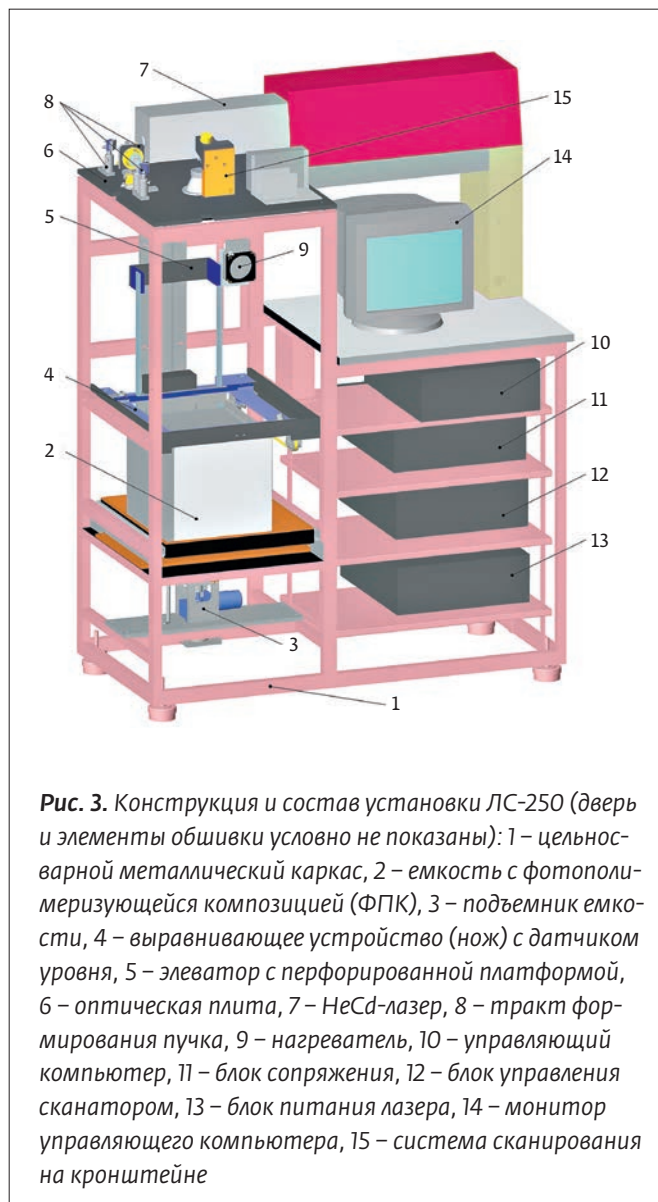


Рис. 3. Конструкция и состав установки ЛС-250 (дверь и элементы обшивки условно не показаны): 1 – цельносварной металлический каркас, 2 – емкость с фотополимеризующей композицией (ФПК), 3 – подъемник емкости, 4 – выравнивающее устройство (нож) с датчиком уровня, 5 – элеватор с перфорированной платформой, 6 – оптическая плита, 7 – HeCd-лазер, 8 – тракт формирования пучка, 9 – нагреватель, 10 – управляющий компьютер, 11 – блок сопряжения, 12 – блок управления сканатором, 13 – блок питания лазера, 14 – монитор управляющего компьютера, 15 – система сканирования на кронштейне

Выравнивающее устройство до модернизации имело в качестве базовой поверхности единую плиту, что требовало высокой точности обработки поверхности плиты, а также высококачественную систему линейного перемещения, что обеспечивалось использованием рельсовых направляющих фирмы BoschRexroth. При модернизации мы отказались от единой плиты. Две направляющие закреплены независимо с возможностью юстировки. Это позволило применить более простые цилиндрические направляющие фирмы HIWIN. Привод выравнивающего устройства также заменен с двигателя постоянного тока на шаговый двигатель.

Полностью отказались от подъемника емкости ФПК. Функцию поддержания уровня ФПК в ходе

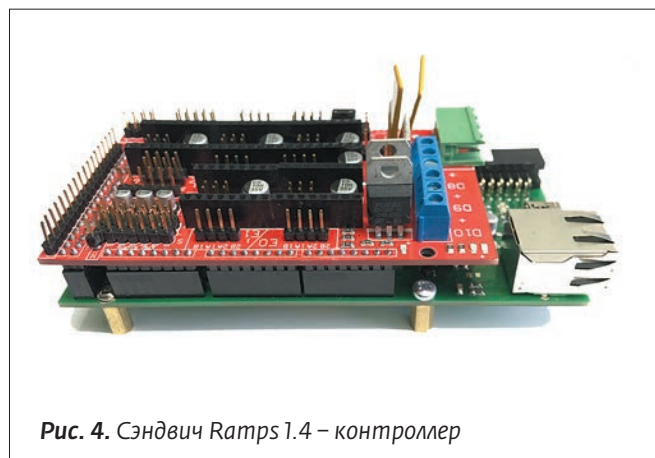


Рис. 4. Сэндвич Ramps 1.4 – контроллер

процесса теперь выполняет помпа с приводом от шагового двигателя.

Дорогостоящий импортный сканатор (использовались устройства различных фирм: Cambridge Technology, General Scanning – США) заменен на сканатор российского производства LScan-M3 (фирмы АТЕКО, Россия) [13,14]. Основные технические характеристики сканатора LScan-M3:

- оптимальная оптическая апертура 10 мм;
- максимальная оптическая апертура 15 мм;
- оптимальный момент инерции нагрузки 0,5 г·см²;
- максимальный момент инерции нагрузки 2,0 г·см²;
- угол сканирования $\pm 12,5^\circ$;
- момент инерции ротора 0,65 г·см²;
- сопротивление обмотки 7,5 Ом.

Система управления установкой построена на двух контроллерах собственной разработки. Основой каждого контроллера является 32-разрядный микроконтроллер LPC1768 на базе ядра ARM Cortex-M3 с интерфейсами Ethernet, USB2.0, 2CAN, I2S, 12-разрядным АЦП и 10-разрядным ЦАП.

Для взаимодействия контроллеров с управляющим компьютером используется Ethernet интерфейс. Один из контроллеров обеспечивает управление привода сканатора LScan-M3, а второй контроллер блока сопряжения занимается взаимодействием со всеми остальными узлами установки.

Блок управления приводами установки построен на платформе управления шаговыми двигателями Ramps 1,4, часто используемой при построении систем управления 3D-принтерами [15]. Соответственно и контроллер для взаимодействия с этой платформой спроектирован в форм-факторе платы Ramps, образуя сэндвич при сочленении (рис. 4).



Рис. 5. Установка ЛС-150

Для непосредственного управления шаговыми двигателями установки выбран 4-х канальный драйвер ТВ6560HQT 4V3 с допустимым током обмоток двигателей до 3,5 А.

Также нами исследовалась возможность замены источника когерентного ультрафиолетового излучения. До сих пор в этом качестве применялся гелий-кадмиевый лазер ГККЛ-30УМ(И) производства НПО «Плазма» (г. Рязань). Этот лазер имеет длину волны непрерывного излучения $\lambda=325$ нм и выходную мощность 30 мВт. Его основным недостатком является незначительная гарантийная наработка, составляющая всего 2000 часов. После чего приходится производить достаточно дорогостоящую процедуру замены активного элемента. Кроме того, было желательно увеличить мощность излучения, что позволило бы поднять производительность установок. Нами рассмотрены два варианта:

- диодный лазер с длиной волны излучения 405 нм и мощностью 200 мВт (модель Wv-L-405-200 производства КНР);
- твердотельный лазер с диодной накачкой (модель 3505-100 производства США) с длиной волны излучения 355 нм и средней мощностью 500 мВт.

Оба этих лазера превосходят ГККЛ-30УМ(И) по мощности и по сроку службы (средний ресурс 10 000 часов). Экспериментальные работы показали работоспособность установок типоряда ЛС с обоими вышеперечисленными лазерами без зна-

чительных изменений конструкции установки и оптической схемы.

Многие современные промышленные фотополимеризующиеся композиции для лазерной стереолитографии выпускаются в виде модификаций, приспособленных либо под длину волны излу-

Таблица 2. Основные технические характеристики установки ЛС-150, полученные после модернизации

Параметры	ЛС-150
Максимальные габариты изготавливаемой детали, мм	150 × 150 × 150
Толщина слоя, мм	0,010–0,300
Предел допустимой погрешности изготовления, мм	0,100
Отклонение размеров после дополимеризации, мм	±0,2–0,5 мм
Минимальный воспроизводимый размер, мм	0,2
Габаритные размеры, см	101 × 43 × 74
Вес, кг	30

Примечание: значения величин, отмеченных знаком *, зависят от геометрии детали, параметров технологии и материала



чения $\lambda=325$ нм, либо $\lambda=351$ нм. Разработанные в ИПЛИТ РАН смолы могут использоваться как с тем, так и с другим излучением. Различия будут проявляться лишь в файле технологии, содержащем параметры отверждения E_c и D_p , необходимые для расчета скорости рисования слоя требуемой толщины при известных значениях мощности и диаметре лазерного луча. В случае использования лазера с длиной волны 405 нм в наши смолы достаточно ввести сенсibilизатор, оптически активный в данной области и обеспечивающий поглощение излучения и передачу энергии фотоинициатору. В качестве одного из таких сенсibilизаторов мы успешно использовали недорогой кетон Михлера.

Цельносварной металлический каркас заменен на несущий корпус, в качестве управляющего компьютера использован моноблок. Все это позволило снизить массу и уменьшить габариты установки. На рис. 5 представлены фотографии установки ЛС-150 (модернизированная ЛС-120), в табл. 2 при-

ведены основные технические характеристики установки ЛС-150.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИПЛИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН – создан типоряд установок для лазерной стереолитографии серии ЛС. Освоено производство экспериментальных образцов установок для лазерной стереолитографии в рамках опытного производства института. Проведены работы по модернизации установки ЛС-120, позволившие снизить ее себестоимость, материалоемкость и ограничить применение дорогостоящих импортных комплектующих без ухудшения основных технических характеристик установки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазарев С. В., Трифонов Г. И., Бакуменко А. В. Аддитивные технологии в области реновации авиационных деталей и узлов. *Наука и военная безопасность*. 2017; 3(10):52–55.
2. Макаров М. О. Промышленные 3D-принтеры – дорогие «игрушки» или реальный путь модернизации машиностроения в России? *Фотоника*. 2018; 2(70): 222–238.
3. Зленко М. А., Попович А. А., Мутылина И. Н. *Аддитивные технологии в машиностроении*. Санкт-Петербург. 2013.
4. Камаев С. В., Марков М. А., Новиков М. М., Вермель В. Д., Евдокимов Ю. Ю., Шардин А. О., Шустов А. А., Ходунов С. В. Применение SLA-технологии при изготовлении аэродинамических моделей самолетов. *Результаты фундаментальных исследований в прикладных задачах авиационной техники*. Москва. 2016; 498–506.
5. Jacobs P. F. *Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography*. Dearborn MI: Society of Manufacturing Engineers. 1992.
6. Plastic 3D Printers. 3dsystems. 2019. URL: ru.3dsystems.com/3d-printers/plastic/ (дата обращения: 15.07.2019).
7. Евсеев А. В., Камаев С. В., Коцюба Е. В., Марков М. А., Никитин А. Н., Новиков М. М., Панченко В. Я., Низьев В. Г., Васильцов В. В. Лазерные технологии быстрого прототипирования и прямой фабрикации трехмерных объектов. *Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок* / Под ред. В. Я. Панченко. – М.: Физматлит. 2009.
8. Камаев С. В., Марков М. А., Никитин А. Н., Новиков М. М., Панченко В. Я., Лазерная стереолитография: состояние и перспективы. *Аддитивные технологии: настоящее и будущее*. Сборник докладов международной научной конференции. – ФГУП ВИАМ. 2015; 20.
9. Патент РФ № 46004. Лазерный стереолитограф ЛС-250.
10. Патент РФ № 66010. Лазерный стереолитограф ЛС-120.
11. Патент РФ № 2685211. Жидкая фотополимеризующаяся композиция для лазерной стереолитографии.
12. Патент РФ № 2395827. Жидкая фотополимеризующаяся композиция для лазерной стереолитографии.
13. Лебяжьев А. Н. Успех побуждает к его копированию. *Фотоника*. 2014; 6 (48): 4–11.
14. Нестерук И. Н. Современные гальванометрические сканаторы. *Лазеринформ*. 2007; 5 (356): 9–10.
15. RAMPS1.4/ru. RepRap. 2019. URL: reprap.org/wiki/RAMPS_1.4/ru/ (дата обращения: 15.07.2019).

REFERENCE

1. Lazarev S. V., Trifonov G. I., Bakumenko A. V. Additivnye tekhnologii v oblasti renovacii aviacionnyh detalej i uzlov. *Nauka i voennaya bezopasnost'*. 2017; 3(10):52–55.
2. Makarov M. O. Promyshlennye 3D-printery – dorigie 'igrushki' ili real'nyj put' modernizacii mashinostroeniya v Rossii? *Fotonika*. 2018; 2 (70): 222–238.
3. Zlenko M. A., Popovich A. A., Mutylina I. N. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii*. Sankt-Peterburg. 2013.
4. Kamaev S. V., Markov M. A., Novikov M. M., Vermel' V. D., Evdokimov YU.YU., SHardin A.O., SHustov A.A., Hodunov S. V. Primenenie SLA-tekhnologii pri izgotovlenii aerodinamicheskikh modelej samoletov. *Rezultaty fundamental'nyh issledovanij v prikladnyh zadachah aviacionnoy tekhnologii*. Moskva. 2016; 498–506.
5. Jacobs P. F. *Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography*. Dearborn MI: Society of Manufacturing Engineers. 1992.
6. Plastic 3D Printers. 3dsystems. 2019. URL: ru.3dsystems.com/3d-printers/plastic/(15.07.2019).
7. Evseev A. V., Kamaev S. V., Kocyuba E. V., Markov M. A., Nikitin A. N., Novikov M. M., Panchenko V.YA., Niz'ev V.G., Vasil'cov V. V. Lazernye tekhnologii bystrogo prototipirovaniya i pryamoj fabrikacii trekhmernykh ob'ektov. *Lazernye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamental'nyh issledovanij i prikladnyh razrabotok* / Pod red. V.YA. Panchenko. – M.: Fizmatlit. 2009.
8. Kamaev S. V., Markov M. A., Nikitin A. N., Novikov M. M., Panchenko V.YA., *Lazernaya stereolitografiya: sostoyanie i perspektivy*. *Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee*. Sbornik докладов mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. – FGUP VIAM. 2015; 20.
9. Patent RF № 46004. *Lazernyj stereolitograf LS-250*.
10. Patent RF № 66010. *Lazernyj stereolitograf LS-120*.
11. Patent RF № 2685211. *Zhidkaya fotopolimerizuyushchayasya kompoziciya dlya lazernoj stereolitografii*.
12. Patent RF № 2395827. *Zhidkaya fotopolimerizuyushchayasya kompoziciya dlya lazernoj stereolitografii*.
13. Lebyazh'ev A. N. Uspekh pobuzhdaet k ego kopirovaniyu. *Fotonika*. 2014; 6 (48): 4–11.
14. Nesteruk I. N. *Sovremennye gal'vanometricheskie skanatory*. *Lazerinform*. 2007; 5 (356): 9–10.
15. RAMPS1.4/ru. RepRap. 2019. URL: reprap.org/wiki/RAMPS_1.4/ru/ (15.07.2019).