

дифицированных фильтрующих материалов для целей обезжелезивания подземных вод.

*Список использованных источников*

1. Propolsky, D. Iron and Manganese Removal from Groundwater: Comprehensive Review of Filter Media Performance and Pathways to Polyfunctional Applications/ D. Propolsky, V. Romanovski // Environmental Science: Water Research & Technology. – 2025.
2. Propolsky, D. Modified activated carbon for deironing of underground water / D. Propolsky, E. Romanovskaia, W. Kwapinski, V. Romanovski // Environmental Research. – 2020. – Vol. 182. – P. 108996. IF 6.2 Q1 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108996>
3. Prapolski D., Romanovski V. (2025) Resent advances in underground water deironing and demanganization: comprehensive review. Journal of Water Process Engineering. 70. 107089. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107089>.
4. Beletskii E. V. et al. Fall and Rise: Disentangling Cycle Life Trends in Atmospheric Plasma-Synthesized FeOOH/PANI Composite for Conversion Anodes in Lithium-Ion Batteries // ChemEngineering. – 2024. – Т. 8, № 1. – P. 24.
5. Liu C. et al. Effect of phosphogypsum flotation purification on anhydrite properties // Journal of Material Cycles and Waste Management. – 2025. – P. 1-16.

УДК 62-213:681.7-1/-9:691.175:681.625.9:778.64

**ПОЛИМЕРНЫЕ ДЕТАЛИ КОРПУСОВ  
ЛАЗЕРНЫХ ГОЛОВОК И МЕТОДИКА  
ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

*П. А. Пьяе*  
аспирант

Рассматривается разработка полимерных деталей корпуса лазерной головки (ЛГ) с использованием аддитивных технологий, в частности SLS-технологии. Применение 3D-печати позволяет изготавливать полимерные детали сложной конструкции, сохраняя собираемость и ремонтпригодность изделия. Замена алюминиевого сплава на пластик снижает материалоемкость корпуса ЛГ. Дополнительное снижение массы достигается введением выборок и ребер жёсткости. Анализ деталей, спроектированных в CAD/CAM-системе SolidWorks, с использованием встроенного в эту систему CAE-модуля показал, что модификация конструкции не снижает прочность и жёсткость корпуса и не вызывает недопустимых отклонений лазерного луча. На основе изучения изготовленных прототипов и устранения выявленных конструктивных недостатков разработана методика проектирования полимерных деталей корпусов лазерных головок с сохранением оптической схемы. Потенциально лазерные головки с полимерными корпусами могут быть интегрированы в состав металлообрабатывающих центров или являться инструментальным оснащением коллаборативных роботов (коботов) для проведения лазерной обработки заготовок высокопроизводительным маркированием и гравированием.

**Ключевые слова:** Методика, модификация, конструкция, полимерные детали, корпус, лазерная головка, 3D-принтер, технология SLS (Selective Laser Sintering), собираемость, ремонтпригодность, металлообработка, обрабатывающий центр, коллаборативный робот, лазерная обработка, маркирование, гравирование.

**Введение.** С учетом современных темпов развития производства и расширения номенклатуры изделий, промышленные предприятия активно заменяют устаревшее оборудование на высокопроизводительные обрабатывающие центры (ОЦ) с ЧПУ для обеспечения конкурентоспособности изготавливаемой продукции. Наряду с этим в контексте автоматизации производственных процессов особую актуальность приобретает применение в них коллаборативных роботов (коботов), оснащенных современными исполнительными механизмами. Параллельно с этим развиваются технологии лазерной обработки, требующие специализированного оборудования. В то же время применение полимерных материалов открывает новые возможности для создания легких, компактных и функциональных конструкций пластиковых корпусов ЛГ, которыми можно оснащать ОЦ и коботы для проведения лазерной обработки заготовок высокопроизводительным маркированием и гравированием [1–7].

Исследования подтвердили возможность изготовления деталей корпуса ЛГ из полиамида PA 12 методом SLS на 3D-принтере [8, 9]. Аддитивные технологии позволяют создавать сложные конструкции, сокращая количество деталей корпусов ЛГ и обеспечивая их компактность. Современное аддитивное оборудование даёт возможность изготавливать модифицированные полимерные корпусные детали для различных волоконных лазерных установок, сохраняя собираемость и ремонтпригодность их ЛГ.

**Основная часть.** Для оснащения коботов лазерными головками или их внедрения в состав ОЦ решалась задача снижения материалоёмкости их корпусных деталей путём замены металла на пластик и модификации конструкции этих деталей с учетом возможностей аддитивного производства при условии обеспечения компактности ЛГ и сохранения её собираемости, ремонтпригодности и работоспособности ЛГ.

Кроме того, имеется следующая специфика лазерной обработки с использованием коботов, влияющая на форм-фактор ЛГ.

1. Необходима консольная установка ЛГ на коботах, имеющих маломощные приводы, что предъявляет требования к компактности и малой массе ЛГ для их точного позиционирования.

2. Эргономика требует обтекаемой формы корпуса ЛГ при её перемещении в ограниченном пространстве.

Таким образом, требуемый форм-фактор (компактность, обтекаемость, малая масса) корпусных деталей ЛГ достигается заменой металла на полимер и адаптацией их конструкции под возможности аддитивных технологий с сохранением её функциональности.

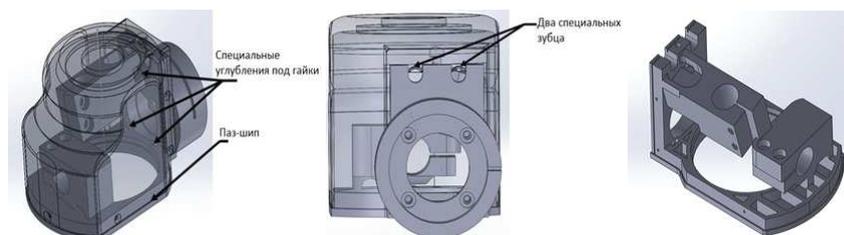
В ходе выполнения исследовательских работ была проведена модификация конструкции деталей корпусов ЛГ для лазерных установок «ТурбоМаркер» и «МиниМаркер 2» [8-10]. Они были изготовлены из полиамида PA 12 методом SLS. Выполнен анализ собираемости, выявлены конструктивные недостатки и определены способы их устранения. Прочность конструкции исследована методами инженерного анализа. Полученные результаты позволили разработать методику проектирования полимерных деталей корпусов ЛГ.

Анализ корпуса ЛГ установки «ТурбоМаркер» показал возможность вынесения отдельных узлов за пределы корпуса при замене металла на пластик. Это позволило уменьшить размеры корпуса и снизить материалоёмкость. Модификация нижней, задней и верхней стенок с кожухом привела к объединению четырёх простых деталей в два сложных полукорпуса. Вынос управляющей платы сократил габариты по высоте и ширине. Изменена конструкция опор сканаторов для крепления шпильками вместо винтов, предложены пластиковые выводы кабелей в задней стенке нижнего полукорпуса. В результате для установки «ТурбоМаркер» размеры корпуса ЛГ сократились по ширине и высоте со 133 мм до 113 мм и 110 мм соответственно, количество деталей уменьшилось до четырёх [8, 9].

Анализ ЛГ установки «МиниМаркер 2» также выявил возможность вынесения управляющих плат сканаторов. Установлено, что габариты сканаторов определяют потенциал сокращения размеров корпуса. Модификация конструкции уменьшила габариты корпуса ЛГ, обеспечив компактность, собираемость и ремонтпригодность. При этом все три размера (Ш×В×Г) сократились со 133×133×143 мм до 94×100×133 мм [10]. Дополнительно изменена конструкция хомутов крепления сканаторов с их объединением в единую конструкцию с нижним полукорпусом, что сократило количество деталей до двух и повысило жёсткость нижнего полукорпуса. Для проверки собираемости корпуса ЛГ установки «МиниМаркер 2» и выявления конструктивных недостатков детали изготовлены на 3D-принтере с последующей постобработкой.

При сборке корпуса ЛГ для установки «МиниМаркер 2» выявлены следующие недостатки: 1) тонкие стенки верхнего полукорпуса неплотно прилегали к нижнему по периметру, поэтому образующиеся щели допускают проникновение пыли и влаги, что негативно влияет на работу сканаторов, зеркал, объектива и передачу лазерного луча; 2) резьбы под крепление полукорпусов и хомута срывались при затяжке стальных винтов; 3) ручное нарезание резьбы М14 в отверстиях требовало закрепления предварительно собранного корпуса в тисках, что невыполнимо на станке с ЧПУ.

Для их устранения внесены следующие изменения (см. рисунок 1): 1) введено соединение полукорпусов по периметру типа «паз-шип»; 2) резьбовые отверстия заменены гладкими большего диаметра с углублениями под гайки, предотвращающими их проворачивание, а гайки зафиксированы силиконовым герметиком; 3) вместо резьбовых отверстий в верхнем полукорпусе введены два зубца, входящие в пазы нижнего, образуя сквозные отверстия для вывода и поджима кабелей сканаторов к внешним управляющим платам [11]. Кроме того, на основе опыта проектирования корпуса для установки «ТурбоМаркер» и его инженерного анализа в САЕ-модуле системы SolidWorks в нижнюю стенку полукорпуса ЛГ для установки «МиниМаркер 2» введены выборки и рёбра жёсткости для снижения расхода материала (см. там же).



**Рисунок 1** – Результаты проектирования с учетом устранения выявленных недостатков корпуса ЛГ лазерной установки «МиниМаркер 2»

Материалоёмкость корпуса с выборками и рёбрами жёсткости снизилась в 5,5 раза, а без них – в 5,1 раз. Условием снижения материалоёмкости и модификации конструкции является сохранение прочности и жёсткости корпуса, поскольку их значительное снижение может вызвать недопустимое отклонение лазерного луча от вертикали и нарушить функционирование ЛГ. Поэтому в САЕ-модуле

системы SolidWorks был проведён сравнительный анализ прочности и жёсткости корпуса, а полная сборка опытного образца ЛГ и его монтаж в установку показали, что оптическая система не нарушена, юстировка проведена без проблем – установка готова к эксплуатации.

На основе спроектированных вариантов корпусов, выявленных недостатков и способов их устранения при условии сохранения оптической схемы разработана состоящая из 7 этапов методика проектирования деталей корпусов ЛГ для их аддитивного производства, обеспечивающих компактность ЛГ [11].

*Этап 1.* Определить компоненты ЛГ для выноса за пределы корпуса (обычно платы управления сканаторами) с целью уменьшения габаритов. Предусмотреть ввод кабелей через пазы или кабельные вводы с фиксацией зубцами или гайками.

*Этап 2.* Определить детали корпуса для объединения, создавая комбинированные элементы, устраняя винтовые соединения и повышая жёсткость. Учитывать габариты сканаторов для сохранения оптической схемы. Оптимально создать два полукорпуса.

*Этап 3.* Определить способ крепления внутренних деталей. Заменить винтовое крепление в глухие отверстия на ступенчатые винты со сквозными отверстиями, шайбами и гайками. Ввести выборки и рёбра жёсткости.

*Этап 4.* Определить положение вертикальной плоскости разъёма полукорпусов для обеспечения герметичности. Сопряжение типа «паз-шип»: шипы в верхнем, пазы в нижнем полукорпусе. Крепление саморезами 3...3,5 мм или винтами с гайками в гнездах, зафиксированных герметиком.

*Этап 5.* Определить места для выборок и рёбер жёсткости на внутренней стороне полукорпусов. Выполнить корректировку конструкции.

*Этап 6.* Зарезервировать место на верхней стенке для крепления инструментального конуса.

*Этап 7.* Провести исследование прочности в САЕ-системе (например, SolidWorks) при гравитационном, температурном и вибрационном воздействии для консольного или подвешенного крепления ЛГ.

**Заключение.** Таким образом, модификация конструкции и замена материала корпуса ЛГ с алюминиевого сплава Д16 на полиамид PA 12 позволяют создать компактную и лёгкую лазерную головку, сохраняя собираемость и ремонтпригодность. Полимер-

ные детали корпуса ЛГ изготавливаются на аддитивном оборудовании с минимальной постобработкой. Проводятся испытания ЛГ в составе маркировщика «МиниМаркер 2» для проверки её функциональности. Запланировано изучение влияния лазерного излучения различного диапазона длин волн на механическую прочность полимерных деталей корпуса ЛГ и её работоспособность.

#### Список использованных источников

1. 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.
2. Vasilev O. S., Ruzankina J. S. Laser forming micro geometric structures on the surface of roller rolling mill. *Journal of Physics: Conference Series* 2016. Vol. 1, N 735. DOI: 10.1088/1742-6596/735/1/012046.
3. 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. DOI: 10.1088/1757-899X/469/1/012124.
4. Васильев О. С., Горный С. Г. Технология создания поверхностных микроструктур на листовых материалах с использованием волоконного лазера // *Металлообработка*. 2016. №3 (93). С. 20–25.
5. Николаев А. Д., Пьяе П. А., Помпеев К. П., Васильев О. С. Модернизация обрабатывающих центров посредством интеграции в их состав лазерных систем // 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. DOI: 10.1872/MMF-2018-43.
6. 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. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012066.
7. Николаев А. Д., Помпеев К. П., Пьяе П. А., Васильев О. С., Горный С. Г. Внедрение систем лазерной обработки в состав многооперационных обрабатывающих центров // *Металлообработка*. 2019. Т. 113, №5. С. 26–33. DOI: 10.25960/mo.2019.5.26.
8. 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.
9. Pompeev K. P., Pyae P., Vasilev O., Gorny S. Analysis, topology modification and modeling of the laser head casing taking into account the capabilities of additive equipment // *Journal of Physics: Conference Series* – 2021, Vol. 1753, No. 1, pp. 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012037.
10. Васильев О. С., Вейко В. П., Горный С. Г., Рузанкина Ю. С. Лазерная установка для микроструктурирования поверхности металла с использованием волоконного лазера // *Оптический журнал*. 2015. Т. 82, №12. С. 70–77. DOI: 10.1364/JOT.82.000831.
11. Пьяе П. А., Помпеев К. П. Анализ конструкции и методика проектирования полимерных деталей корпусов лазерных головок // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение* – 2025. – Т. 68. – № 7. – С. 633-642. doi: 10.17586/0021-3454-2025-68-7-633-642