
ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

УДК 62-213:681.7-1/-9:681.7.07:621.793.79:004.356.2
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-1-49-57

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА ЛАЗЕРНОЙ ГОЛОВКИ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АДДИТИВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

П. А. Пьяе¹, К. П. Помпеев^{1*}, А. Д. Николаев¹, О. С. Васильев², С. Г. Горный²

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия,
*kir-pom@mail.ru

² Лазерный центр, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассматривается вопрос усовершенствования конструкции корпуса лазерной головки для обеспечения ее компактности с учетом возможностей аддитивного оборудования, позволяющего изготовить более конструктивно сложные детали корпуса из пластика. Изготовление такого корпуса лазерной головки из пластика позволяет снизить его материалоемкость по сравнению с корпусом, изготовленным из алюминиевого сплава Д16. Дополнительно снизить материалоемкость пластикового корпуса предлагается за счет введения в его конструкцию специальных выборок и ребер жесткости. С использованием САЕ-модуля CAD/CAM-системы SolidWorks был проведен сравнительный анализ прочности и жесткости вариантов конструкции корпуса, собранного из деталей с выборками и ребрами жесткости, а также без них. Результаты моделирования процесса деформации показали, что возможна замена материала деталей корпуса из алюминиевого сплава на пластик и что снижение материалоемкости и изменение конструкции корпуса не приводит к потере его прочности и жесткости, вызывающей недопустимое отклонение лазерного луча от вертикали, т.е. не отражается на функционировании лазерной головки. Предлагается внедрить такую лазерную головку в состав вертикального обрабатывающего центра, чтобы наряду с традиционными способами обработки заготовок из различных материалов методом резания на нем была доступна широкая гамма различных видов лазерной обработки. Это позволит не только расширить технологические и функциональные возможности такого оборудования с числовым программным управлением и сократить время изготовления продукции, но и улучшить технологические, точностные и функциональные характеристики производимого изделия.

Ключевые слова: модификация, конструкция, топология, корпус, лазерная головка, пластиковые детали, аддитивное оборудование, собираемость, ремонтпригодность

Благодарности: работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации, грант 08-08; авторы выражают благодарность компании „Лазерный центр“ за дополнительные консультации.

Ссылка для цитирования: Пьяе П. А., Помпеев К. П., Николаев А. Д., Васильев О. С., Горный С. Г. Модернизация конструкции корпуса лазерной головки с учетом возможностей аддитивного оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 1. С. 49—57. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-1-49-57.

MODERNIZATION OF THE LASER HEAD HOUSING DESIGN BASED ON THE CAPABILITIES OF ADDITIVE EQUIPMENT

P. A. Pyae¹, K. P. Pompeev^{1*}, A. D. Nikolaev¹, O. S. Vasilev², S. G. Gorniy²

¹ ITMO University, St. Petersburg, Russia
*kir-pom@mail.ru

² Laser Center, St. Petersburg, Russia

Abstract. The issue of improving a laser head housing design to ensure its portability with the account for capabilities of additive equipment, allowing to manufacture parts of the housing of high complexity out of plastic, is covered. Manufacturing the laser head housing of plastic makes it possible to reduce its material consumption as compared with housing made of aluminum alloy D16. It is proposed to further reduce the material consumption of the plastic housing by introducing special pockets and stiffening ribs into its design. A comparative analysis is performed in CAE-module of CAD/CAM-system SolidWorks to examine the strength and rigidity of the design options for the body, assembled from parts with the pockets and stiffeners, as well as without them. Results of modeling the deformation process show that it is possible to replace the material of aluminum alloy housing parts with plastic and that a decrease in material consumption and a change in the housing design do not lead to a loss of its strength and rigidity, which causes an unacceptable deviation of the laser beam from the vertical, i.e. does not affect the operation of the laser head. It is proposed to introduce such a laser head into a vertical machining center so that, along with traditional methods of processing workpieces from various materials, a wider range of different types of laser processing is available by cutting. This will allow not only to expand the technological and functional capabilities of such equipment with numerical control and reduce the time of production, but also to improve the technological, accuracy and functional characteristics of the manufactured product.

Keywords: modification, design, topology, housing, laser head, plastic parts, additive equipment, ease of assembly, maintainability

Acknowledgments: The work was supported by the Government of the Russian Federation, grant 08-08; the authors are grateful to the Laser Center company for additional consultations.

For citation: Pyae P. A., Pompeev K. P., Nikolaev A. D., Vasilev O. S., Gorny S. G. Modernization of the laser head housing design based on the capabilities of additive equipment. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 65, N 1. P. 49—57 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-1-49-57.

Введение. При сложившихся в последние десятилетия темпах развития производства в условиях расширения номенклатуры изготавливаемых изделий и обеспечения их конкурентоспособности на промышленных предприятиях требуется замена устаревшего оборудования на современные высокопроизводительные станки с числовым программным управлением (ЧПУ), что позволяет повысить темпы производства и качество выпускаемой продукции. Однако простого переоснащения производственных цепочек в механических цехах в ряде случаев недостаточно. Появляется необходимость дополнения производственного процесса инновационным и комплексным оборудованием, а также внедрения соответствующей технологии обработки материалов. Одним из инструментов обработки поверхности металла является лазерное излучение. Соответственно развитие и внедрение различного рода интегральных систем в состав вертикальных обрабатывающих центров (ОЦ) позволит не только расширить технологические и функциональные возможности этого оборудования и сократить время изготовления продукции, но и улучшить технологические, точностные и функциональные характеристики производимого изделия [1].

При этом расширить технологические и функциональные возможности станков с ЧПУ можно как за счет совершенствования систем их управления [2], так и посредством ввода в состав станков с ЧПУ новых технологических лазерных блоков, узлов и целых систем [3, 4]. По сути, на одном и том же обрабатывающем центре наряду с традиционными способами обработки заготовок из различных материалов методом резания станут доступными такие виды лазерной обработки, как маркирование [5], доводка поверхности [6], создание градиентной структуры поверхности посредством лазерного излучения [7], создание различной сложно-контурной регулярной микротопологии поверхности, гравирование 3D-рельефов [8, 9], обработка керамики [10, 11], макро- и микроструктурирование поверхностного слоя [12, 13], резка углепластика [14], локальное оксидирование поверхности (декорирование), перфорация, локальное термоупрочнение, сварка листовой стали [15], металлизация и деметаллизация, обеспечение хранения информации на поверхности заготовок за счет нанесения микроразмерных штрих- и QR-кодов [5], используемых в информационных технологиях и цифровом производстве, и т.д. Лазерная головка (ЛГ) может быть использована для осуществления локального физического воздействия [16], что существенно облегчает съем металла с заготовки инструмен-

том, оснащенным режущей керамикой [17—19]. В дальнейшем возможен вариант применения лазерной системы для микроструктурирования сложных поверхностей с исключением процесса предварительной подготовки инструмента для чистовых переходов [20].

Современные промышленные лазерные установки также представляют собой оборудование с ЧПУ. В состав таких установок входят лазерные головки, например, на основе волоконных лазеров. В корпусах этих ЛГ размещаются оптическая система и система управления лазерным лучом. Корпусные детали таких ЛГ изготавливаются из алюминиевых сплавов. Одна из важных задач при разработке конструкции корпусов ЛГ — снижение их металлоемкости. Этого можно добиться путем замены алюминиевых сплавов на пластик, имеющий похожие механические характеристики. При этом пластик легче алюминиевого сплава Д16 более чем в 2,7 раза. Кроме того, использование пластика позволяет применить печать на аддитивной установке в качестве способа получения деталей ЛГ. В этом случае, с одной стороны, возможно изготовление меньшего количества более сложных по конструкции деталей для уменьшения числа их сопряжений при сборке корпуса ЛГ, а с другой стороны, целесообразно одновременно с этим обеспечить компактность лазерной головки.

В этой связи цель настоящей статьи — усовершенствование конструкции корпуса ЛГ для обеспечения ее компактности с учетом возможности изготовления деталей корпуса на аддитивной установке.

Использование полимерных материалов в конструкции лазерных систем. Различные металлы традиционно обрабатываются лазерным излучением. Процесс лазерного воздействия на металл за долгие годы исследований мировыми и российскими учеными достаточно изучен. На сегодняшний день заведомо можно спрогнозировать конечный результат того или иного технологического лазерного процесса. В последние годы особый интерес вызывает использование полимерных и композитных материалов в областях машино-, судо-, авиа- и приборостроения. Ряд композитов уже сейчас способен заменить традиционные материалы, что наглядно продемонстрировано в производстве каркасов и крыльев современных самолетов. Зачастую композитные и полимерные материалы обладают если не уникальными, то наиболее эффективными эксплуатационными свойствами и массогабаритными характеристиками в сочетании с экономическими показателями производства. Таким образом, процесс поиска наиболее универсального, удобного, эргономичного материала осуществляется непрерывно в разных областях производства.

Компании, производящие компоненты лазерных источников и систем, непрерывно сталкиваются с нецелесообразностью, неэффективностью и технологической невозможностью применения стандартных материалов производства. Естественно, многое зависит от требований к лазерному оборудованию и условиям его эксплуатации, а также от особенностей производственного процесса в целом.

Альтернативой стандартным материалам являются полимерные, пригодные для использования в аддитивном производстве. Аддитивные технологии позволяют изготавливать полимерные детали абсолютно любой сложности и геометрии, обладающие максимальной эргономичностью и функционалом. Установка SLS (Selective Laser Sintering) способна изготовить деталь любой формы, при этом требуется исключительно ее графическая модель. Изготовление корпусных компонентов лазерных, и не только, систем возможно непосредственно в офисном помещении. Кроме того, ремонт и замена комплектующих также становятся простыми и доступными операциями.

Помимо исследования механических и конструкционных характеристик полимерных и пластиковых деталей актуальными являются проблемы взаимодействия лазерного излучения с веществом. На данный момент недостаточно исследован вопрос, как поведет себя закрытая лазерная система, изготовленная из пластика: а именно какое влияние и в какой степени будет оказывать прямое, рассеянное или отраженное излучение на материал; как будет

распределяться тепло от излучения в массе материала, будет ли достаточно собственной теплопроводности материала или необходимо использование радиаторов, воздушного или другого охлаждения. Кроме того, не определено поведение пластика как конструкционного материала лазерных систем с течением времени — будут ли геометрические параметры деталей изменяться со временем, что приведет к искривлению оптического пути лазерного излучения и, как следствие, к разъюстировке всей системы. Ответы на эти вопросы сможет дать реальная интеграция изготовленного на 3D-принтере корпуса ЛГ с существующей стандартизированной сканирующей системой лазерной маркировки.

Конечным результатом этой работы должно стать определение наиболее эффективного, экономически оправданного и простого в изготовлении материала для создания лазерного оборудования. Таким образом, переход к полимерам и композитам может стать качественным шагом для принципов интеграции лазерных систем.

Модернизация корпуса лазерной головки. В настоящее время конструкция корпуса лазерной головки представляет собой сборочную единицу, в состав которой входит значительное число простых деталей и несколько узлов. Анализ существующей конструкции корпуса ЛГ, топология которой принята за исходную (рис. 1, а), показал, что кроме замены алюминиевого сплава Д16 на пластик можно часть узлов вывести за пределы корпуса ЛГ, что позволит сократить его размеры. Это также позволит снизить его материалоемкость и одновременно сделать ЛГ более компактной. Изменения в конструкции корпуса ЛГ коснулись следующих деталей: нижняя стенка, задняя стенка, верхняя стенка и кожух.

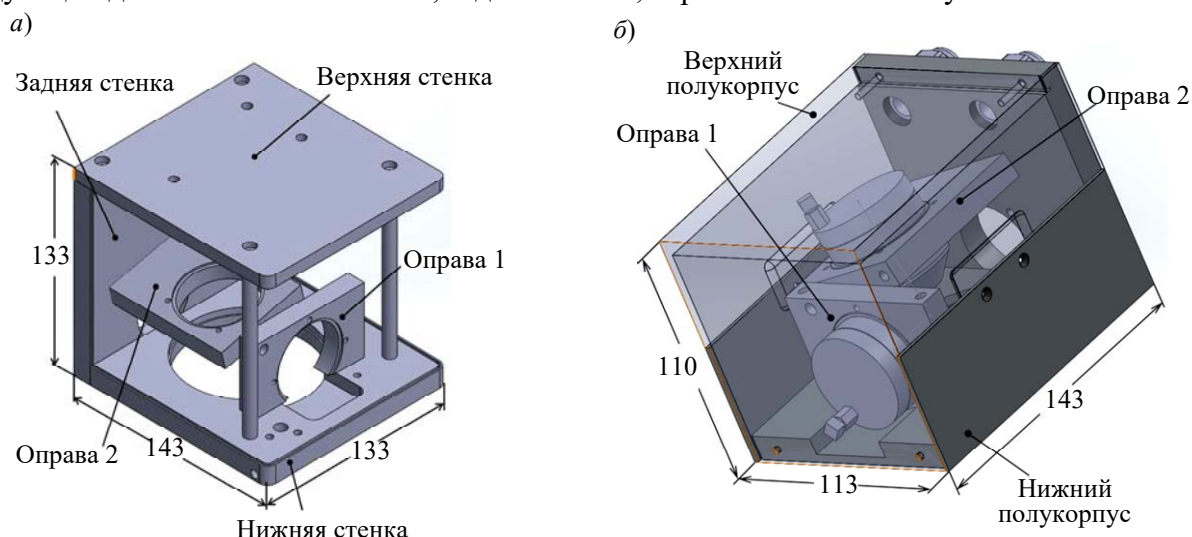


Рис. 1

В результате модификации топологии корпуса ЛГ были получены более сложные по конструкции детали (рис. 1, б): верхний полукорпус и нижний полукорпус. Верхний полукорпус представляет собой комбинацию верхней стенки и части кожуха; нижний полукорпус — это комбинация задней стенки, нижней стенки и боковых частей кожуха. Из конструкции ЛГ исключена управляющая плата, что позволило уменьшить габаритные размеры корпуса ЛГ по высоте и ширине. Также были внесены незначительные изменения в конструкции опор сканаторов для обеспечения их креплений специальными шпильками вместо винтов, и в новой конструкции корпуса предусмотрен специальный вывод кабелей сканаторов для их подключения к внешней управляющей плате.

В качестве материала, исходя из области его применения и возможностей аддитивного оборудования, был выбран полиамид марки ПА 12, его механические характеристики представлены в таблице [21].

Характеристика	Минимальное значение	Максимальное значение
Прочность на изгиб, МПа	70	85
Плотность, кг/м ³	1010	1020
Коэффициент трения	0,3	0,4
Сила удара, Дж/см	0,5	2
Модуль сдвига, МПа	300	500
Предел прочности, МПа	35	55
Модуль Юнга, МПа	1270	2600
Относительное удлинение, %	120	300

3D-печать деталей корпуса ЛГ позволит обойтись без традиционных режущих инструментов. При этом дополнительно снизить материалоемкость пластикового корпуса можно за счет введения в его конструкцию специальных выборок и ребер жесткости.

Для проведения сравнительного анализа прочности и жесткости корпуса ЛГ с использованием CAD-системы SolidWorks, в состав которой также входит CAE-модуль, были разработаны варианты конструкции деталей корпуса с выборками и ребрами жесткости и без них. На рис. 2 в качестве примера представлены варианты детали нижний полукорпус: *а* — без выборок и ребер жесткости; *б* — с выборками и ребрами жесткости.

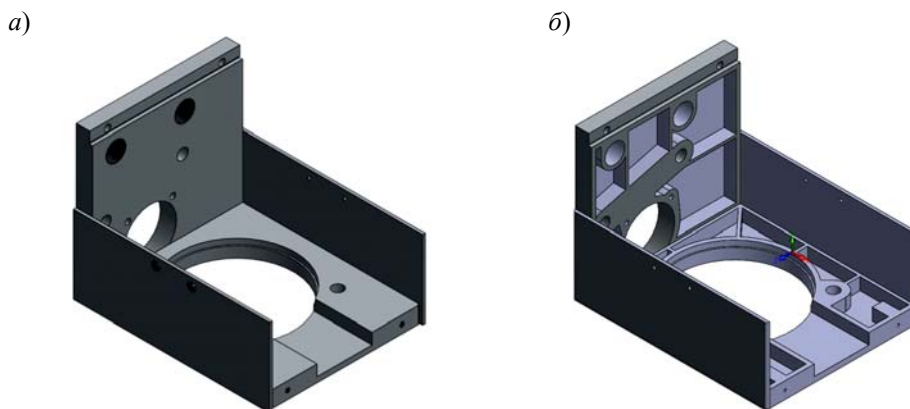


Рис. 2

Суммарно материалоемкость корпуса ЛГ предлагаемой конструкции снижается в 2,9 раза при использовании сплошных деталей и в 4,1 раза при использовании деталей с выборками и ребрами жесткости.

На рис. 3 представлены детали корпуса ЛГ, имеющие выборки и ребра жесткости, изготовленные из полиамида на производственном 3D-принтере: *а* — корпус ЛГ в сборе, *б* — нижний полукорпус, *в* — верхний полукорпус, *г* — оправа 1, *д* — оправа 2.

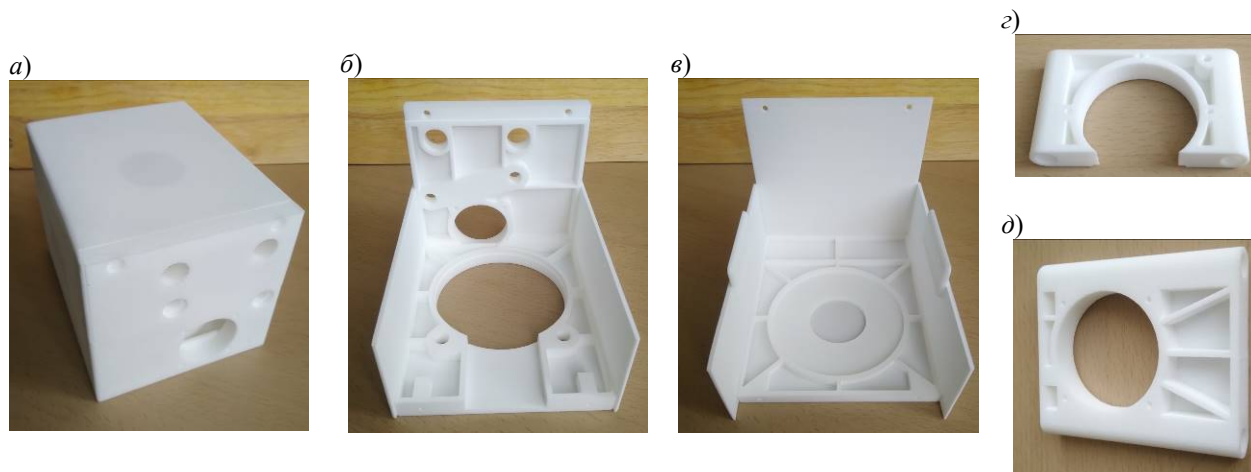


Рис. 3

Необходимо отметить, что снижение материалоемкости и изменение конструкции корпуса не должны привести к потере его прочности и жесткости, что, в свою очередь, не должно привести к недопустимому отклонению лазерного луча от вертикали, т.е. отразиться на функционировании ЛГ. Причины, приводящие к нарушению хода лазерного луча, могут быть различными: внешние факторы и воздействия (силовые и тепловые); напряжения в пластиковых деталях, возникшие после сборки ЛГ; старение материала (пластика); возможное наличие трещин в пластиковых оправах.

Моделирование конструкции корпуса. При проведении сравнительного анализа прочности и жесткости вариантов конструкции корпуса ЛГ было учтено изменение способа закрепления ЛГ при ее установке в шпинделе станка, т.е. для каждого варианта конструкции корпуса ЛГ проверялась его прочность под действием силы тяжести, возникающей из-за собственного веса, так как ЛГ закрепляется в шпинделе вертикального ОЦ в „подвешенном“ состоянии.

Предварительные расчеты для сравниваемых вариантов показали, что деформации корпуса ЛГ (рис. 4, а) под действием силы тяжести незначительны, в основном менее 1 мкм. На отдельном участке величина деформаций не превышает 4 мкм, причем после установки металлического кольца внутрь корпуса ЛГ для закрепления объектива они нивелируются, так как кольцо опирается на массивную донную часть стенки нижнего полукорпуса и одновременно выполняет функцию дополнительного ребра жесткости. При этом возникающие напряжения по Мизесу (см. рис. 4, б) также имеют малую величину — не более 0,0003 % от предела прочности материала.

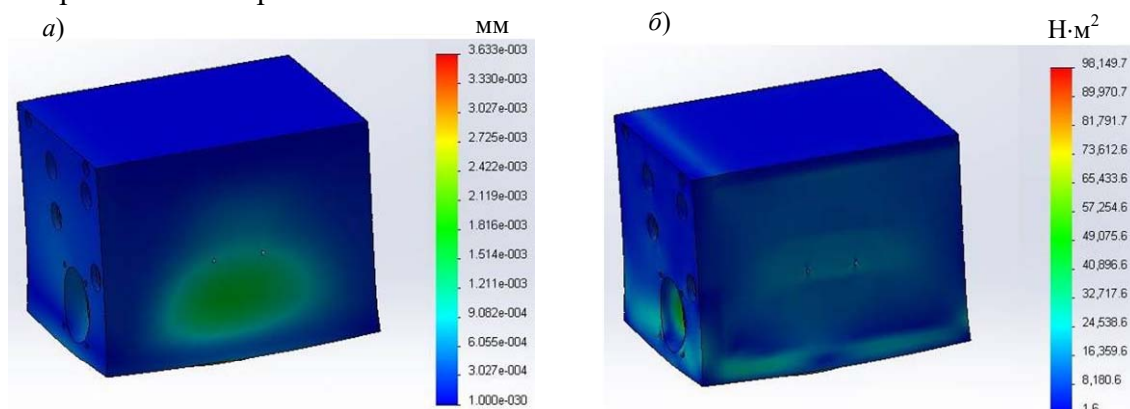


Рис. 4

Результаты моделирования убедительно показали возможность замены материала деталей корпуса ЛГ с дюралюминия Д16 на пластик, а также эффективность использования выборок и ребер жесткости в конструкции деталей. Тем самым можно существенно снизить (приблизительно в 3-4 раза) материалоемкость корпуса ЛГ с одновременным обеспечением его приемлемой жесткости и сохранением функциональности самой ЛГ.

В настоящее время выполнена постобработка деталей корпуса ЛГ, изготовленных на аддитивной установке, ведутся исследования, связанные со сборкой ЛГ и испытанием ее работы в составе лазерного маркировщика с ЧПУ. Следует повторить, что внутри корпуса не должен быть нарушен определенный ход лазерного луча, на траекторию которого оказывают влияние пластиковые детали корпуса ЛГ. Нарушение хода лазерного луча на каком-либо участке его траектории приводит к ошибке и потере работоспособности лазерной системы, т.е. уходу поля обработки от его исходного состояния. В ходе испытаний работоспособности ЛГ предусмотрены проверка стабильности положения поля обработки, а также проведение исследований по влиянию отраженного излучения на механические свойства пластика, из которого изготовлен корпус ЛГ. После этого можно будет переходить к испытаниям работоспособности лазерной головки в составе вертикального ОЦ с ЧПУ.

Заключение. Выполненные изменения конструкции корпуса ЛГ, позволили сделать ее более компактной и легкой без нарушения функциональности. При этом также не были нарушены ее собираемость и ремонтпригодность. Определены направления дальнейших работ. В частности, планируется исследование иных источников лазерного излучения с другими диапазонами длины волны. В комплексе это должно позволить существенно расширить функционал серийно производимых систем с ЧПУ, увеличив их возможности. В конечном счете интеграция лазерной системы в состав ОЦ позволит значительно расширить его функциональные возможности, а также сократить время изготовления продукции и улучшить технологические, точностные и функциональные характеристики производимого изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модернизация обрабатывающих центров посредством интеграции в их состав лазерных систем / А. Д. Николаев, П. А. Пьяе, К. П. Помпеев, О. С. Васильев // Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 7-й Междунар. науч.-практ. конф. / Под ред. А. Н. Евграфова и А. А. Поповича. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. С. 506—515.
2. Картавцев И. С. Расширение функциональных возможностей у ЧПУ токарного станка по расчету параметров процесса текущего контроля и подналадки оборудования // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. / Под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 905—914.
3. Nikolaev A. D., Pyae P. A., Pompeev K. P., Vasilev O. S. Laser processing systems in machines with numerical control // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019. Vol. 1, N 378.
4. Внедрение систем лазерной обработки в состав многооперационных обрабатывающих центров / А. Д. Николаев, К. П. Помпеев, П. А. Пьяе, О. С. Васильев, С. Г. Горный // Металлообработка. 2019. Т. 113, № 5. С. 26—33.
5. Петкова А. П., Ганзуленко О. Ю. Технологические аспекты маркировки изделий машиностроения прецизионным импульсным лазером // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конф. / Под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 1177—1187.
6. Vasilev O. S., Ruzankina J. S. Laser forming micro geometric structures on the surface of roller rolling mill // J. of Physics: Conf. Series. 2016. Vol. 1, N 735.
7. Olt J. J., Maksarov V. V., Efimov A. E. Impacts of gradient structure on the dynamic characteristics of machining process system // 29th DAAAM Intern. Symp. on Intelligent Manufacturing and Automation. 2018. Vol. 1, N 1. P. 190—196.
8. Andreev A. O., Kosenko M. S., Petrovskiy V. N., Mironov V. D. Prototyping of Dental Structures Using Laser Milling // J. of Physics: Conf. Series. 2016. Vol. 1, N 691.
9. Mohd Noor Firdaus Bin Haron, Fadlur Rahman Bin Mohd Romlay. Parametric study of laser engraving process of AISI 304 Stainless Steel by utilizing fiber laser system // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 1, N 469.
10. Przystacki D., Jankowiak M. Surface roughness analysis after laser assisted machining of hard to cut materials // J. of Physics: Conf. Series 2014. Vol. 1, N 483.
11. Zeng Jie Ma, Yigang Wang, Yukun Li. Processing of Three-Dimensional Models for the Crystal Laser Engraving // Nicograph International: IEEE Conf. 2016. DOI: 10.1109/NicoInt.2016.21.
12. Лазерная установка для микроструктурирования поверхности металла с использованием волоконного лазера / О. С. Васильев, В. П. Вейко, С. Г. Горный, Ю. С. Рузанкина // Оптич. журн. 2015. Т. 82, № 12. С. 70—77.
13. Васильев О. С., Горный С. Г. Технология создания поверхностных микроструктур на листовых материалах с использованием волоконного лазера // Металлообработка. 2016. № 3 (93). С. 20—25.
14. Nasedkin Yu. V., Khmelnskiy A. K. Laser cutting of carbon fiber-reinforced plastic thin sheets // J. of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1, N 1109.

15. Larin M. V., Pevzner Y. B., Grinin O. I., Lasota I. T. The use of single-mode fiber laser for welding of stainless steel thin thickness // J. of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1, N 1109.
16. Efimov A. E., Timofeev D. Y., Maksarov V. V. Modeling dynamic processes at stage of formation of parts previously subjected to high-energy laser effects // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 1, N 327.
17. Maksarov V. V., Khalimonenko A. D. Quality assurance during milling of precision elements of machines components with ceramic cutting tools // Intern. Review of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 12, N 5. P. 437—441.
18. Maksarov V. V., Khalimonenko A. D. Forecasting performance of ceramic cutting tool // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 1, N 736. P. 86—90.
19. Maksarov V. V., Timofeev D. Y., Khalimonenko A. D. Machining quality when lathing blanks with ceramic cutting tools // Agronomy Research. 2014. Vol. 1, N 12. P. 269—278.
20. Maksarov V. V., Keksini A. I. Forming conditions of complex-geometry profiles in corrosion-resistant materials // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 4, N 194.
21. Singh I., Amara Y., Melingui A., Pathak P. M., Merzouki R. Modeling of Continuum Manipulators Using Pythagorean Hodograph Curves Soft Robotics. 2018 [Электронный ресурс]: <<https://www.researchgate.net/publication/323955949>>.

Сведения об авторах

- | | |
|------------------------------------|--|
| Пьяе Ай Пьяе | — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: northernstar.phyo@gmail.com |
| Кирилл Павлович Помпеев | — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: kir-pom@mail.ru |
| Алексей Дмитриевич Николаев | — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: senatorfirst1@gmail.com |
| Олег Сергеевич Васильев | — канд. техн. наук; Лазерный центр; E-mail: tesla_90@mail.ru |
| Сергей Георгиевич Горный | — канд. техн. наук; Лазерный центр; генеральный директор; E-mail: sgorny@newlaser.ru |

Поступила в редакцию 10.08.2021; одобрена после рецензирования 27.09.2021; принята к публикации 02.12.2021.

REFERENCES

1. Nikolaev A.D., Pyae P.A., Pompeev K.P., Vasiliev O.S. *Sovremennoye mashinostroyeniye: Nauka i obrazovaniye* (Modern Mechanical Engineering: Science and education), Materials of the 7th International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 2018, pp. 506–515. (in Russ.)
2. Kartavtsev I.S. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye* (Modern Mechanical Engineering. Science and Education), Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 2013, pp. 905–914. (in Russ.)
3. Nikolaev A.D., Pyae P.A., Pompeev K.P., Vasiliev O.S. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, no. 1(378), pp. 012066. (in Russ.)
4. Nikolaev A.D., Pyae A.P., Pompeev K.P., Vasiliev O.S., Gorny S.G. *Metalloobrabotka*, 2019, no. 5(113), pp. 26–33. (in Russ.)
5. Petkova A.P., Ganzulenko O.Yu. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye* (Modern Mechanical Engineering. Science and Education), Materials of the 4th International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 2014, pp. 1177–1187. (in Russ.)
6. Vasiliev O.S., Ruzankina J.S. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, no. 1(735), pp. 1–5.
7. Olt J.J., Maksarov V.V., Efimov A.E. *29th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, 2018, no. 1(1), pp. 190–196.
8. Andreev A.O., Kosenko M.S., Petrovskiy V.N., Mironov V.D. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, no. 1(691), pp. 012007.
9. Mohd Noor, Firdaus Bin Haron, Fadlur Rahman, Bin Mohd Romlay, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, no. 1(469), pp. 012124.
10. Przestacki D., Jankowiak M. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, no. 1(483), pp. 012019.
11. Zeng Jie Ma, Yigang Wang, Yukun Li. *Processing of Three-Dimensional Models for the Crystal Laser Engraving, Nicograph International Conference* (Nicolnt), July 2016, DOI: 10.1109/Nicolnt.2016.21.
12. Vasil'ev O.S., Veiko V.P., Ruzankina Y.S., Gorny S.G. *Journal of Optical Technology*, 2015, no. 12(82), pp. 831–836.
13. Vasil'ev O.S., Gorny S.G. *Metalloobrabotka*, 2016, no. 3(93), pp. 20–25. (in Russ.)
14. Nasedkin Yu.V., Khmel'nitsky A.K. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, no. 1(1109), pp. 012041.
15. Larin M.V., Pevzner Y.B., Grinin O.I., Lasota I.T. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, no. 1(1109), pp. 012036.

16. Efimov A.E., Timofeev D.Y., Maksarov V.V. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, no. 1(327), pp. 22026.
17. Maksarov V.V., Khalimonenko A.D. *International Review of Mechanical Engineering*, 2018, no. 12(5), pp. 437–441.
18. Maksarov V.V., Khalimonenko A.D. *Engineering Materials*, 2017, no. 1(736), pp. 86–90.
19. Maksarov V.V., Timofeev D.Y., Khalimonenko A.D. *Agronomy Research*, 2014, no. 1(12), pp. 269–278.
20. Maksarov V.V., Keksin A.I. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, no. 4(194), pp. 62016.
21. Singh I., Amara Y., Melingui A., Pathak P.M, Merzouki R. *Modeling of Continuum Manipulators Using Pythagorean Hodograph Curves Soft Robotics*, 2018, <https://www.researchgate.net/publication/323955949>.

Data on authors

- | | | |
|----------------------------|---|---|
| Phyo Aye Pyae | — | Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: northernstar.phyo@gmail.com |
| Kirill P. Pompeev | — | PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: kir-pom@mail.ru |
| Aleksey D. Nikolaev | — | Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: senatorfirst1@gmail.com |
| Oleg S. Vasilev | — | PhD; Laser Center; E-mail: tesla_90@mail.ru |
| Sergey G. Gorny | — | PhD; Laser Center; General Director; E-mail: sgorny@newlaser.ru |

Received 10.08.2021; approved after reviewing 27.09.2021; accepted for publication 02.12.2021.