

УДК 62-519

# Управление робототехническим комплексом фемтосекундной лазерной микрообработки изделий\*

Р.В. Чкалов, Д.А. Кочуев, А.С. Черников, К.С. Хорьков

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

## Robotic system control in a product femtosecond laser micro-processing

R.V. Chkalov, D.A. Kochuev, A.S. Chernikov, K.S. Khorkov

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

Развитие лазерных робототехнических комплексов для микрообработки изделий — одно из основных направлений в сфере промышленной робототехники, обещающее новые возможности и перспективы в области микрообработки материалов. Современные лазерные робототехнические комплексы способны работать с материалами любой твердости и степени сложности, обеспечивая высочайший уровень точности и качества обработки. Благодаря автоматизированным системам управления и программирования они могут выполнять задачи микрообработки с максимальной скоростью и эффективностью. Совершенствование автоматизированных комплексов, обладающих функционалом оперативного мониторинга режимов, параметров обработки изделий и контроля хода технологического процесса, является актуальной задачей для современного наукоемкого предприятия. Лазерные системы широко применяют для решения технологических задач микрообработки — обработки изделий лазерным излучением, сфокусированным в пятно диаметром единиц микрон, с целью изменения физико-химических, оптических и других эксплуатационных свойств материалов. Предложенная структура системы управления фемтосекундным лазерным робототехническим комплексом обеспечивает синергетическое объединение узлов мехатронных, оптомеханических, электронных и компьютерных компонентов лазерного робототехнического комплекса, реализует средства графического и аналитического построения траектории обработки, процедуру автоматизированного поиска положения фокуса оптической системы.

EDN: TJPPTO, <https://elibrary/tjppto>

**Ключевые слова:** фемтосекундная лазерная микрообработка, лазерный робототехнический комплекс, оперативный мониторинг режимов, аппаратно-программные средства

Design and development of the laser robotic systems for micro-processing is one of the key areas in industrial robotics promising new opportunities and prospects in the materials micro-processing. Modern laser robotic systems are able to operate with materials of any hardness and complexity; they provide the highest processing accuracy and quality levels.

\* Работы по расширению возможностей аппаратно-программного комплекса для управления составными элементами установки выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10348. Разработка тестовых моделей для проверки работоспособности комплекса проведена за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-20015. Работы по формированию оптоэлектронных элементов выполнены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0019, госзадание ВлГУ).

Due to the automated control and programming systems, they are able to perform the micro-processing tasks with maximum speed and efficiency. Improvement of the automated systems monitoring the operational mode functionality, parameters of the product processing and control of the technological process is an urgent task for a modern science-intensive enterprise. Laser systems are widely used to solve the micro-processing technological problems, i.e. product processing with the laser radiation focused onto a spot with a diameter of several microns, in order to change the material physicochemical, optical and other operational properties. The proposed structure of the femtosecond laser robotic system control provides synergetic unification of the mechatronic, optomechanical, electronic and computer component units of the laser robotic system, implements the means of graphic and analytical construction of the processing trajectory, as well as the procedure of automated search for the optical system focus position.

EDN: TJPPTO, <https://elibrary/tjppto>

**Keywords:** femtosecond laser micro-processing, laser robotic system, operational mode monitoring, hardware and software

Совершенствование автоматизированных комплексов, обладающих функционалом оперативного мониторинга режимов, параметров обработки изделий и контроля хода технологического процесса является актуальной задачей для современного наукоемкого предприятия. На протяжении многих лет в центре внимания многих ученых остаются проблемы взаимодействия и управления высокоточных лазерных комплексов и систем [1–4]. Возможности применения лазерного излучения с использованием алгоритмов и аппаратно-программных средств управления позволяют решать сложные задачи обработки материалов [5–7].

Цель статьи — разработка лазерного робототехнического комплекса (ЛРК) для обеспечения процессов диагностики и лазерной микрообработки изделий в соответствии с требованиями к видам реализуемых технологических операций.

При разработке фемтосекундного ЛРК использован модульный принцип построения, что позволяет настроить требуемую конфигурацию установки под конкретную задачу обработки [8–11].

По функциональным возможностям аппаратно-программные модули ЛРК можно условно подразделить на базовые и специализированные. К базовым относятся задействованные для проведения большинства видов технологических задач модули позиционирования изделия в пространстве (система перемещения), видеорегистрации, транспортировки и фокусировки излучения, лазерный модуль (источник лазерного излучения) и др., а также управляющее программное обеспечение.

Специализированные модули предназначены для решения конечных технологических задач с целью повышения производительности процесса, либо качественного улучшения достигаемого результата [12–15]. К специализированным модулям разработанного ЛРК относятся программный модуль генерации слоя записываемых оптических структур, программный пакет алгоритмов для процедуры микрообработки изделий, аппаратно-программный модуль z-сканирования, модуль генерации электростатического поля, драйвер лазерных диодов и др. Каждый из задействованных модулей обладает механизмами интеграции в составе единого комплекса.

В качестве устройства управления исполнительными элементами ЛРК выступает блок обработки, осуществляющий контроль и распределение команд внешних устройств управления и мониторинга. Структурная схема взаимодействия аппаратных модулей ЛРК с блоком обработки данных и внешними устройствами управления показана на рис. 1.

Первичной задачей создания экспериментальной установки является анализ исходных компонентов будущей системы, определение базового функционала, составляющего ядро ЛРК и обеспечивающего выполнение поставленных задач.

Основными компонентами ЛРК является следующее технологическое и контрольно-измерительное оборудование:

- фемтосекундный источник лазерного излучения;
- мехатронный модуль пространственного позиционирования объекта обработки — нанопозиционная платформа, линейный и поворотный трансляторы;

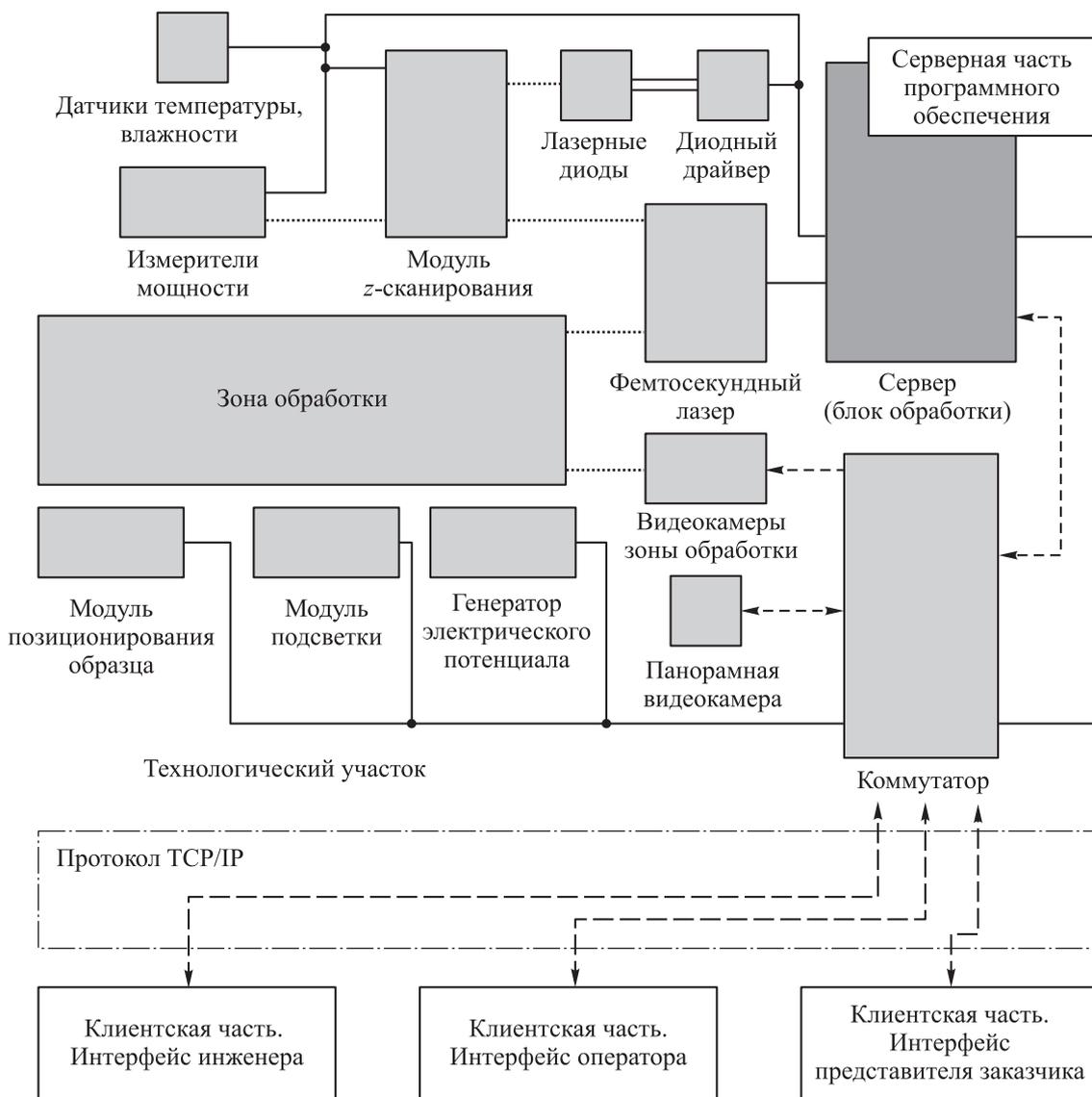


Рис. 1. Структурная схема ЛПК:

— USB-соединения; == канал передачи аналоговых сигналов;  
 ..... оптический канал связи; - - - соединения по протоколу TCP/IP

- видеокамеры для регистрации изображения оптического стола и мониторинга изображения объекта в зоне лазерной микрообработки;
- контрольно-измерительные приборы — измерители мощности излучения и фотоприемники.

Задача интеграции подразумевает поиск оптимальных методов внедрения обособленных компонентов с целью обеспечения слаженной работы в составе единой системы [16].

Главным компонентом ЛПК является фемтосекундная лазерная система Yb:KGW, имеющая следующие характеристики: длина волны излучения  $\lambda = 1030$  нм (с возможностью работы на

второй ( $\lambda = 515$  нм) и четвертой ( $\lambda = 257$  нм) гармониках), частота следования импульсов  $f = 10$  кГц, энергия в импульсе до  $E \approx 150$  мкДж и продолжительность импульса  $\tau \approx 280$  фс. Лазерная система включает в себя генератор фемтосекундных импульсов и оптоэлектронную систему накачки и термостабилизации, которые интегрированы в единый корпус. Для управления лазерной системой разработан модуль-адаптер — цифровая электронная плата на базе микроконтроллера, позволяющая управлять активацией излучения и формировать цуги с заданным числом лазерных импульсов.

При разработке модуля пространственного позиционирования изделий реализована ком-

бинированная система перемещения, включающая в себя двухкоординатную нанопозиционную платформу (оси X, Y, диапазон перемещения 110 мм, минимальный инкремент движения 1 нм, точность позиционирования  $\pm 300$  нм), моторизированный линейный транслятор (ось Z, диапазон перемещения 25 мм, разрешение на полный шаг 1,25 мкм) и моторизированный кинематический транслятор.

Управление подвижными частями координатного стола обеспечивают штатные контроллеры, работающие под управлением встроенного программного обеспечения. Контроллеры исполняют предварительно составленную и загруженную пользователем программу и выдают на приводы управляющие воздействия. Штатные блоки управления реализуют только низкоуровневые алгоритмы управления перемещением платформы и требуют интеграции с внешней системой для генерации программы перемещения и согласования движений компонентов стола. Эта задача была решена путем разработки программы обеспечения с функцией надстройки над низкоуровневыми алгоритмами штатных устройств управления приводами.

Для транспортировки и фокусировки излучения на поверхности изделий спроектирована портално-перископическая оптическая система, где лазерное излучение, попадая в систему, отражается от закрепленных на алюминиевых опорах с помощью уголковых держателей зеркал, в результате чего луч поднимается на необходимый уровень. Вдоль хода оптического излучения установлены конструкционные спицы, которые обеспечивают возможность быстрого монтажа различных юстировочных и измерительных приспособлений на оптической оси, что значительно облегчает этап предварительной настройки системы перед использованием.

Модуль видеорегистрации предназначен для трансляции видеоизображений технологического участка и включает в себя панорамные видеокамеры и видеокамеру зоны обработки. Последняя дает возможность наблюдения области лазерной микрообработки. Для регистрации видеоизображения в ЛРК использована CCD-камера (скорость передачи изображений 60 кадров/с при разрешении  $2080 \times 1552$  пикселей).

В состав ЛРК входят приборы, предназначенные для регистрации параметров излучения различных длин волн: оптические датчики, детекторы и анализаторы излучения. Контроль мощности и спектрального состава выходного

излучения осуществляется соответственно цифровым портативным измерителем мощности с фотодиодным и пироэлектрическим датчиками и универсальным перестраиваемым спектрометром. Для регистрации поперечного профиля распределения интенсивности лазерного излучения, ширины пучка и угла расходимости использована система анализа луча на основе CCD-матрицы высокой спектральной чувствительности. Параметры, регистрируемые приборами, передаются напрямую в блок обработки данных и становятся доступными для всего пакета управляющего программного обеспечения ЛРК.

Каждый тип задач микрообработки имеет присущие ему сложности, обусловленные физической природой процесса и обрабатываемого изделия, что требует разработки дополнительных аппаратных или программных механизмов их решения. Одной из наибольших сложностей, возникающих в процессе обработки изделий, является изменение диаметра и формы лазерного пятна при большой протяженности области обработки. Эта проблема обусловлена малыми размерами перетяжки, а также неизбежным смещением точки фокусировки из-за несовпадения плоскости поверхности установленного на позиционную платформу изделия с фокальной плоскостью лазерной системы, вследствие чего пятно принимает эллиптическую форму.

В целях обеспечения нормального падения лазерного луча на поверхность обрабатываемой заготовки разработан программный алгоритм, предназначенный для управления работой системы коррекции угловых отклонений в составе ЛРК. Принцип алгоритма основан на итерационной коррекции угловых отклонений опорных точек плоскости X–Y от положения фокуса оптической системы (область перетяжки лазерного луча). Компенсация пространственных отклонений осуществляется с помощью моторизованного кинематического транслятора, обеспечивающего две вращательные степени свободы, и линейного транслятора, предназначенного для коррекции смещения платформы вдоль оси высот.

Одним из результатов синергетического объединения модулей пространственного позиционирования и видеорегистрации является возможность реализации комплексных алгоритмов, основанных на принципах машинного зрения [17, 18]. Оптические измерительные приборы

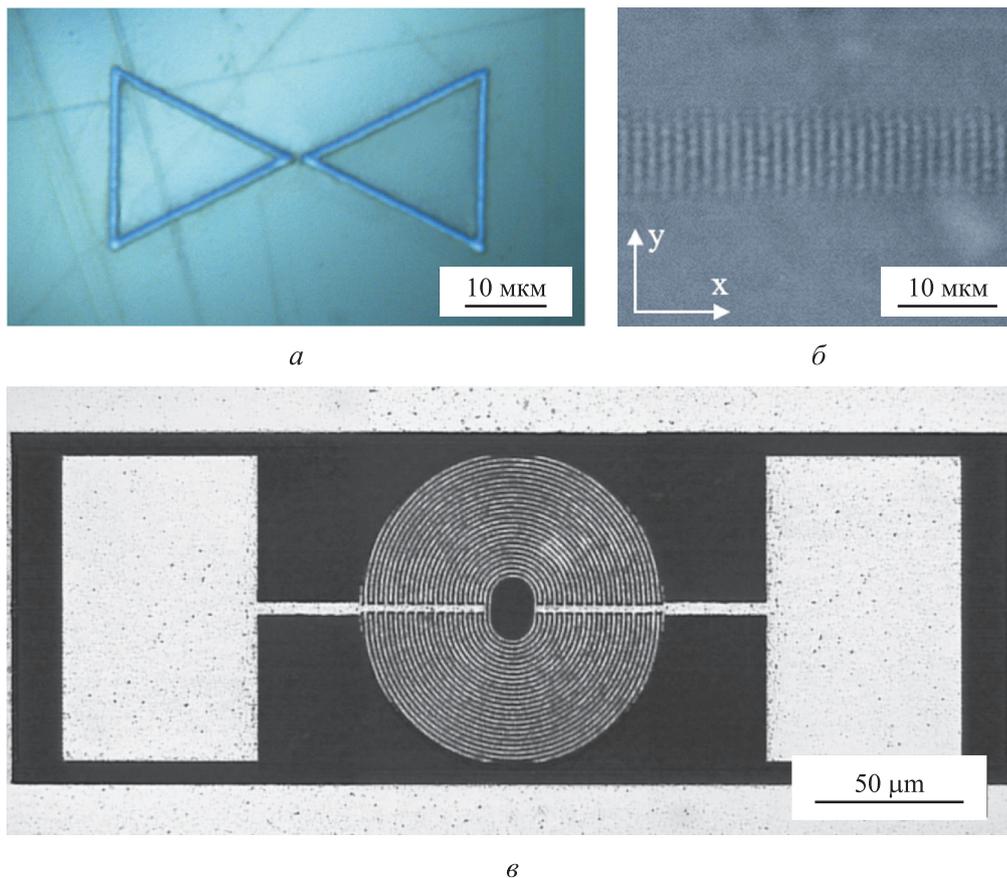


Рис. 2. Результаты лазерной микрообработки изделий:  
 а — тонкопленочная наноантенна; б — участок записанной волоконной брэгговской решетки;  
 в — сформированный химрезистор

позволяют контролировать в процессе изготовления микроразмерных изделий их геометрические параметры — размеры, форму, координаты расположения элементов и их отклонения от номинальных значений. Также методы оптического сканирования и визуализации изображений применяют для контроля состояния поверхности — обнаружения поверхностных трещин, дефектов и инородных включений. Таким образом, актуальным методом контроля поверхности изделий большой протяженности с развитым микрорельефом служит картирование при высокократном увеличении.

Метод оценки степени размытия цифровых изображений использован для организации процесса автофокусировки на основе поиска наиболее четкого изображения из массива снимков участка поверхности изделия, сделанных камерой на разных высотах. Платформу с изделием смещают вдоль оси высот (ось  $Z$ ) с фиксированной скоростью. В процессе движения происходит регистрация и анализ изображений с целью оценки степени размытия.

Скорость обработки изображения напрямую связана с его разрешением (количеством пикселей на единицу площади изображения). Изображения большего разрешения, хотя и являются более информативными, требуют больших временных затрат на обработку. Слишком низкое разрешение, в свою очередь, не позволяет корректно выделить границы. Таким образом, необходимо подобрать оптимальное соотношение разрешения и скорости анализа изображения для процедуры фокусировки.

Одной из важных проблем, возникающих при решении задачи формирования топологии микроразмерных структур, является необходимость предотвращения образования структурных дефектов на поверхности материалов, обрабатываемых лазерным излучением. При лазерной обработке существенный вклад в физику процесса вносят продукты абляции.

Разработанные аппаратно-программные средства позволяют селективно задействовать алгоритмы информационного обмена устройств ЛРК, ориентированные на решение определен-

ных видов технологических задач. Апробация разработанного ЛРК проведена на базе экспериментальных работ по лазерной микрообработке, включавших в себя формирование тонкопленочных элементов, модификацию оптических структур в объеме прозрачных деталей и запись волоконных решеток показателя преломления [19–21]. Результаты лазерной микрообработки изделий на разработанном ЛРК приведены на рис. 2.

## Выводы

1. Для лабораторных исследований разработан ЛРК с программным обеспечением, поз-

воляющий выполнять микрообработку изделий.

2. Апробация предложенных программных средств и алгоритмов управления проведена на базе экспериментальных работ по локальной модификации оптически прозрачных деталей, записи информации в объеме изделий и формированию тонкопленочных элементов на поверхности заготовок.

3. Дальнейшим этапом развития тематики работы является расширение функциональных возможностей ЛРК в области микрообработки деталей и заготовок за счет использования дополнительных специализированных модулей.

## Литература

- [1] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Казарян М.А. и др. Возможности прецизионной микрообработки материалов импульсным излучением лазера на парах меди. *Научные технологии в машиностроении*, 2017, № 2, с. 36–48.
- [2] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Разработка отечественного оборудования для лазерных аддитивных технологий плавлением металлических порошков. *Электрометаллургия*, 2019, № 9, с. 27–32.
- [3] Лябин Н.А., Григорьянц А.Г., Казарян М.А. Современные промышленные автоматизированные лазерные установки «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» для прецизионной микрообработки материалов изделий электронной техники. *Научные технологии в машиностроении*, 2014, № 9, с. 19–26.
- [4] Подураев Ю.В., Илюхин Ю.В., Яковлев С.Ф. и др. Перспективы развития отечественных робототехнических комплексов лазерной сварки. *Технология машиностроения*, 2012, № 1, с. 32–35.
- [5] Илюхин Ю.В. Реализация мехатронного подхода при построении систем компьютерного управления комплексов лазерной и плазменной резки. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2005, № 10, с. 45–50.
- [6] Звездин В.В., Песошин В.А., Хайруллин А.Х. Метод управления лазерным технологическим комплексом сварки разнородных металлов. *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 2012, № 2, с. 227–230.
- [7] Вермель В.Д., Зарубин С.Г., Николаев П.М. и др. Роботизированный технологический комплекс для прецизионной плазменной резки, плазменного упрочнения поверхности и нанесения защитных покрытий. *Технология машиностроения*, 2013, № 9, с. 48–53.
- [8] Звездин В.В., Песошин В.А., Саубанов Р.Р. и др. Управление лазерным технологическим комплексом закалки инструмента. *Вестник чувашского университета*, 2016, № 3, с. 188–193.
- [9] Таваева А.Ф., Шипачева Е.Н., Ченцов П.А. и др. Разработка инвариантного модуля генерации управляющих программ для машин лазерной резки. Вопросы интеграции с САД/САМ системами. *Актуальные проблемы прикладной математики и механики Тез. Докл. X Всерос. конф. с межд. участием*. Екатеринбург, ИММ УрО РАН, 2020, с. 70–71.
- [10] Кондратенко В.С., Кадомкин В.В., Хунг-Ту Л.У. и др. Лазерное сверление микроотверстий в стекле. *Стекло и керамика*, 2020, № 2, с. 3–7.
- [11] Кондратенко В.С., Кадомкин В.В., Хунг-Ту Л. и др. Современное лазерное оборудование для прецизионной обработки различных материалов. *Базис*, 2021, № 1, с. 23–29, doi: [https://doi.org/10.51962/2587-8042\\_2021\\_9\\_23](https://doi.org/10.51962/2587-8042_2021_9_23)
- [12] Заруднев А.С., Илюхин Ю.В. Повышение производительности лазерных комплексов на основе прогноза контурной ошибки. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2010, № 9, с. 52–56.
- [13] Кондратенко В.С., Комов В.Г., Миленский М.Н. Разработка прикладного программного обеспечения для создания лазерного технологического оборудования со вспомогательными кинематическими осями. *Приборы*, 2013, № 5, с. 26–34.

- [14] Кондратенко В.С., Молотков А.А., Сапрыкин Д.Л. Разработка промышленной технологии и специализированного оборудования для послойного лазерного сплавления. *Приборы*, 2022, № 2, с. 1–6.
- [15] Бабкин К.Д., Земляков Е.В., Туричин Г.А. и др. Использование технического зрения в системе автоматического управления для лазерной сварки со сканированием. *Научно-технические ведомости СПбГТУ*, 2015, № 3, с. 142–149.
- [16] Чкалов Р.В., Хорьков К.С., Давыдов Н.Н. Технологический комплекс управления и мониторинга процессов формирования топологии микроразмерных структур на базе телекоммуникационной ТСП/IP сети. *Телекоммуникации*, 2022, № 3, с. 27–33.
- [17] Кондратенко В.С., Сапрыкин Д.Л., Третьякова О.Н. и др. Разработка системы автоматического управления подстройкой фокуса для технологии лазерной микрообработки материалов. *Приборы*, 2022, № 4, с. 26–31.
- [18] Рахимов Р.Р., Звездин В.В. Прецизионное наведение фокуса лазерного излучения на стык при сварке длинномерных конструкций. *Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация*, 2021, № 1, с. 74–82.
- [19] Чкалов Р.В., Чкалова Д.Г., Кочув Д.А. и др. Формирование топологии тонкопленочных структур методом селективной лазерной абляции. *Известия РАН. Серия физическая*, 2022, № 6, с. 869–872.
- [20] Chernikov A., Kochuev D., Khorkov K. et al. Fiber Bragg grating fabrication by femtosecond laser radiation. *EPJ Web Conf.*, 2019, vol. 220, art. 03007, doi: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201922003007>
- [21] Chernikov A.S., Chkalov R.V., Kochuev D.A. et al. Selective volumetric modification of transparent dielectric media by femtosecond laser radiation. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1400, no. 6, art. 066030, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1400/6/066030>

## References

- [1] Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Kazaryan M.A. et al. Possibilities of precision material micro-processing by laser pulse copper-vapor radiation. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2017, no. 2, с. 36–48. (In Russ.).
- [2] Grigoryants A.G., Shiganov I.N. Design of Russian equipment for additive laser technologies with melting of metal powders. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2019, no. 9, pp. 27–32. (In Russ.).
- [3] Lyabin N.A., Grigoryants A.G., Kazaryan M.A. Modern industrial automated "Karavella-1" and "Karavella-1M" laser stations for precision microprocessing of materials for electronic engineering products. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2014, no. 9, pp. 19–26. (In Russ.).
- [4] Poduraev Yu.V., Ilyukhin Yu.V., Yakovlev S.F. et al. Prospects of development of domestic robotic complexes for laser welding. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2012, no. 1, pp. 32–35. (In Russ.).
- [5] Ilyukhin Yu.V. Realization of mechatronical approach for structure of computer control systems of laser and plasma cut. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2005, no. 10, pp. 45–50. (In Russ.).
- [6] Zvezdin V.V., Pesoshin V.A., Khayrullin A.Kh. Method of control of a laser technological complex of dissimilar metal welding. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*, 2012, no. 2, pp. 227–230. (In Russ.).
- [7] Vermel V.D., Zarubin S.G., Nikolaev P.M. et al. Robotic technological center for precision plasma arc cutting, plasmic surface hardening and deposition of protective coating. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2013, no. 9, pp. 48–53. (In Russ.).
- [8] Zvezdin V.V., Pesoshin V.A., Saubanov R.R. et al. Control of laser technological complex of instrument hardening. *Vestnik chuvashskogo universiteta*, 2016, no. 3, pp. 188–193. (In Russ.).
- [9] Tavaeva A.F., Shipacheva E.N., Chentsov P.A. et al. [Development of invariant module of control program generation for laser cutting machines. Issues of integration with CAD/CAM systems]. *Aktualnye problemy prikladnoy matematiki i mekhaniki Tez. Dokl. X Vseros. konf. s mezhd. Uchastiem* [Actual problems of applied mathematics and mechanics. Proc. X Russ. Conf. with Int. Anticipation]. Ekaterinburg, IMM UrO RAN Publ., 2020, pp. 70–71. (In Russ.).
- [10] Kondratenko V.S., Kadomkin V.V., Khung-Tu L.U. et al. Laser drilling of microholes in glass. *Steklo i keramika*, 2020, no. 2, pp. 3–7. (In Russ.). (Eng. version: *Glass Ceram.*, 2020, vol. 77, no. 1-2, pp. 39–42, doi: <https://doi.org/10.1007/s10717-020-00233-4>)

- [11] Kondratenko V.S., Kadomkin V.V., Khung-Tu L. et al. New laser machines for precision processing of various materials. *Bazis* [Basis], 2021, no. 1, pp. 23–29, doi: [https://doi.org/10.51962/2587-8042\\_2021\\_9\\_23](https://doi.org/10.51962/2587-8042_2021_9_23) (in Russ.).
- [12] Zarudnev A.S., Ilyukhin Yu.V. On the improvement of laser cutting machines productivity by evaluation of planimetric error. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2010, no. 9, pp. 52–56. (In Russ.).
- [13] Kondratenko V.S., Komov V.G., Milenkiy M.N. Development of application software for creation of laser technological equipment with auxiliary kinematic axes. *Pribory* [Instruments], 2013, no. 5, pp. 26–34. (In Russ.).
- [14] Kondratenko V.S., Molotkov A.A., Saprykin D.L. Development of industrial technology and specialized equipment for layer-by-layer laser fusion. *Pribory* [Instruments], 2022, no. 2, pp. 1–6. (In Russ.).
- [15] Babkin K.D., Zemlyakov E.V., Turichin G.A. et al. Automatic control system with machine vision for laser scan welding. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGTU*, 2015, no. 3, pp. 142–149. (In Russ.).
- [16] Chkalov R.V., Khorkov K.S., Davydov N.N. Technological system for control and monitoring of processes of micro-sized structures' topology formation, based on telecommunication TCP/IP network. *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2022, no. 3, pp. 27–33. (In Russ.).
- [17] Kondratenko V.S., Saprykin D.L., Tretyakova O.N. et al. Development of automatic control system of focus adjustment for laser micromachining of materials. *Pribory* [Instruments], 2022, no. 4, pp. 26–31. (In Russ.).
- [18] Rakhimov R.R., Zvezdin V.V. Precision guidance of the laser radiation focus on the joint when welding long-dimensional structures. *Sotsialno-ekonomicheskie i tekhnicheskie sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizatsiya* [Social-Economic and Technical Systems: Research, Design and Optimization], 2021, no. 1, pp. 74–82. (In Russ.).
- [19] Chkalov R.V., Chkalova D.G., Kochuev D.A. et al. Shaping the topology of thin-film structures via selective laser ablation. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*, 2022, no. 6, pp. 869–872. (In Russ.). (Eng. version: *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2022, vol. 86, no. 6, pp. 730–732, doi: <https://doi.org/10.3103/S1062873822060089>)
- [20] Chernikov A., Kochuev D., Khorkov K. et al. Fiber Bragg grating fabrication by femtosecond laser radiation. *EPJ Web Conf.*, 2019, vol. 220, art. 03007, doi: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201922003007>
- [21] Chernikov A.S., Chkalov R.V., Kochuev D.A. et al. Selective volumetric modification of transparent dielectric media by femtosecond laser radiation. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1400, no. 6, art. 066030, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1400/6/066030>

Статья поступила в редакцию 07.03.2025

## Информация об авторах

**ЧКАЛОВ Руслан Владимирович** — младший научный сотрудник кафедры «Физика и прикладная математика». Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (600000, Владимир, Российская Федерация, ул. Горького, д. 87, e-mail: [j.larenax@gmail.com](mailto:j.larenax@gmail.com)).

**КОЧУЕВ Дмитрий Андреевич** — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры «Физика и прикладная математика». Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (600000, Владимир, Российская Федерация, ул. Горького, д. 87, e-mail: [\\_b\\_@mail.ru](mailto:_b_@mail.ru)).

## Information about the authors

**CHKALOV Ruslan Vladimirovich** — Junior Researcher, Department of Physics and Applied Mathematics. Vladimir State University (600000, Vladimir, Russian Federation, Gorky St., Bldg. 87, e-mail: [j.larenax@gmail.com](mailto:j.larenax@gmail.com)).

**KOCHUEV Dmitry Andreevich** — Candidate of Science (Phys.-Math), Senior Researcher, Department of Physics and Applied Mathematics. Vladimir State University (600000, Vladimir, Russian Federation, Gorky St., Bldg. 87, e-mail: [\\_b\\_@mail.ru](mailto:_b_@mail.ru)).

**ЧЕРНИКОВ Антон Сергеевич** — младший научный сотрудник кафедры «Физика и прикладная математика». Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (600000, Владимир, Российская Федерация, ул. Горького, д. 87, e-mail: an4ny.che@gmail.com).

**CHERNIKOV Anton Sergeevich** — Junior Researcher, Department of Physics and Applied Mathematics. Vladimir State University (600000, Vladimir, Russian Federation, Gorky St., Bldg. 87, e-mail: j.larenax@gmail.com).

**ХОРЬКОВ Кирилл Сергеевич** — кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой «Физика и прикладная математика». Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (600000, Владимир, Российская Федерация, ул. Горького, д. 87, e-mail: khorkov@vlsu.ru).

**KHORKOV Kirill Sergeevich** — Candidate of Science (Phys.-Math), Head, Department of Physics and Applied Mathematics. Vladimir State University (600000, Vladimir, Russian Federation, Gorky St., Bldg. 87, e-mail: khorkov@vlsu.ru).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Чкалов Р.В., Кочуев Д.А., Черников А.С., Хорьков К.С. Управление робототехническим комплексом фемтосекундной лазерной микрообработки изделий. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 8, с. 31–39.

**Please cite this article in English as:**

Chkalov R.V., Kochuev D.A., Chernikov A.S., Khorkov K.S. Robotic system control in a product femtosecond laser micro-processing. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 8, pp. 31–39.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
предлагает читателям учебное пособие Л.Д. Мальковой  
«Основы проектирования  
режущих инструментов.  
Модуль 1»**

Направлено на содействие в закреплении и расширении знаний, полученных при изучении лекционного курса «Основы проектирования режущих инструментов». Включает в себя большой объем иллюстративного и справочного материала, ссылок на нормативные документы, пояснений и примеров, способствующих лучшему пониманию и усвоению программы дисциплины. Освещает первую часть курса, в которую вошли четыре базовых раздела: понятийный аппарат, инструментальные материалы, базирование и базовые поверхности и резцы.

Будет полезно при выполнении курсовых проектов по проектированию режущих инструментов, решению профессиональных задач в рамках НИР и дипломного проектирования.

Для студентов, обучающихся по специальности 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов» по специализации «Проектирование инструментальных комплексов в машиностроении».

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>