



УДК 621.791.725, 621.373.826

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТА ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Ю.В. Федосов<sup>a,b</sup>, М.Я. Афанасьев<sup>a</sup><sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация<sup>b</sup> ОАО «Российский институт мощного радиостроения», Санкт-Петербург, 199048, Российская Федерация

Адрес для переписки: yf01@yandex.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 01.11.16, принята к печати 21.12.16

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-191-195

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Федосов Ю.В., Афанасьев М.Я. Устройство для обработки лазерным излучением поверхности объекта произвольной формы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 1. С. 191–195. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-191-195

### Аннотация

Рассмотрен новый подход к проектированию технологического оборудования для обработки лазерным излучением поверхности объекта свободной формы. Рассмотрены преимущества и недостатки конструкции станка для лучевой обработки заготовок с управлением фокусировкой луча. Предложена новая схема, позволяющая улучшить оптические характеристики устройства за счет уменьшения числа переотражений в коллимирующей системе. Основой предлагаемого механизма является двухкоординатный стол с числовым программным управлением. В качестве исполнительного устройства использована оптическая головка с возможностью регулировки фокусного расстояния и системой стабилизации лазерного луча, основанной на модифицированной платформе Стюарта. Лазерное излучение ультрафиолетового диапазона передается от источника лазерного излучения через оптическое волокно. Предложенное решение реализовано в экспериментальной установке для селективного отверждения фотополимеров.

### Ключевые слова

технологическое оборудование, лазерная обработка, ЧПУ, оптическое приборостроение, оптическое волокно

## APPARATUS FOR SURFACE TREATMENT OF FREE-FORM OBJECT BY LASER RADIATION

Yu.V. Fedosov<sup>a,b</sup>, M.Ya. Afanasiev<sup>a</sup><sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation<sup>b</sup> JSC “Russian Institute for Power Radiobuilding”, Saint Petersburg, 199048, Russian Federation

Corresponding author: yf01@yandex.ru

### Article info

Received 01.11.16, accepted 21.12.16

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-191-195

Article in Russian

**For citation:** Fedosov Yu.V., Afanasiev M.Ya. Apparatus for surface treatment of free-form object by laser radiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 191–195. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-191-195

### Abstract

The paper proposes a new approach to the design of the technological equipment used for surface treatment of a free-form object by laser radiation. Design advantages and disadvantages of the similar laser cutting machine with beam focusing control are considered. We propose a new scheme that improves the optical characteristics of the device by reducing the number of reflections in the collimating system. The base for the proposed mechanism is XY table with numerical control. The driven element of the apparatus is the optical head with the ability to adjust the focal distance and the system of beam stabilization based on a modified Stewart platform. Laser radiation of the ultraviolet range is transmitted from the laser source through the optical fiber. A proposed solution is implemented in experimental device for selective polymer curing.

### Keywords

manufacturing equipment, laser processing, CNC, optical instrumentation, optical fiber

В настоящее время происходит интенсивное развитие интеллектуального промышленного оборудования. Как правило, такое оборудование обладает большой степенью автоматизации, имеет возможность работы в составе единой информационной среды, а также может быстро перенастраивать свои параметры работы при переходе от одного изделия к другому. К такому оборудованию относятся различные роботизированные системы, автоматические упаковщики и маркировщики, станки с числовым программным управлением (ЧПУ) и 3D-принтеры, манипуляторы для установки компонентов на печатные платы и т.д.

Также непрерывно увеличивается номенклатура технологического оборудования, которое использует различные электрохимические и электрофизические способы обработки деталей и заготовок, а также обработку при помощи ультразвука или лазерного излучения. Так, например, в промышленности широко применяется автоматизированная лазерная сварка или раскрой листового материала. Зачастую такая обработка ведется не только в двух координатах, но по трехмерной траектории, что требует использования сложных оптических схем для доставки излучения в рабочую точку.

В настоящей работе будет рассмотрена оптико-механическая система, реализующая технологию лазерной обработки, сходную с технологией изготовления трехмерных схем на пластике, которая в литературе обычно обозначается английской аббревиатурой 3D-MID. В частности, одна из ее реализаций, именуется LDF (Laser Direct Structuring process – технология прямого лазерного структурирования). Данный процесс лазерной обработки фотополимера, нанесенного на поверхность сложной формы, является патентованной технологией компании LPKF Laser & Electronics AG. Отличие предлагаемой системы заключается в том, что рассматриваемая система имеет более гибкую архитектуру, пригодную для более широкого круга технологических задач.

Суть проблемы, решаемой предлагаемой установкой, заключается в следующем.

- Существуют полимеры, отверждаемые ультрафиолетовым (УФ) излучением, которые могут быть использованы в различных технологических процессах.
- Данные полимеры могут быть нанесены как на ровную поверхность, так и на поверхность произвольной формы. Соответственно, для их селективного отверждения лазерным лучом требуется установка, способная вести обработку по сложной пространственной траектории.
- Исполнительное устройство такой установки (лазерная головка) должно осуществлять перемещение как минимум по пяти координатам. Также система должна обеспечивать постоянство фокусного расстояния при обработке любой части поверхности.
- При этом необходимо добиться, чтобы луч в процессе обработки всегда располагался по нормали к обрабатываемой поверхности. В противном случае исходная форма пятна будет искажена.
- Если лазерное излучение УФ диапазона будет передаваться с использованием системы зеркал, то оно из-за своих физических свойств (малой длины волны) будет очень быстро ослабевать.
- Известно, что при подаче УФ излучения по оптоволокну при больших значениях изгиба волокна излучение передается полнее – это обусловлено высоким полным внутренним коэффициентом отражения в волокне.
- Исходя из двух предыдущих утверждений, наиболее целесообразно передавать излучение именно по волокну. В дополнение к этому исчезает необходимость точной установки зеркал, их изготовления и обслуживания.

Патентный анализ и анализ литературы показали, что на сегодняшний день не существует установок, сходных с предлагаемой по всем характеристикам. Наиболее близким аналогом предлагаемой установки можно считать устройство для лазерной резки с управляемой фокусировкой луча. Его подробное описание можно найти в патенте [1].

Станок содержит источник лазерного излучения и оптическую систему, состоящую из пяти зеркал, которая направляет лазерное излучение в лазерную головку, оснащенную оптико-механической системой, осуществляющей фокусировку лазерного излучения так, что при перемещении лазерной головки вдоль вертикальной оси  $Z$  обеспечивается фокусировка лазерного излучения на нужном расстоянии от горизонтальной базовой плоскости. При этом наряду с возможностью перемещения вдоль вертикальной оси  $Z$ , лазерная головка также имеет возможность перемещения вдоль горизонтальных осей  $X$  и  $Y$ , что позволяет вести обработку объектов, располагаемых на рабочем столе, в трех взаимно перпендикулярных координатах.

Отметим, что наличие системы из пяти зеркал для направления лазерного излучения в лазерную головку усложняет сборку и настройку устройства, увеличивает его габаритные размеры и снижает мощность излучения, достигающего до лазерной головки вследствие пятикратного переотражения луча. Кроме этого, реализуемая система перемещения лазерной головки не позволяет проводить обработку сложных криволинейных поверхностей, выдерживая лазерный луч перпендикулярно касательной к данной поверхности.

Другим недостатком рассмотренного устройства является то, что в нем не предусмотрены средства, обеспечивающие возможность автоматического перемещения лазерной головки вдоль оси  $Z$  и поворот

вокруг осей  $X$  и  $Y$  в процессе обработки поверхности объекта. Последнее вызывает необходимость ручной перенастройки рабочего положения лазерной головки при переходе от участка с одной формой поверхности к участку с другой. Также к недостаткам устройства относятся большие габаритные размеры и сложная, состоящая из зеркал, оптическая система, вносящая значимые потери в лазерное излучение в процессе его доставки от источника излучения до лазерной головки. Все это ограничивает область применения устройства [2].

Помимо рассмотренного выше станка, можно представить некоторую гибридную систему, использующую в качестве исполнительного механизма промышленного робота. Однако подобные системы не рассматривались в силу их избыточности и дороговизны.

Предлагаемое устройство для обработки лазерным излучением поверхности произвольной формы состоит из неподвижного рабочего стола, предназначенного для размещения обрабатываемого объекта, лазерной головки, размещенной над рабочим столом с возможностью перемещения в горизонтальной плоскости в двух координатах, а также источника лазерного излучения, оптически связанного с лазерной головкой.

В отличие от устройства, рассмотренного ранее, оптическая связь лазерной головки с источником лазерного излучения осуществлена с помощью оптического волокна. Коллимирующая оптическая система лазерной головки размещена на модифицированной платформе Стюарта [3–5], имеющей четыре тяги вместо шести, что дает платформе три степени свободы: два наклона во взаимно перпендикулярных плоскостях и движение вдоль оптической оси объектива вверх и вниз. Кинематическая схема платформы представлена на рис. 1.

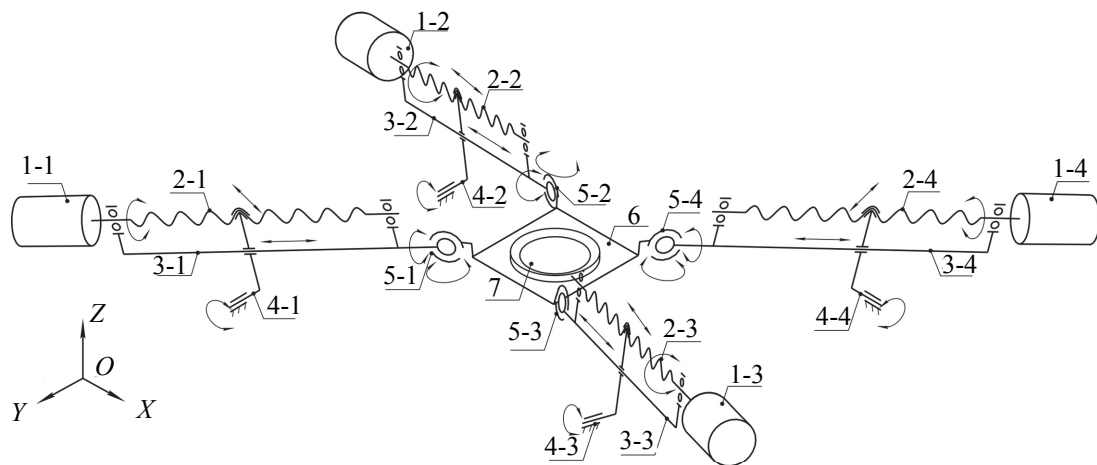


Рис. 1. Кинематическая схема лазерной головки: 1 – двигатели; 2 – ходовые винты; 3 – направляющие; 4 – петли; 5 – шаровые опоры; 6 – подвижная платформа; 7 – объектив

Оптическая часть головки представляет собой объектив, соединенный с оптическим вводом волокна. Объектив состоит из трех линз, осуществляющих фокусировку лазерного луча. Расчетный диаметр пятна в точке фокуса – 250 мкм. Подстройка фокусного расстояния осуществляется за счет синхронного изменения длин тяг модифицированной платформы Стюарта, а оптическая стабилизация – за счет наклона объектива (4 тяги позволяют отклонять объектив в двух взаимно перпендикулярных плоскостях). Оптическая схема объектива представлена на рис. 2.

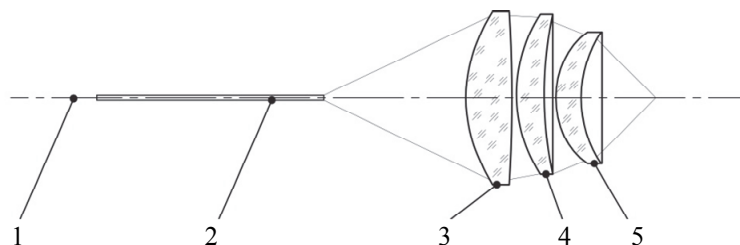


Рис. 2. Оптическая схема объектива: 1 – главная оптическая ось; 2 – оптическое волокно; 3–5 – фокусирующие линзы

Общая схема устройства представлена на рис. 3. Работа рассматриваемого устройства происходит следующим образом [6, 7]. На рабочем столе 1 размещается обрабатываемый объект 2. Включается механизм прецизионного перемещения, который подводит лазерную головку 5 к реперной точке объекта. Включается источник лазерного излучения 3, излучение от которого по оптическому волокну 4 через

ввод 8 и коллимирующую оптическую систему 9 поступает на поверхность обрабатываемого объекта. Далее механизм прецизионного перемещения 6 под управлением контроллера 7 перемещает в двух координатах  $X$  и  $Y$  лазерную головку 5, а механизм управления платформой Стюарта 10 перемещает коллимирующую оптическую систему так, чтобы выходное излучение из линзы коллимирующей системы было постоянно перпендикулярно к криволинейной поверхности обрабатываемого объекта [8].

Стоит отметить, что лазерная головка полностью автономна и имеет свой собственный контроллер и датчики, позволяющие ей осуществлять автокалибровку и самодиагностику. С точки зрения управления установка не является единым целым и не подчинена общему алгоритму управления. Вместо этого предлагается модульный подход, где каждая часть установки является физическим агентом, автономно решающим свою собственную задачу. Коммуникация между модулями сведена к минимуму. В частности, головка получает от контроллера управления сигнал на включение и выключение, а также сообщает ему свой текущий статус (готова к работе, не готова к работе, внутренняя ошибка).

Таким образом, за счет размещения коллимирующей системы лазерной головки на платформе Стюарта и использования оптического волокна для подвода лазерного излучения к лазерной головке, а также модульности системы управления обеспечивается возможность автоматизации процесса обработки поверхностей произвольной формы объекта при одновременном снижении потерь лазерного излучения при его доставке от источника излучения до лазерной головки. Также достигается возможность автоматической подстройки фокусного расстояния и оптическая стабилизация, необходимая для компенсации вибраций, неизбежно возникающих в устройствах подобного рода.

На основе предложенного подхода реализована экспериментальная установка для селективного отверждения пленочного фоторезиста на поверхности фольгированного стеклотекстолита. Проведенные эксперименты подтвердили состоятельность спроектированной конструкции.

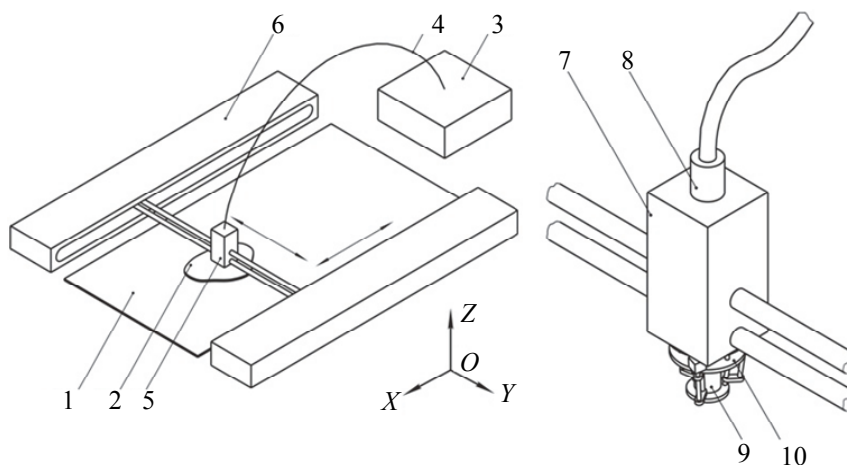


Рис. 3. Схема устройства для обработки лазерным излучением: 1 – рабочий стол; 2 – обрабатываемый объект; 3 – источник лазерного излучения; 4 – оптическое волокно; 5 – лазерная головка; 6 – механизм перемещения; 7 – контроллер управления лазерной головкой; 8 – оптический ввод; 9 – коллимирующая система; 10 – модифицированная платформа Стюарта

### Литература

1. Klingel H., Weick J.M. Laser Cutting Machine with Focus Maintaining Beam Delivery. Patent US5667707. Publ. 16.10.1997.
2. Вакс Е.Д., Миленский М.Н., Сапрыкин Л.Г. Практика прецизионной лазерной обработки. М.: Техносфера, 2013. 711 с.
3. Dasgupta B., Mruthyunjaya T. The Stewart platform manipulator: a review // *Mechanism and Machine Theory*. 2000. V. 35. N 1. P. 15–40. doi: 10.1016/S0094-114X(99)00006-3
4. Gatringer H., Naderer R., Bremer H. Modeling and Control of a Pneumatically Driven Stewart Platform / In: *Motion and Vibration Control* / Eds. H. Ulbrich, L. Ginzinger. Dordrecht: Springer, 2009. P. 93–102. doi: 10.1007/978-1-4020-9438-5\_10
5. Stewart D. A platform with six degrees of freedom // *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers*. 1965. V. 180. N 15. P. 371–386. doi: 10.1243/PIME\_PROC\_1965\_180\_029\_02
6. Афанасьев М.Я., Федосов Ю.В. Устройство для

### References

1. Klingel H., Weick J.M. *Laser Cutting Machine with Focus Maintaining Beam Delivery*. Patent US5667707, publ. 16.10.1997.
2. Vaks E.D., Milen'kii M.N., Saprykin L.G. *Praktika Pretsizionnoi Lazernoii Obrabotki* [Practice of Precision Laser Machining]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2013, 711 p.
3. Dasgupta B., Mruthyunjaya T. The Stewart platform manipulator: a review. *Mechanism and Machine Theory*, 2000, vol. 35, no. 1, pp. 15–40. doi: 10.1016/S0094-114X(99)00006-3
4. Gatringer H., Naderer R., Bremer H. Modeling and Control of a Pneumatically Driven Stewart Platform. In: *Motion and Vibration Control*. Eds. H. Ulbrich, L. Ginzinger. Dordrecht, Springer, 2009, pp. 93–102. doi: 10.1007/978-1-4020-9438-5\_10
5. Stewart D. A platform with six degrees of freedom. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers*, 1965, vol. 180, no. 15, pp. 371–386. doi: 10.1243/PIME\_PROC\_1965\_180\_029\_02
6. Afanasev M.Ja., Fedosov Ju.V. *Apparatus for Laser*

- обработки лазерным излучением поверхности произвольной формы. Патент RU 161667. Бюл. 2016. № 12.
7. Афанасьев М.Я., Федосов Ю.В. Оптико-механическая система. Патент RU 2583163. Бюл. 2016. № 12.
  8. Song M.G., Park N.C., Park K.S., Park Y.P. Improvement of an asymmetric actuator for optical image stabilization // *Microsystem Technologies*. 2011. V. 17. N 5. P. 1231–1241. doi: 10.1007/s00542-011-1264-4
7. Afanasev M.Ja., Fedosov Ju.V. *Optical-Mechanical System*. Patent RU 2583163, 2016.
  8. Song M.G., Park N.C., Park K.S., Park Y.P. Improvement of an asymmetric actuator for optical image stabilization. *Microsystem Technologies*, 2011, vol. 17, no. 5, pp. 1231–1241. doi: 10.1007/s00542-011-1264-4

#### Авторы

**Федосов Юрий Валерьевич** – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер, ОАО «Российский институт мощного радиостроения», Санкт-Петербург, 199048, Российская Федерация, yf01@yandex.ru

**Афанасьев Максим Яковлевич** – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, amax@niuitmo.ru

#### Authors

**Yuri V. Fedosov** – PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; engineer, JSC “Russian Institute for Power Radiobuilding”, Saint Petersburg, 199048, Russian Federation, yf01@yandex.ru

**Maxim Ya. Afanasiev** – PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, amax@niuitmo.ru