

Разработка промышленной технологии селективного лазерного сплавления*И. Ф. Лебёдкин, А. А. Молотков, О. Н. Третьякова*

Работа посвящена разработке программного комплекса для реализации промышленной технологии селективного лазерного сплавления. Разработанный программный комплекс позволяет решать задачи организации эффективного производственного цикла исследования и изготовления технически сложных изделий аэрокосмической, медицинской и машиностроительной отраслей промышленности, производство которых требует высокого уровня технической оснащённости производства, больших расходов, высокой точности изготовления. В работе представлена краткая характеристика и общий алгоритм работы нескольких программных модулей, входящих в состав программного обеспечения установки селективного лазерного сплавления МЛб. Продемонстрированы практические результаты их применения.

Ключевые слова: технология, лазер, селективное лазерное сплавление, программное обеспечение ПО, моделирование, автоматизация, САМ, САД.

Ссылка: Лебёдкин И. Ф., Молотков А. А., Третьякова О. Н. // Прикладная физика. 2020. № 3. С. 83.

Reference: I. F. Lebedkin, A. A. Molotkov, and O. N. Tretiyakova, Applied Physics, No. 3, 83 (2020).

Введение

В данной работе рассматривается метод SLM (СЛС). Селективное лазерное сплавление (СЛС, англ. Selective laser melting SLM) – технология послойного аддитивного производства с использованием лазера. На сегодня отличный от классических методов производ-

ства (литьё, штамповка, токарная обработка) SLM метод аддитивного производства является быстро развивающейся технологией среди лазерных технологий производства. Высокая востребованность технологии обусловлена достижимым качеством изготовления конечного изделия: требуемыми шероховатостью, прочностью, точностью исполнительных размеров ответственных элементов изделия, минимальной толщиной изготовления конструкторско-технологических элементов формы изделия, которые могут быть гарантированы малым радиусом лазерного пятна (до 20 мкм) [1]. Применение аддитивных технологий производства функциональных изделий наиболее востребовано для нужд таких отраслей промышленности как: авиакосмическая, автомобиль- и машиностроение, приборостроение, медицинская техника, то есть там, где существует острая потребность в следующем: минимизации сборочных операций и уменьшение числа сборочных единиц, уменьшении массогабаритных характеристик изделия, изготовлении высокоточных изделий и их прототипов в кратчайшие сроки.

Лебёдкин Иван Федорович^{1,2}, аспирант, инженер.

E-mail: ivan_leb@mail.ru

Молотков Андрей Андреевич^{2,3}, м.н.с., аспирант.

E-mail: karacerr@gmail.com

Третьякова Ольга Николаевна^{2,3}, в.н.с., доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: tretiyakova_olga@mail.ru

¹ МИРЭА – Российский технологический университет. Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

² ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура», ООО «Лаборатория промышленных исследований».

Россия, 124498, Москва, Зеленоград, Георгиевский проспект, 5, стр. 1.

³ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) МАИ.

Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4.

Статья поступила в редакцию 12 мая 2020 г.

© Лебёдкин И. Ф., Молотков А. А., Третьякова О. Н., 2020

Быстрое развитие наукоемких аддитивных технологий [2] обуславливает потребность в развитии специализированного программного обеспечения. Силами Группы компаний «Лазеры и Аппаратура» разработана и создана серия станков МЛ6 [3], реализующая SLM технологию. Для обеспечения её работы разрабатывается **программный комплекс для подготовки и выполнения аддитивного производства**, позволяющий реализовывать полный технологический цикл от начального дизайна изделия до конечного изделия. В данной технологии очень важно дать разработчикам, технологам программный продукт, обеспечивающий полный цикл подготовки изделия, его верификации, путем

моделирования условий изготовления изделия и совмещение всего комплекса ПО с реально действующим оборудованием, с учетом его конфигурации и его собственного ПО. Программный комплекс задумывается как отечественный аналог программного обеспечения Materialize Magics [4] и Autodesk Netfabb [5]. Он разрабатывается по модульной схеме, что позволяет достигать высокой степени кастомизации процесса производства. На рис. 1 представлена структурная схема производственного процесса. Цель данной работы – подтвердить достоинства разработанного программного комплекса и представить результаты его практического применения.

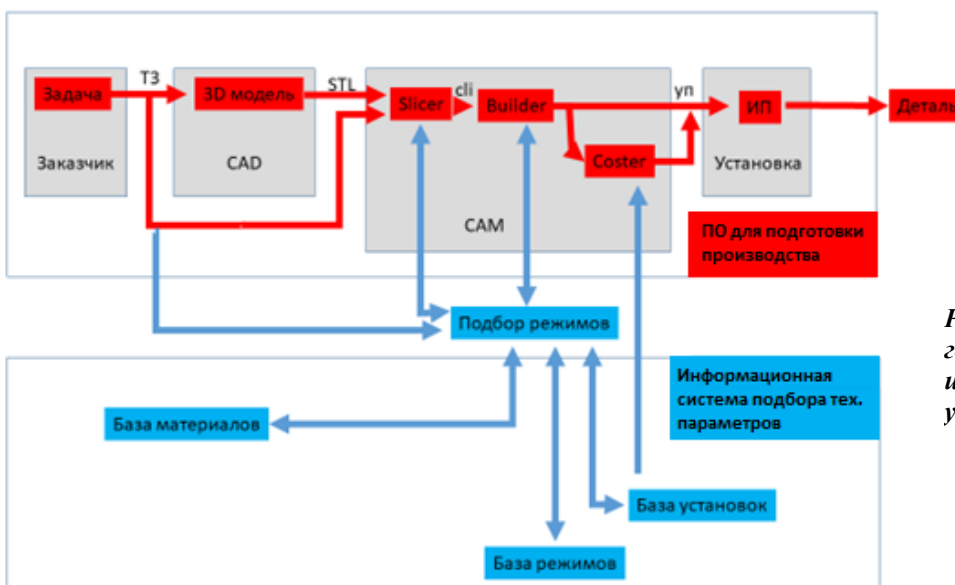


Рис. 1. Схема производственного процесса (ИП – исполняющая программа станка; УП – управляющая программа).

На данный момент ведутся работы по шести составляющим указанного программного комплекса.

1. **LASlicer** – программа для предварительного размещения деталей на платформе, построения поддерживающих конструкций и перевода модели в послойное представление (нарезка).

2. **LABuilder** – программа для формирования технического задания установки SLM.

3. **LASimulation** – программа для моделирования процесса SLM.

4. **LACoster** – программа для расчёта стоимости и времени изготовления деталей.

5. **CNC-система** установки.

6. Информационной системы подбора технологических параметров.

LASlicer

Первой программой, с которой сталкивается оператор-технолог является слайсер LASlicer, – программа для предварительного размещения деталей на платформе, построения поддерживающих конструкций и перевода модели в послойное представление (нарезка). Входными данными для LASlicer является файл поверхностной модели детали, созданный в любом САМ редакторе. Далее, можно при необходимости, манипулировать положением детали на платформе, а также менять её линейные размеры и исправлять дефекты поверхностной геометрии. Наиболее популярным форматом файла поверхностной геометрии, используемым для хранения трёхмерных

моделей объектов, в аддитивных технологиях является *.stl. Информация об объекте хранится как список треугольных граней, которые описывают его поверхность, и их нормали. STL-файл может быть текстовым (ASCII) или бинарным. Свое название получил от сокращения термина «Stereolithography», поскольку изначально применялся именно в этой технологии трехмерной печати. Благодаря своей структуре данный геометрический формат хорошо подходит для сечения на слои с получением полигонов, обозначающих границы твердого тела детали.

Технология SLM в большинстве случаев требует построения поддерживающих структур. Поэтому следующим важным шагом в процессе подготовки является создание этих поддерживающих структур, которые должны позволить решить три основные задачи в процессе последующего изготовления:

1. Упростить отделение детали от рабочей платформы.
2. Выровнять образующиеся в процессе изготовления напряжения и не допустить деформации детали.
3. Обеспечить дополнительный теплоотвод.

При этом количество поддержек должно быть минимизировано для того, чтобы уменьшить расход материала, позволить легко удалить в ходе постобработки поддержки и порошковый материал из зоны построения. На данный момент реализовано несколько типов поддержек, что позволяет подобрать более подходящую под определённую ситуацию конфигурацию. Пример поддерживающих структур представлен на рис. 2.

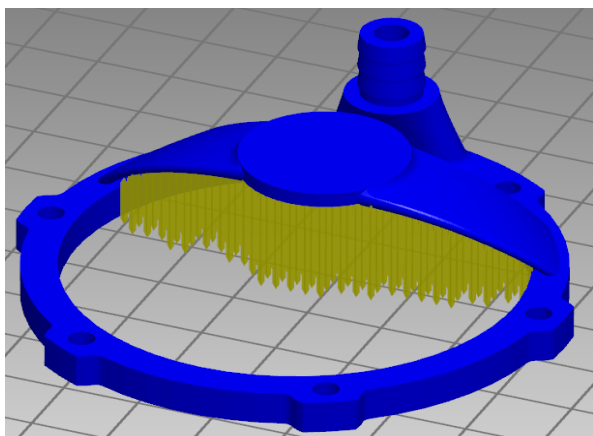


Рис. 2. Построение поддерживающих структур.

После прохождения первой стадии подготовки, деталь нарезается на слои и записывается в один из послойных форматов файла. Например, cli. Common Layer Interface (CLI) – это универсальный формат для ввода геометрических данных в системы изготовления моделей, основанные на технологиях изготовления слоев (LMT). Этот формат подходит для систем, использующих послойное фотоотверждение смолы, спекание или связывание порошка, резку листового материала, затверждение расплавленного материала и любые другие системы, которые строят модели послойно. Также имеется возможность записи в G-code и другие подходящие форматы.

На данном этапе взаимодействие с информационной системой подбора технологических параметров позволяет корректно задать толщину слоя, вид и форму поддерживающих структур, корректно расположить деталь в пространстве с точки зрения возможности построения нависающих частей, внутренних и внешних поверхностей детали, редактировать геометрию детали с учетом возможностей построения определенных форм (слишком тонкие элементы).

LABuilder

Послойная модель детали, полученная из LASlicer или сторонних слайсеров, таких как Materialise Magics, Autodesk Netfabb или Cura Slicer, становится основой для формирования технического задания станка. Исходя из этой модели, технолог определяет технологические параметры процесса последующего изготовления, такие как: мощность, скорость и размер лазерного пятна, проводит заполнение пространства детали траекториями лазера и создает дополнительные геометрические структуры для получения детали, имеющей лучшее качество и механические характеристики. Допускается создание дополнительных контуров для улучшения качества поверхности, для создания припусков и, при необходимости, контролируемой анизотропии условий затвердевания расплава на границе деталей. Также допускается создание «арматуры» в виде полос или сетки внутри пространства детали, формирование дополнительного «каркаса» и обеспечения более четкого контроля за рас-

пределением напряжений. Наиболее важной операцией на этом этапе является создание однонаправленной или разнонаправленной «штриховки» внутреннего пространства, т. е.

его заполнение траекториями лазерного пятна, для формирования внутреннего объема детали, [6, 7]. Пример заполнения пространства детали показан на рис. 3.

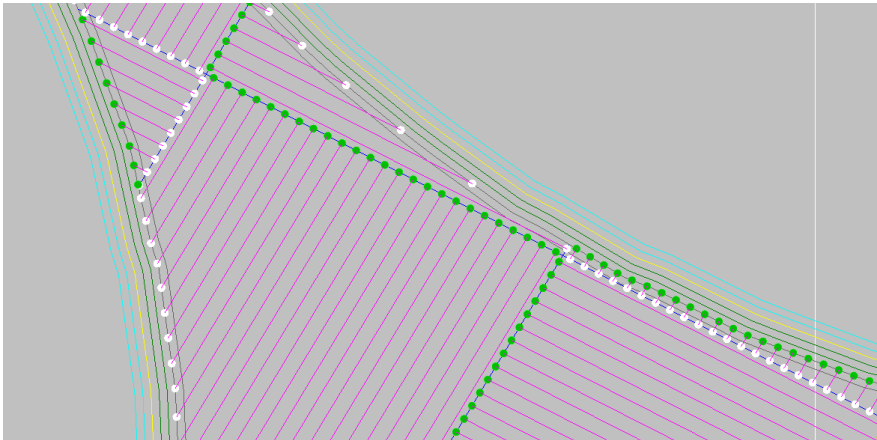


Рис. 3. Заполнение пространства детали.

На данном этапе информационная система может служить источником данных о ранее проведенных технологических экспериментах. Система подбора технологических параметров, обладая информацией об установке и используемом материале, может предоставлять рекомендуемые параметры процесса, а также накапливать подобранные технологическими параметрами для конкретной установки, конкретного материала и конкретных конструктивных требований к детали.

LASimulation и LACoster

При необходимости, для минимизации термических напряжений, областей перегрева

и деформаций, проводится математическое моделирование процессов теплообмена и анализ поля температур детали в программе LASimulation. Пример визуализации температурного поля 3D детали представлен на рис. 4. В программе LASimulation учитываются геометрические параметры детали, применяемые технологические параметры процесса, физические характеристики материала, фазовые переходы и теплообмен в процессе изготовления [6, 7]. Расчет стоимости и времени изготовления проводится в программе LACoster. Моделированию тепловых процессов в различных технологиях посвящены работы многих авторов, в частности, работы [8, 9].

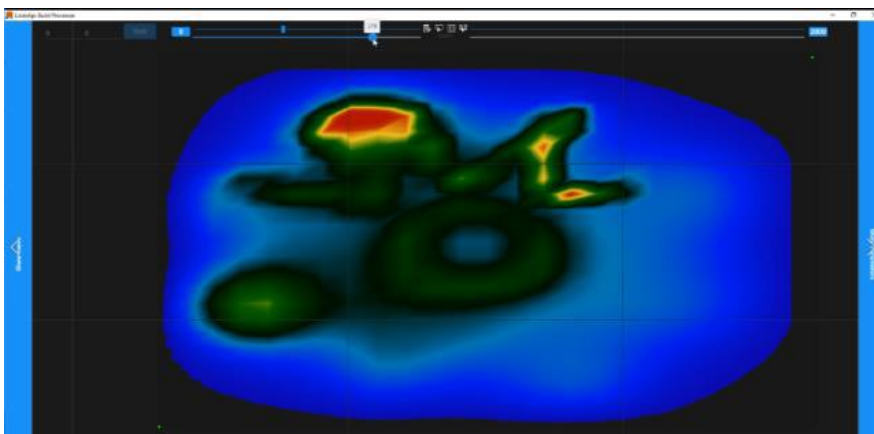


Рис. 4. Температурное моделирование.

CNC-система

Числовая система автоматического управления установкой CNC-система исполняет задания, описанные в файле техническо-

го задания, осуществляет непосредственное управление её аппаратными средствами. На данном этапе информационная система подбора технологических параметров может

аккумулировать информацию от CNC-системы, а также выступать промежуточной средой для передачи технических заданий от места, где осуществляется подготовка производства, до непосредственно самой установки SLM, с последующим контролем исполнения заданий. Разработке систем управления для различных лазерных технологических установок посвящены работы многих авторов, в частности, эти вопросы рассмотрены в работе [10].

Информационная система подбора технологических параметров

Высокая степень кастомизации процесса аддитивного производства предполагает выпуск единичных уникальных деталей либо малых их партий. Поэтому потребность в технологическом эксперименте возникает практически каждый раз при переналадке технологического оборудования для изготовления новой детали. Возникает задача снижения затрат времени и труда на проведение технологических экспериментов.

Чтобы минимизировать эти затраты необходимо автоматизировать планирование технологического эксперимента, провести моделирование физических процессов изготовления детали (теплообмен и термонапряженное состояние), а также обеспечить накопление и анализ данных экспериментов. В качестве инструмента подобной автоматизации может служить информационная система (ИС) совместимая как с ПО для подготовки и выполнения аддитивного производства, так и с CNC-системами установок аддитивного производства.

Структура информационной системы подбора технологических параметров представлена на рис. 5. Информационная система (ИС) выполнена в традиционной архитектуре клиент-серверной модели и включает в себя: базу данных, хранящую технологическую информацию, приложение WebApi для доступа к различным набором технологической информации, а также клиентское Web-приложение для контроля и анализа технологической информации.

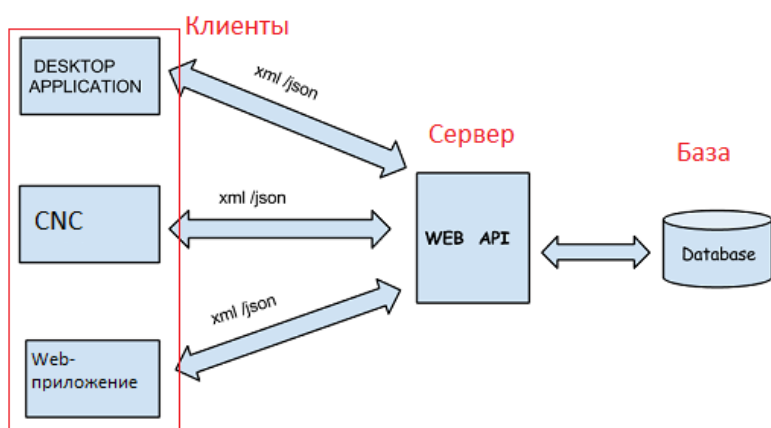


Рис. 5. Схема работы информационной системы.

Для повышения гибкости разработки и взаимодействия между информационной системой и остальными компонентами ПО для подготовки технологических заданий принят подход, при котором фиксированным (но при этом расширяемым) является протокол взаимодействия, а компоненты и конкретные реализации составных частей ИС могут меняться.

На данном этапе база данных технологических параметров может накапливать результаты предварительного моделирования тепловых деформаций. Также информационная система подбора параметров может брать на себя затратные по вычислительным ресурсам

операции моделирования теплообмена в SLM процессах. Для расчёта стоимости и времени изготовления деталей информационная система подбора параметров может выполнять оптимизацию стоимости изготовления деталей.

Таким образом, клиентское приложение не зависит от основной части ИС и может быть изменено для достижения лучшего пользовательского опыта и для адаптации под определенные нужды каждого конкретного производства, такие как, например, вывод отчетности, мониторинг работы технологического оборудования, контроль за работой над технологическими экспериментами.

Результаты

В результате проведённой подготовки, анализа и проведения SLM процесса изготовления деталей создано технологическое оборудование и программное обеспечение, позволяющее получать деталь высокой геометрической сложности и точности из широкого спектра материалов таких как медь, алюминий, различные виды стали, а также ма-

териалов, которым свойственно быстрое окисление в кислородной среде, что затрудняет процесс производства, такие как титан, а также уменьшить в определённых случаях в разы массогабаритные характеристики изделия и исключить слабые места конструкции. Примеры деталей, изготовленных на установках серии МЛ6 с помощью SLM технологии представлены на рис. 6.



Рис. 6. Образцы деталей, полученных на установках серии МЛ6 в результате проведённых работ.

Разработанный программный комплекс, являющийся неотъемлемой частью реализованной SLM технологии аддитивного производства, позволяет в короткие сроки налаживать мелкосерийное и технологически сложное производство ответственных функциональных изделий. Дальнейшие работы по его совершенствованию будут нами продолжены.

Работа выполнена в сотрудничестве с ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» и ООО «Лаборатория промышленных исследований» при софинансировании Фонда содействия развитию малых предприятий в научно-технической сфере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чемодуров А. Н. // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. № 8-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-additivnyh-tehnologiy-v-proizvodstve-izdeliy-mashinostroeniya> (дата обращения: 25.04.2020).
2. Объем отечественного рынка 3D-печати оценивается в шесть миллиардов рублей. 03.10.2018 // 3dtoday: [Электронный ресурс]. URL: <https://3dtoday.ru/>

blogs/news3dtoday/the-size-of-the-domestic-market-of-3d-printing-is-estimated-at-six-bil/ (дата обращения: 20.04.2020).

3. Каталог аддитивного оборудования, производимого на территории Российской Федерации. 2019 // МИНПРОМТОРГ России. URL: http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/katalog_additivity.pdf (дата обращения: 20.04.2020).

4. Materialise. Software. Magics // Materialise: [сайт]. URL: <https://www.materialise.com/en/software/magics>

5. Autodesk. Products. Netfabb. Overview // Autodesk: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.autodesk.ru/products/netfabb/overview>

6. Лебёдкин И. Ф., Молотков А. А., Третьякова О. Н. Математическое моделирование сложного теплообмена при разработке лазерных SLM технологий // Труды МАИ. Электронный журнал. ISSN: 1727-6924, № 101, 2018.

7. Molotkov A. A., Tretiyakova O. N. On possible approaches to visualizing the process of selective laser melting/ Scientific Visualization, 2019. Vol. 11. № 4. P. 1–12. DOI: 10.26583/sv.11.4.01 <http://sv-journal.org/2019-4/?lang=en>

8. Кондратенко В. С. Лазерная обработка материалов. Сборник статей // Монография. – М.: «Наука и технологии». 2011. – 390 с. ISBN 978-593952-039-3.

9. Голубятников И. В., Кондратенко В. С., Жималов А. Б. // Приборы. 2009. № 12. С. 1.

10. Кондратенко В. С., Третьякова О. Н. Проблемы создания новых лазерных технологий. – М.: Изд-во МАИ, 2018. – 160 с. ISBN 978-5-4316-0526-0

Development of industrial technology of selective laser melting

I. F. Lebedkin^{1,2}, A. A. Molotkov^{2,3}, and O. N. Tretyakova^{2,3}

¹ MIREA – Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., 119454, Russia

² SPC "Lasers and equipment" LLC, Industrial Research Laboratory LLC
Bd. 1, 5 Georgievsky Prospekt, Moscow, Zelenograd, 124498, Russia

³ Moscow Aviation Institute (National Research University)
4 Volokolamsk highway, Moscow, 125993, Russia

Received May 12, 2020

The paper presents a development of a software package for the implementation of industrial technology of selective laser melting. The developed software package allows us to solve the problems of organizing an effective production cycle for research and manufacturing of technically complex products of the aerospace, medical and engineering industries, the production of which requires a high level of technical equipment of production, high costs and high precision manufacturing. The paper presents a brief description and a general algorithm for the operation of several software modules included in the software for the industrial processing plant ML6 selective laser melting. The practical results of their application are demonstrated.

Keywords: technology, laser, selective laser melting, software, modeling, automation, CAM, CAD.

REFERENCES

1. A. N. Chemodurov, Application of additive technologies in the manufacture of engineering products // Bulletin of the TulSU. Technical science. 2016. No. 8-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-additivnyh-tehnologiy-v-proizvodstve-izdeliy-mashinostroeniya> (accessed: 04.25.2020).
2. The volume of the domestic 3D printing market is estimated at six billion rubles. 10/03/2018 // 3dtoday: [site]. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/the-size-of-the-domestic-market-of-3d-printing-is-estimated-at-six-bil/> (accessed: 04/20/2020).
3. Catalog of additive equipment manufactured in the Russian Federation. 2019 // MINPROMTORG of Russia URL: http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/katalog_additivity.pdf (accessed: 04/20/2020).
4. Materialize. Software Magics // Materialize: [site]. URL: <https://www.materialise.com/en/software/magics>
5. Autodesk. Products Netfabb Overview // Autodesk: [site]. URL: <https://www.autodesk.ru/products/netfabb/overview>
6. I. F. Lebydkin, A. A. Molotkov, and O. N. Tretyakova, Mathematical modeling of complex heat transfer in the development of laser SLM technologies, Transactions of MAI. Electronic Journal, ISSN: 1727-6924, No. 101, 2018.
7. A. A. Molotkov and O. N. Tretyakova, On possible approaches to visualizing the process of selective laser melting / Scientific Visualization, 2019, vol. 11, number 4, pp. 1–12, DOI: 10.26583 / sv.11.4.01 <http://sv-journal.org/2019-4/?lang=en>
8. V. S. Kondratenko, *Laser processing of materials. Collection of articles* ("Science and Technology", Moscow, 2011). ISBN 978-593952-039-3.
9. I. V. Golubyatnikov, V. S. Kondratenko, and A. B. Zhimalov, Instruments, No. 12, 1 (2009).
10. V. S. Kondratenko and O. N. Tretyakova, *Problems of creating new laser technologies* (Publisher MAI, Moscow, 2018). ISBN 978-5-4316-0526-0