

П.А. Пьяе¹, К.П. Помпеев², О.С. Васильев³

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНОГО ПРИНЦИПА



¹Пьяе Пье Ай,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79602658741, E-mail: northernstar.phyo@gmail.com



²Кирилл Павлович Помпеев,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79110108265, E-mail: kir-pom@mail.ru



³Олег Сергеевич Васильев,
ООО «Лазерный центр»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79500419019, E-mail: tesla_90@mail.ru

Аннотация

В работе рассматривается вопрос создания лазерных установок, структура которых формируется по модульному принципу, что обеспечивает их переконфигурацию в соответствии с потребностями заказчика. В отличие от традиционных непереключаемых лазерных систем, предназначенных для выполнения конкретных задач, предлагаемая концепция рассматривает лазерную головку как функциональный модульный инструмент. Лазерная установка, созданная по модульному принципу, включает в себя силовой модуль, лазерный модуль, модуль управления, функциональный модульный инструмент и модуль осей перемещения. Особое внимание уделяется разработке компактных, легких и эргономичных пластиковых корпусов лазерных головок, изготавливаемых с помощью аддитивных технологий. Такой подход позволит создавать кастомизированное производственное оборудование,

адаптируемое под различные виды лазерной обработки и способное функционировать в труднодоступных местах.

Ключевые слова: модульная лазерная установка, переконфигурируемое оборудование, функциональный модульный инструмент, лазерная головка, модульный принцип, кастомизация, полимерные материалы, аддитивные технологии

Введение

Большинство современных лазерных установок представляют собой единые, как правило, неперекофигурируемые конструкции, предназначенные для выполнения определенного вида работ, и неперестраиваемые под выполнение каких-либо других видов лазерной обработки. Например, лазерная установка для проведения гравировальных или маркировочных работ не предназначена для выполнения работ по лазерной резке или сварке [1-3]. Это разные виды лазерного оборудования, каждый из которых спроектирован для решения узкоспециализированных задач, что значительно ограничивает функциональную гибкость этих устройств и увеличивает издержки при необходимости выполнения различных технологических операций.

Такой подход к проектированию лазерных установок существенно ограничивает их применение в условиях современного производства, требующего быстрой адаптации и гибкости технологического оборудования. При этом производители вынуждены приобретать несколько различных типов лазерных установок для решения разнообразных задач, что приводит к увеличению капитальных затрат и площадей, занимаемых оборудованием.

Целью данной работы является создание такой модульной структуры лазерной установки, которая обеспечивала бы возможность переконфигурации установки и быстрое подключение модулей друг к другу для изменения характеристик получающегося оборудования в соответствии с потребностями заказчика, в котором лазерная головка является функциональным модульным инструментом.

Реализация данной концепции позволит существенно расширить функциональные возможности лазерного оборудования, сократить затраты на его приобретение и эксплуатацию, а также обеспечить гибкость производственных процессов.

Модульный принцип, как основа метода создания перспективного лазерного оборудования

Современная тенденция создания перестраиваемого, быстро перенастраиваемого и переконфигурируемого оборудования приводит к

необходимости проектирования такого оборудования по модульному принципу [4-21]. С этой точки зрения в лазерном оборудовании в качестве функционального модуля можно выделить его лазерную головку и рассматривать ее как функциональный модульный инструмент, встраиваемый в различное оборудование (технологическую установку, станок или промышленный робот) и быстро присоединяемый к нему, а также используемый для высокоэффективной обработки [21]. При этом для любой лазерной установки, построенной по модульному принципу, в общем случае, можно выделить следующие составляющие: силовой модуль (блок питания); лазерный модуль (источник лазерного излучения, например, волоконный лазер); модуль управления установкой (персональный компьютер со специализированным программным обеспечением); функциональный модульный инструмент (лазерная головка); модуль осей (линейных и поворотных) перемещений лазерной головки. При этом монтаж модулей лазерной установки целесообразно проводить на сборную (стационарную или мобильную) конструкцию.

Как уже было сказано выше, в современных условиях любое оборудование, в том числе лазерное, должно быть:

- перестраиваемым [4, 5];
- быстро переналаживаемым [9-13];
- переконфигурируемым [4, 6-8];
- модульным [14-21].

Перестройка оборудования представляет собой переход от одного процесса к другому, когда оборудование адаптируется для выполнения различных задач, например, от гравирования (маркировки) к созданию QR-кодов.

Переналадка оборудования представляет собой его наладку на изготовление других изделий из-за их сменны, или его переналадку, например, при изменении размеров однотипных изготавливаемых изделий, или изменение отдельных элементов, например, замену объектива для настройки фокусного расстояния. Это происходит внутри одной конфигурации оборудования.

Переконфигурация оборудования связана с изменением его структуры и характеристик его составных частей, например, применительно к лазерному оборудованию замену источника лазерного излучения на более мощный или установку нового модуля, такого, как поворотное (делительное) устройство. Это позволяет использовать оборудование для разных задач, например, для лазерного 2D- или 3D-гравирования, либо лазерной обработки плоских поверхностей или поверхностей вращения.

Модульность оборудования связана с возможностью быстрой замены его составных частей. С точки зрения реализации модульного принципа при проектировании производственного оборудования, составляющими

модульной лазерной установки являются взаимозаменяемые функциональные блоки, которые могут быть оперативно интегрированы в единую систему.

На рисунке 1 представлена предлагаемая модульная структура лазерной установки, а также схема внедрения ее лазерной головки (ЛГ), рассматриваемой как функциональный модульный инструмент, в обрабатывающий центр (ОЦ) с ЧПУ [22-24].

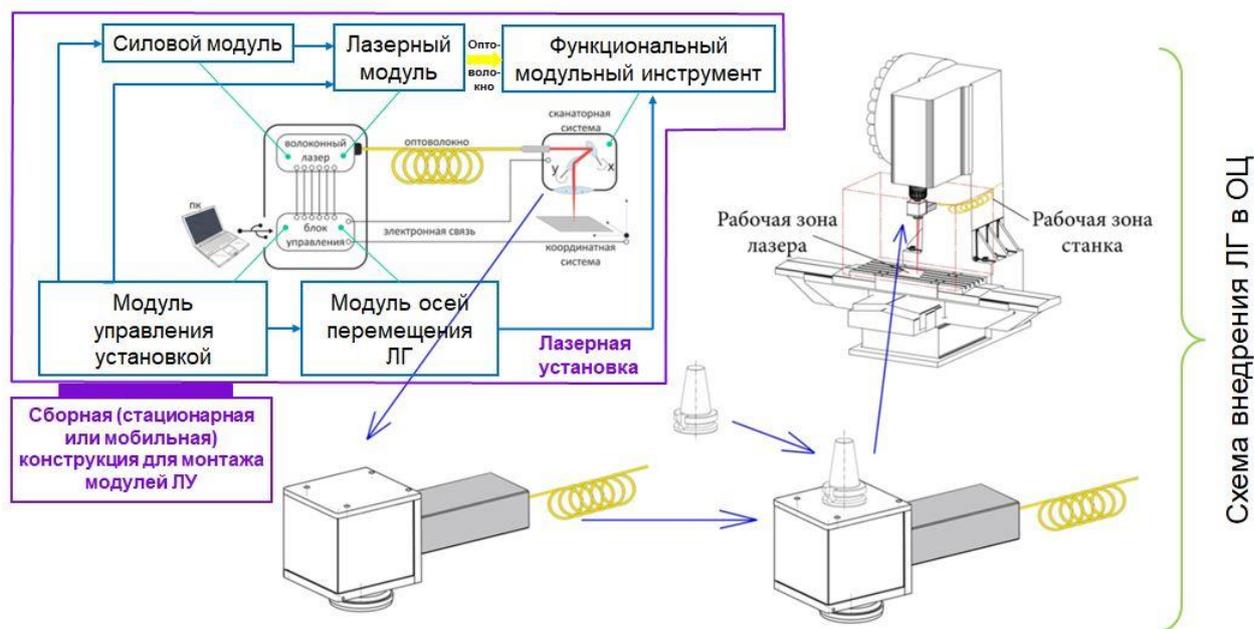


Рис. 1. Модульная структура лазерной установки и схема внедрения ЛГ в ОЦ

Для монтажа представленных на рисунке 1 модулей лазерной установки необходимо использование сборной (стационарной или мобильной) конструкции, обеспечивающей быстрое соединение и разъединение компонентов, а также их надежную фиксацию в процессе эксплуатации. Такая архитектура позволяет не только адаптировать оборудование под различные технологические задачи, но и оперативно заменять вышедшие из строя модули без необходимости полного демонтажа установки.

Особенности использования лазерных головок для труднодоступных мест

Лазерная обработка изделий в труднодоступных местах замкнутого пространства требует перемещения в зону обработки лазерного инструмента, в качестве которого можно рассматривать различные лазерные головки, устанавливаемые консольно на специальных кронштейнах, выдвигаемых стрелах или руке робота. В связи с этим лазерные головки должны обладать с одной стороны компактными

размерами, а с другой – малой массой для обеспечения их точного позиционирования без перекосов.

Работа в ограниченном пространстве предъявляет повышенные требования к маневренности и эргономике лазерного инструмента. Необходимость точного позиционирования головки в труднодоступных местах определяет важность минимизации ее массы и габаритов при сохранении всех функциональных характеристик. Кроме того, конструкция должна обеспечивать защиту оптических элементов от загрязнений и повреждений, возникающих при работе в стесненных условиях.

В то же время с точки зрения эргономики объект, перемещаемый в труднодоступные места, должен обладать кроме компактных размеров еще и обтекаемой формой, что снижает вероятность зацепления за элементы конструкций и облегчает маневрирование в ограниченном пространстве. Аэродинамический профиль корпуса также способствует лучшему отводу продуктов лазерной обработки от рабочей зоны, что повышает качество обработки и срок службы оптических элементов.

Указанные особенности использования и эргономики лазерных головок для труднодоступных мест определяют их требуемый форм-фактор, при изменении которого должны сохраняться свойства объекта (изделия), в данном случае это работоспособность лазерной головки.

Инновационные подходы к созданию лазерных головок

Обеспечить требуемый форм-фактор лазерных головок, то есть их компактные размеры, обтекаемую форму и малую массу, способны, во-первых, замена металлического материала корпусных деталей лазерных головок на пластик (полимерный материал), а во-вторых, изменение их конструкции для изготовления деталей на аддитивных установках [25, 26].

Применение современных высокотехнологичных полимерных материалов позволяет значительно снизить массу лазерной головки при сохранении необходимой прочности и жесткости конструкции. Дополнительным преимуществом использования полимеров является возможность создания более сложных форм, оптимизированных с точки зрения аэродинамики и эргономики.

Аддитивные технологии открывают новые возможности для проектирования внутренней структуры лазерных головок, позволяя создавать оптимизированные конструкции с внутренними каналами охлаждения, интегрированными элементами крепления и точно рассчитанными зонами армирования в местах повышенной нагрузки. Это обеспечивает повышенную надежность и долговечность изделия при минимальной массе.

Кроме того, применение аддитивных технологий значительно сокращает время разработки и внедрения новых моделей лазерных головок, позволяя быстро адаптировать конструкцию под конкретные требования заказчика и специфику выполняемых работ. Возможность быстрого прототипирования и итеративной доработки конструкции существенно снижает затраты на разработку и повышает конкурентоспособность предлагаемых решений.

Для производства деталей полимерных корпусов лазерных головок, используемых в лазерных установках «ТурбоМаркер» и «МиниМаркер2», был опробован ряд аддитивных технологий, таких как, FDM, SLA и SLS, из которых наилучший результат с учетом исследования разработанных конструкций корпусов ЛГ в САЕ-системе [25, 26] был получен при использовании технологии SLS, при печати их деталей из полиамида марки ПА12.

Результаты

Возможности современного аддитивного оборудования и область применения полиамида марки ПА12 позволили выбрать этот материал для 3D-печати полимерных деталей корпуса ЛГ. Его механические характеристики представлены в таблице 1. Полиамид ПА12 легче дюралюминия более чем в 2,7 раза, поэтому его использование существенно снизит расход материала и материалоемкость конечного изделия [25, 26].

Таблица 1. Механические свойства материала ПА12

Характеристика	Единицы измерения	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

Анализ конструкции корпуса лазерной головки (см. рисунок 2, а), входящей в состав лазерной установки «ТурбоМаркер» [22, 23], показал, что одновременно с заменой металлического материала на пластик можно

некоторые узлы ЛГ вынести за пределы ее корпуса. Это с одной стороны позволило уменьшить размеры самого корпуса и снизить его материалоемкость, а с другой – сделать лазерную головку более компактной.

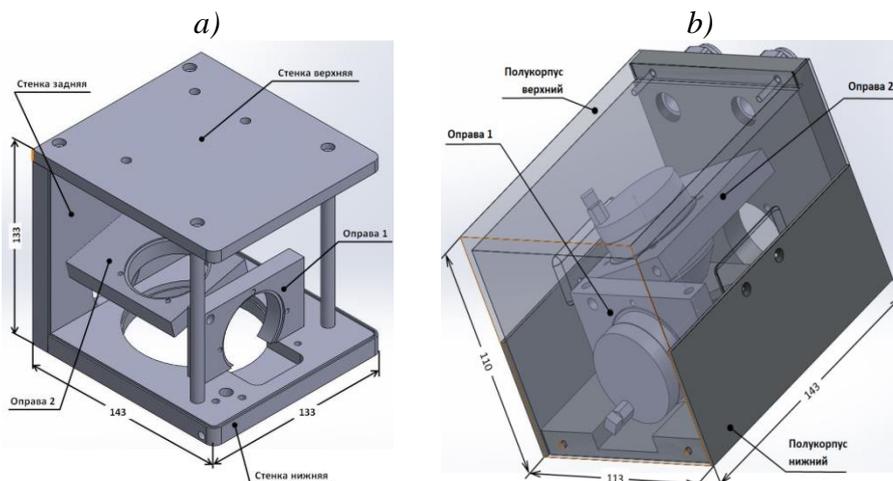


Рис. 2. Конструкция корпуса ЛГ лазерной установки «ТурбоМаркер» до и после изменения его топологии: *a)* с исходной топологией; *b)* с измененной топологией

При этом в корпусе ЛГ была изменена конструкция его нижней, задней и верхней стенок, а также кожуха, в результате которой из четырех простых деталей были получены две комбинированные более сложные по своей конструкции – полукорпус нижний и полукорпус верхний (см. рисунок 2, *б*). За счет вывода управляющей платы за пределы корпуса ЛГ удалось уменьшить его габаритные размеры по высоте и ширине. Кроме того, были внесены изменения в конструкцию опор сканаторов, чтобы обеспечить их крепление внутри корпуса специальными шпильками вместо винтов, а также для обеспечения внешнего подключения кабелей сканаторов к управляющей плате, вынесенной за пределы корпуса ЛГ, было предложено использовать их специальные пластиковые выводы, заворачиваемые в заднюю стенку полукорпуса нижнего [25, 26].

Анализ существующей конструкции лазерной головки (см. рисунок 3, *a*), входящей соответственно в состав лазерной установки «МиниМаркер 2», также позволил сделать вывод о наличии возможности вынесения управляющих плат сканаторов за пределы корпуса ЛГ. Другой вывод заключается в том, что габариты размещаемых в корпусе ЛГ сканаторов влияют на возможность в той или иной степени сократить размеры корпуса. С учетом этих выводов была проведена модификация конструкции деталей корпуса. В итоге это позволило уменьшить габаритные размеры корпуса ЛГ (см. рисунок 3, *б*), то есть обеспечить его компактность, а также сохранить собираемость и ремонтпригодность самой ЛГ.

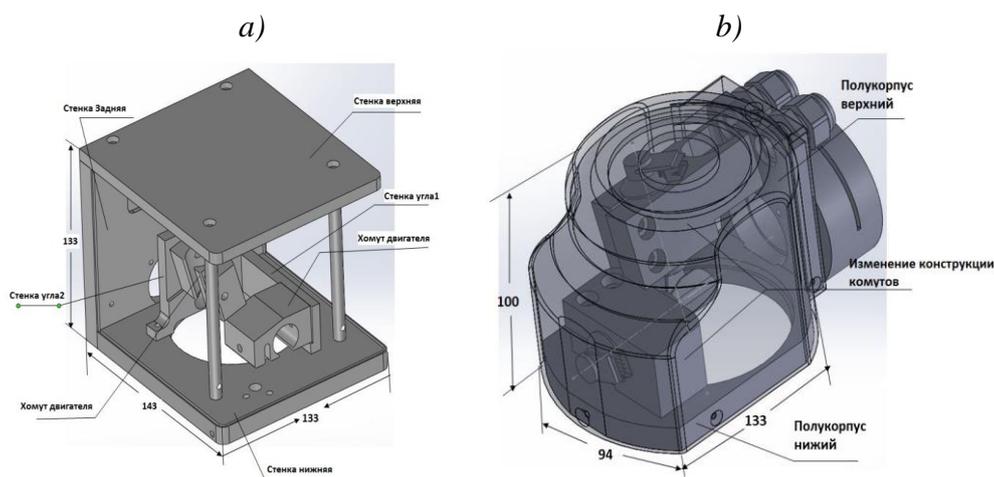


Рис. 3. Конструкция корпуса ЛГ лазерной установки «МиниМаркер 2» до и после изменения его топологии: *a)* с исходной топологией; *b)* с измененной топологией

Так для лазерной установки «ТурбоМаркер» удалось сократить размеры корпуса ЛГ по его ширине (Ш) и высоте (В) без глубины (Г) со 133 мм до 113 мм и 110 мм соответственно (см. рисунок 2) и общее количество деталей корпуса довести до четырех [25, 26], а для лазерной установки «МиниМаркер 2», у которой сканаторы по габаритам приблизительно в два раза меньше, удалось сократить все три габаритных размера (Ш×В×Г) со 133×133×143 мм до 94×100×133 мм (см. рисунок 3).

В последнем случае дополнительно за счет изменения конструкции хомутов, удерживающих сканаторы, а также их объединения между собой и с нижним полукорпусом в единую конструкцию общее количество деталей корпуса сократилось до двух и увеличилась жесткость нижнего полукорпуса.

Для проверки корпуса ЛГ лазерной установки «МиниМаркер 2» на собираемость и выявления недостатков его конструкции в качестве первых опытных образцов были изготовлены его детали на 3D-принтере (см. рисунок 4), которые затем были подвергнуты окончательной постобработке.

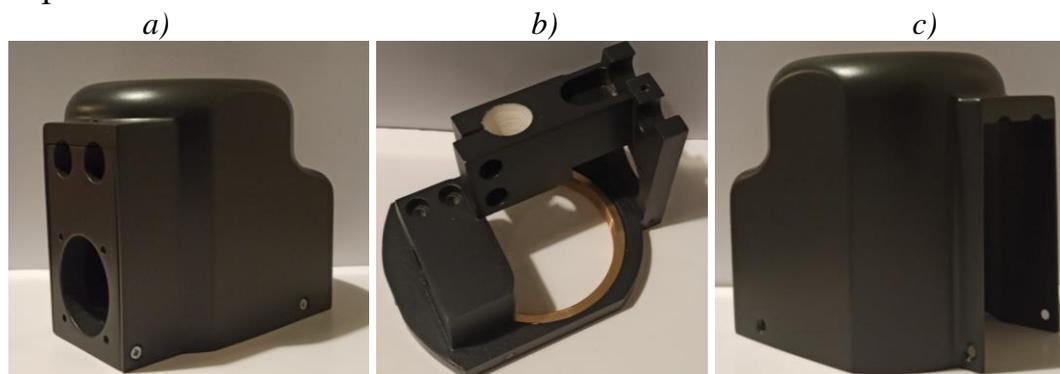


Рис. 4. Детали первого опытного корпуса лазерной головки, изготовленные из полиамида ПА 12 на 3D-принтере по технологии SLS: *a)* корпус лазерной головки в сборе; *b)* нижний полукорпус; *c)* верхний полукорпус

Обсуждение

Для проверки работоспособности ЛГ она была собрана и установлена на лазерный маркировщик «МиниМаркер 2» вместо штатной ЛГ (см. рисунок 5).

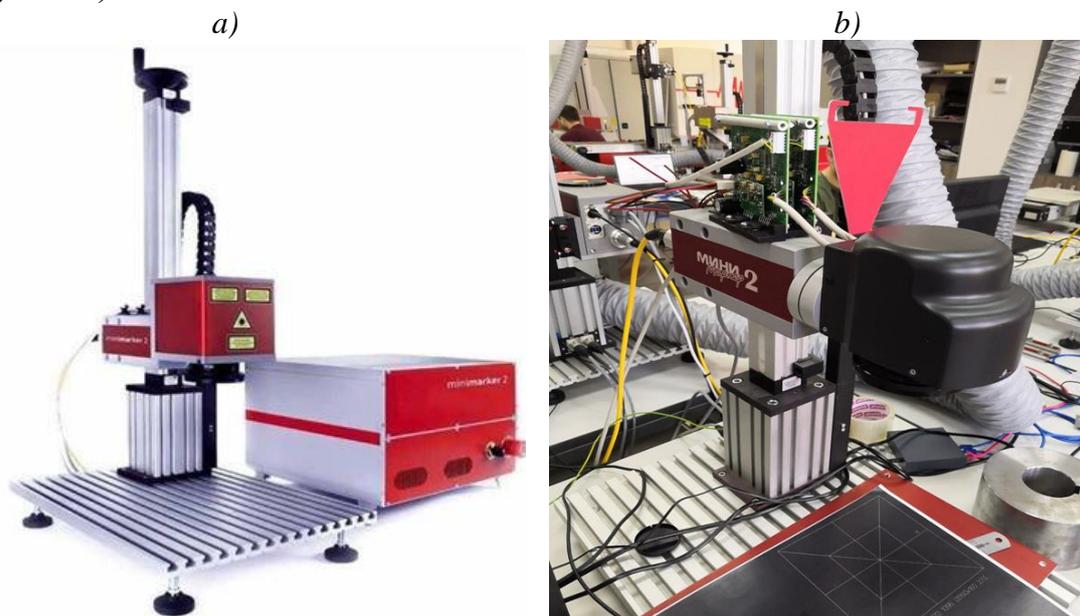


Рис. 5. Лазерный маркировщик «МиниМаркер 2», оснащенный: *a)* штатной ЛГ; *b)* ЛГ с модифицированным полимерным корпусом

При этом в первую очередь были проверены на собираемость как конструкция полимерного корпуса ЛГ, так и ЛГ в целом. При всей «легкости» сборки корпуса и самой ЛГ были выявлены недостатки его конструкции и изготовления, а также определены способы их устранения. Детальный анализ этих недостатков способствовал дальнейшему совершенствованию как конструкторских решений, так и производственных процессов.

Первый недостаток заключается в том, что тонкие стенки верхнего полукорпуса после его изготовления на 3D-принтере в отличие от сборочной 3D-модели корпуса неплотно прилегают к боковым поверхностям нижнего полукорпуса по всему периметру. Из-за нарушения герметичности конструкции в образующиеся щели со временем при эксплуатации лазерной установки в цехе будет проникать пыль и влажность, что неудовлетворительно скажется на функционировании сканаторов и зеркал, расположенных в корпусе ЛГ, и ввинченном в него объективе, а также на передаче лазерного луча в зону обработки.

Второй недостаток связан с тем, что резьбы под крепление полукорпусов друг к другу и хомута снаружи к задней стенке нижнего полукорпуса при завинчивании в них стальных винтов «срываются» после поджатия соединяемых деталей друг к другу. Срыв резьбы не только затрудняет сборку и обслуживание устройства, но и может привести к

необходимости полной замены деталей, что увеличивает стоимость и время производства.

При ручном нарезании резьбы М14 в отверстиях, большая часть которых расположена на задней стенке нижнего полукорпуса, а малая часть – торце верхнего полукорпуса, требовалось выполнить такое закрепление в тисках предварительно собранного корпуса, которое не обеспечить на фрезерном станке с ЧПУ. Этот недостаток указывает на проблемы технологичности конструкции.

Для устранения первого недостатка в конструкцию полукорпусов было введено их соединение по периметру по типу «паз-шип». Вторым недостатком был устранен заменой резьбовых отверстий гладкими немного большего диаметра и введением в конструкцию нижнего полукорпуса специальных углублений под гайки, ориентирующих их так, чтобы они не проворачивались при закручивании винтов особенно при поджатии соединяемых деталей друг к другу. От выпадения гаек из углублений проводилась их фиксация силиконовым герметиком. Третий недостаток был устранен отказом от резьбовых отверстий и тем, что в месте расположения этих отверстий и сопряжения полукорпусов в конструкцию верхнего полукорпуса введены два специальных зубца, входящих в пазы нижнего полукорпуса с получением гладких сквозных отверстий, образующих специальный вывод кабелей сканаторов для их внешнего подключения к управляющим платам, вынесенным за пределы корпуса ЛГ, одновременно поджимающих эти кабели.

Кроме того, на основе опыта проектирования корпуса ЛГ для лазерной установки «ТурбоМаркер» с анализом его прочности и жесткости в САЕ-модуле САД-системы SolidWorks в конструкцию нижнего полукорпуса ЛГ лазерной установки «МиниМаркер 2», в его нижнюю стенку введены выборки и ребра жесткости для уменьшения расхода полимерного материала при его изготовлении. При использовании сплошных деталей корпуса ЛГ предлагаемой конструкции второго опытного образца его материалоемкость снижается в 5,1 раза, а при использовании деталей с выборками и ребрами жесткости – в 5,5 раз.

Получившаяся новая конструкция верхнего и нижнего полукорпусов позволила отказаться от проведения их окончательной постобработки. После перепроектирования корпуса ЛГ он также был изготовлен на 3D-принтере (см. рисунок 6) для сборки второй опытной ЛГ.

При этом полная сборка первой опытной ЛГ, несмотря на выявленные недостатки конструкции ее корпуса, и ее монтаж в лазерную установку показали, что оптическая система не нарушена и ее юстировка была проведена без каких-либо проблем, то есть установка оказалась полностью готовой к эксплуатации.

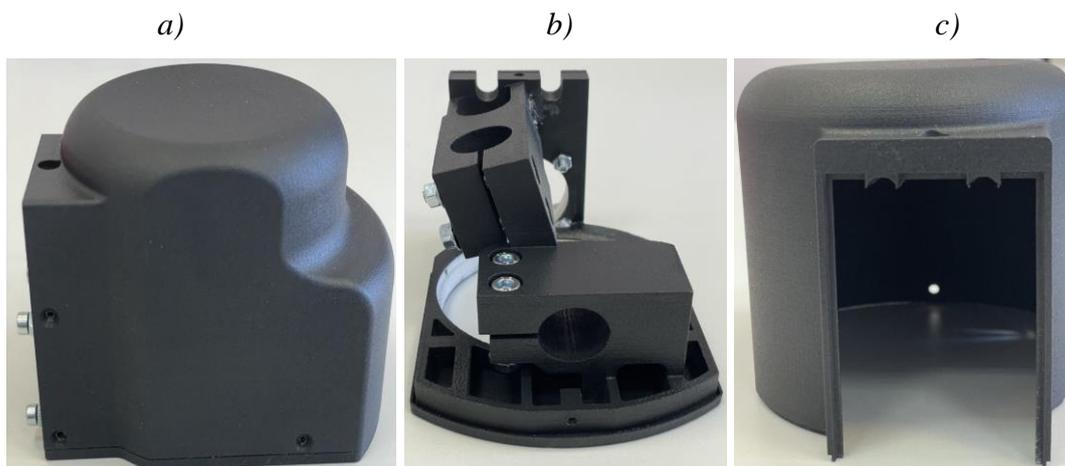


Рис. 6. Детали второго опытного корпуса лазерной головки, изготовленные из полиамида ПА 12 на 3D-принтере по технологии SLS: *a)* корпус лазерной головки в сборе; *b)* нижний полукорпус; *c)* верхний полукорпус

Одним из условий снижения материалоемкости и внесения изменений в конструкцию корпуса ЛГ является сохранение его прочности и жесткости, так как их значительное снижение может привести к недопустимому отклонению лазерного луча от вертикали, и, следовательно, отразиться на функционировании самой лазерной головки. Для выяснения этого обстоятельства в САЕ-модуле САД-системы SolidWorks был проведен сравнительный анализ прочности и жесткости корпуса ЛГ.

Результаты сравнительного анализа, проведенные в САЕ-модуле САД-системы SolidWorks, для варианта конструкции корпуса ЛГ, входящей в состав лазерной установки «ТурбоМаркер», представлены в [25, 26], а для варианта конструкции корпуса ЛГ, входящей в состав лазерной установки «МиниМаркер 2» на рисунках 7 и 8. Для каждого варианта конструкции корпуса ЛГ проверялась его прочность под действием силы тяжести, возникающей под собственным весом.

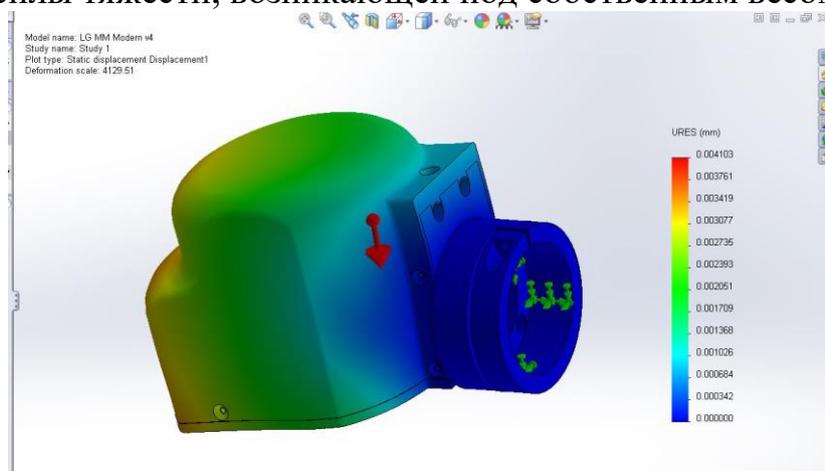


Рис. 7. Результат моделирования деформации пластикового корпуса ЛГ лазерной установки «МиниМаркер 2»

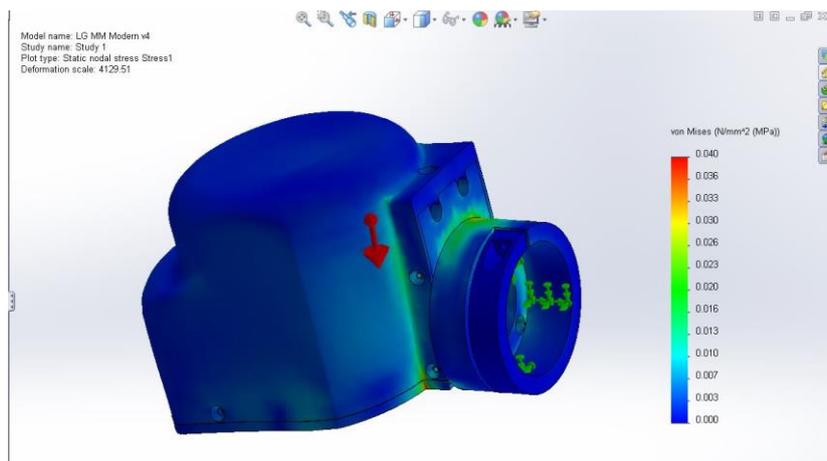


Рис. 8. Результат моделирования растягивающих напряжений, возникающих в пластиковом корпусе ЛГ лазерной установки «МиниМаркер 2»

Результаты моделирования процесса деформации для вариантов корпуса ЛГ убедительно показали, что для его деталей, выполненных из дюралюминия Д16, можно заменить материал на пластик PA 12 и изготовить их на 3D-принтере по технологии SLS. Также эффективным является введение в конструкцию деталей корпуса выборок и ребер жесткости, так как его материалоемкость при этом существенно снижается (в 5,5 раза).

Заключение

Таким образом, разработка компактных, легких и обтекаемой формы пластиковых корпусов лазерных головок, подлежащих изготовлению на аддитивном оборудовании и позволяющих использовать лазерные головки различного вида в качестве функционального лазерного инструмента, является актуальной, а внедрение модульного принципа в структуру лазерных установок позволит создавать модульное производственное оборудование, обеспечивающее возможность изменения его технических характеристик за счет его переконфигурации в соответствии с потребностями заказчика, то есть обеспечивать его кастомизацию.

Реализация предложенной концепции модульного лазерного оборудования с использованием современных материалов и технологий производства открывает перспективы создания нового поколения multifunctional лазерных комплексов, способных эффективно решать широкий спектр технологических задач при минимальных затратах на приобретение и эксплуатацию. Это соответствует современным тенденциям развития производственных технологий, направленным на повышение гибкости, универсальности и экономической эффективности технологического оборудования.

Благодарность: Авторы выражают благодарность компании ООО «Лазерный центр» за дополнительную информацию, предоставленные консультации, оборудование и помощь в проведении испытаний опытных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Петкова А. П., Ганзуленко О. Ю. Технологические аспекты маркировки изделий машиностроения прецизионным импульсным лазером // Современное машино-строение. Наука и образование: материалы 4-й Международной научно-практической конференции / Под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 1177–1187. 1308 с.
- [2] 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.
- [3] 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. DOI: 10.1088/1742-6596/1109/1/012036.
- [4] Шаховской, А. В. Автоматизация производственных линий при процессе перенастройки оборудования / А. В. Шаховской, В. Н. Власова, Е. Г. Ротанов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2023. – № 2(18). – С. 72-78. – DOI 10.46573/2658-5030-2023-2-72-78.
- [5] Авторское свидетельство № 1585141 А1 СССР, МПК В25Н 3/02. Перестраиваемая тара : № 4366716 : заявл. 30.12.1987 : опубл. 15.08.1990 / А. С. Суляев, В. Ф. Филаретов, Г. И. Хвощевский ; заявитель ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ.В.В.КУЙБЫШЕВА.
- [6] Босинзон, М. А. Проектирование и наладка мехатронных устройств перестраиваемого (реконфигурируемого) Оборудования / М. А. Босинзон, Е. Г. Нахапетян, Е. В. Макальская // Приводная техника. – 2007. – № 2. – С. 4-13.
- [7] Дегтярев, А. Р. Надежность реконфигурирующихся комплексов интегрированной модульной авионики / А. Р. Дегтярев, С. К. Киселев // Автоматизация процессов управления. – 2016. – № 1(43). – С. 25-30.
- [8] J. Wang, J. Shan, J. Li, J. Zhang. (2011). The Reconfigurable Design of Stone Grinding Equipment. Advanced Materials Research, ISSN: 1662-8985, Vols. 230-232, pp 324-328.

- [9] Губарев, А. В. Система SMED или быстрая переналадка оборудования / А. В. Губарев, А. А. Рубцова // NovaInfo.Ru. – 2022. – № 132. – С. 20-21.
- [10] Лялькова, А. С. Бережливое производство как инструмент повышения эффективности деятельности предприятия. Быстрая переналадка (SMED) / А. С. Лялькова, Е. В. Конышева // Вызовы современности и стратегии развития общества в условиях новой реальности : Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 10 июня 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ИРОК", Общество с ограниченной ответственностью "Издательство АЛЕФ", 2022. – С. 304-310. – DOI 10.34755/IROK.2022.12.37.041.
- [11] Архипов, А. В. Метод рационального упорядочения работ на технологической линии при наличии переналадок оборудования / А. В. Архипов, А. В. Сошников // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 3: Экономические, гуманитарные и общественные науки. – 2020. – № 3. – С. 3-8. – DOI 10.46418/2079-8210_2020_3_1.
- [12] Малышев, Е. Н. Групповой подход как решение задачи сокращения времени на переналадку загрузочных устройств технологического оборудования в машиностроении / Е. Н. Малышев, В. А. Федоров // Advances in Science and Technology : Сборник статей LVI международной научно-практической конференции, Москва, 31 октября 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Актуальность.РФ", 2023. – С. 90-91.
- [13] Быков, Ю. М. Уменьшение времени переналадки технологического оборудования ремонтного производства / Ю. М. Быков, С. Ю. Быков, А. Г. Схиртладзе // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2013. – № 6. – С. 08-09.
- [14] O.M. Zaleta, O.Yu. Povstyanoy, L.F. Ribeiro, R.G. Redko, T.Ye. Bozhko, T.I. Chetverzhuk (2023). Automation of optimization synthesis for modular technological equipment. Journal of Engineering Sciences, Vol. 10(1), pp. A6-A14, doi: 10.21272/jes.2023.10(1).a2.
- [15] Александров, В. А. Принцип модульности в построении современных робототехнических систем / В. А. Александров, И. В. Меркурьев // Гироскопия и навигация. – 2007. – № 2(57). – С. 112.
- [16] M.Ya. Afanasev, Yu.V. Fedosov, A.A. Krylova, S.A. Shorokhov (2017). Modular industrial equipment in cyber-physical production system: Architecture and integration. 21st Conference of Open Innovations Association (FRUCT), pp. 1-7, doi: 10.23919/FRUCT.2017.8250158.
- [17] Разработка модульной конструкции технологического оборудования с ЧПУ для использования в образовательной деятельности / А. А.

- Букин, Д. Н. Гопанцов, О. Ю. Дунаевская, А. С. Бинчуров // Современные тенденции развития системы подготовки обучающихся: региональная практика : Материалы международной научной конференции, Красноярск, 03 декабря 2024 года. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2025. – С. 358-361.
- [18] Григорьева, Н. С. Принципы модульной технологии и конструкции в сборочном производстве / Н. С. Григорьева // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : Материалы III межрегиональной научно-практической конференции, Севастополь, 19–23 сентября 2017 года / Научный редактор Б.В. Соколов. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2017. – С. 102-104.
- [19] Наупарац, Д. Функциональная модульность при проектировании электрогидравлических систем привода движения затворов в составе гидромеханического оборудования на объектах гидротехники / Д. Наупарац, Д. Пршич // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2024. – Т. 311. – С. 26-36.
- [20] Остриков О.М., Рюмцев А.А. Новый метод использования принципов модульности в конструкции беспилотных летательных аппаратов // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Машиностроение. – 2019. – № 4 (117). – С. 59-62.
- [21] Мареев, Е. Л. Модульные инструментальные системы - основа высокоэффективной обработки / Е. Л. Мареев, К. А. Украженко // Шестьдесят восьмая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: сборник материалов конференции, Ярославль, 22 апреля 2015 года. – Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2015. – С. 497-500.
- [22] 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 конф. ММЕSE] – 2018. – № 7. – С. 506-515.
- [23] Николаев А.Д., Пьяе П.А., Помпеев К.П., Васильев О.С., Горный С.Г. Внедрение систем лазерной обработки в состав многооперационных обрабатывающих центров // Металлообработка – 2019. – № 5(113). – С. 26-33.
- [24] Nikolaev A.D., Phyo A.P., Pompeev K.P., Vasilev O.S. Modernization of machining centers through integration of laser systems into their

composition // International Review of Mechanical Engineering – 2020, Vol. 14, No. 2, pp. 100-104.

- [25] 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 // Известия высших учебных заведений. Приборостроение – 2022. – Т. 65. – № 1. – С. 49-57.
- [26] Pompeev K., 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.

P.A.Pyae¹, K.P.Pompeev², O.S.Vasilev³

PROSPECTS FOR CREATING LASER INSTALLATIONS BASED ON A MODULAR PRINCIPLE

^{1,2} ITMO University, St. Petersburg, Russia;

³ Laser Centre LLC, St. Petersburg, Russia.

Abstract

The paper examines the issue of creating laser systems with a structure formed according to a modular principle, which ensures their reconfiguration according to customer needs. Unlike traditional non-reconfigurable laser systems designed for specific tasks, the proposed concept considers the laser head as a functional modular tool. A laser system created according to the modular principle includes a power module, a laser module, a control module, a functional modular tool, and a movement axis module. Special attention is paid to the development of compact, lightweight, and ergonomic plastic laser head housings manufactured using additive technologies. This approach will allow the creation of customized production equipment adaptable to various types of laser processing and capable of functioning in hard-to-reach places.

Key words: Modular laser installation, reconfigurable equipment, functional modular instrument, laser head, modular principle, customization, polymer materials, additive technologies

REFERENCES

- [1] Petkova A.P., Ganzulenko O.Y. Technological aspects of marking machine-building products with a precision pulse laser // Modern mechanical engineering. Science and education: materials of the 4th

- International scientific-practical conference / Ed. by M.M. Radkevich and A.N. Evgrafov. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2014. pp. 1177-1187. 1308 p. (rus.)
- [2] 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.
- [3] 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. DOI: 10.1088/1742-6596/1109/1/012036.
- [4] Shakhovskoy A.V., Vlasova V.N., Rotanov E.G. Automation of production lines during equipment reconfiguration process // Bulletin of Tver State Technical University. Series: Technical Sciences. – 2023. – № 2(18). – pp. 72-78. – DOI 10.46573/2658-5030-2023-2-72-78. (rus.)
- [5] Author's certificate № 1585141 A1 USSR, IPC B25H 3/02. Reconfigurable container: № 4366716: applied 30.12.1987: published 15.08.1990 / A.S. Sulyaev, V.F. Filaretov, G.I. Khvoshchevsky; applicant FAR EASTERN POLYTECHNIC INSTITUTE NAMED AFTER V.V. KUIBYSHEV. (rus.)
- [6] Bosinzon M.A., Nakhapetyan E.G., Makalskaya E.V. Design and adjustment of mechatronic devices for reconfigurable equipment // Drive Technology. – 2007. – № 2. – pp. 4-13. (rus.)
- [7] Degtyarev A.R., Kiselev S.K. Reliability of reconfigurable integrated modular avionics complexes // Automation of Control Processes. – 2016. – № 1(43). – pp. 25-30. (rus.)
- [8] J. Wang, J. Shan, J. Li, J. Zhang. (2011). The Reconfigurable Design of Stone Grinding Equipment. Advanced Materials Research, ISSN: 1662-8985, Vols. 230-232, pp 324-328.
- [9] Gubarev A.V., Rubtsova A.A. SMED system or quick equipment changeover // NovaInfo.Ru. – 2022. – № 132. – pp. 20-21. (rus.)
- [10] Lyalkova A.S., Konysheva E.V. Lean production as a tool for improving enterprise efficiency. Quick changeover (SMED) // Challenges of modernity and strategies for society development in the new reality: Collection of materials of the VIII International Scientific and Practical Conference, Moscow, June 10, 2022. – Moscow: Limited Liability Company "IROK", Limited Liability Company "ALEF Publishing", 2022. – pp. 304-310. – DOI 10.34755/IROK.2022.12.37.041. (rus.)
- [11] Arkhipov A.V., Soshnikov A.V. Method for rational ordering of work on the technological line in the presence of equipment changeovers // Bulletin of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 3: Economic, Humanitarian and Social Sciences. – 2020. – № 3. – pp. 3-8. – DOI 10.46418/2079-8210_2020_3_1. (rus.)

- [12] Malyshev E.N., Fedorov V.A. Group approach as a solution to the problem of reducing the time for changeover of loading devices of technological equipment in mechanical engineering // *Advances in Science and Technology: Collection of articles of the LVI international scientific-practical conference, Moscow, October 31, 2023.* – Moscow: Limited Liability Company "Aktualnost.RF", 2023. – pp. 90-91. (rus.)
- [13] Bykov Y.M., Bykov S.Y., Skhirtladze A.G. Reducing the changeover time of technological equipment for repair production // *Repair. Restoration. Modernization.* – 2013. – № 6. – pp. 08-09. (rus.)
- [14] O.M. Zaleta, O.Yu. Povstyanoy, L.F. Ribeiro, R.G. Redko, T.Ye. Bozhko, T.I. Chetverzhuk (2023). Automation of optimization synthesis for modular technological equipment. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 10(1), pp. A6-A14, doi: 10.21272/jes.2023.10(1).a2.
- [15] Alexandrov V.A., Merkuryev I.V. The principle of modularity in the construction of modern robotic systems // *Gyroscopy and Navigation.* – 2007. – № 2(57). – p. 112. (rus.)
- [16] M.Ya. Afanasev, Yu.V. Fedosov, A.A. Krylova, S.A. Shorokhov (2017). Modular industrial equipment in cyber-physical production system: Architecture and integration. 21st Conference of Open Innovations Association (FRUCT), pp. 1-7, doi: 10.23919/FRUCT.2017.8250158.
- [17] Development of modular design of CNC technological equipment for use in educational activities / A.A. Bukin, D.N. Gopantsov, O.Y. Dunaevskaya, A.S. Binchurov // *Modern trends in the development of the training system for students: regional practice: Materials of the international scientific conference, Krasnoyarsk, December 03, 2024.* – Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University, 2025. – pp. 358-361. (rus.)
- [18] Grigorieva N.S. Principles of modular technology and design in assembly production // *Promising directions for the development of domestic information technologies: Materials of the III interregional scientific-practical conference, Sevastopol, September 19-23, 2017 / Scientific editor B.V. Sokolov.* – Sevastopol: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", 2017. – pp. 102-104. (rus.)
- [19] Nauparats D., Prshich D. Functional modularity in the design of electrohydraulic drive systems for gate movement as part of hydromechanical equipment at hydraulic engineering facilities // *Proceedings of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneev.* – 2024. – Vol. 311. – pp. 26-36. (rus.)
- [20] Ostrikov O.M., Ryumtsev A.A. New method of using modularity principles in the design of unmanned aerial vehicles // *Bulletin of Brest State*

- Technical University. Series: Mechanical Engineering. – 2019. – № 4 (117). – pp. 59-62. (rus.)
- [21] Mareev E.L., Ukrazhenko K.A. Modular tool systems - the basis of highly efficient processing // Sixty-eighth All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Undergraduates and Postgraduates of Higher Educational Institutions with International Participation: collection of conference materials, Yaroslavl, April 22, 2015. – Yaroslavl: Yaroslavl State Technical University, 2015. – pp. 497-500. (rus.)
- [22] Nikolaev A.D., Pyae P.A., Pompeev K.P., Vasiliev O.S. Modernization of machining centers through integration of laser systems into their composition // Modern Mechanical Engineering. Science and Education [conf. materials MMESE] – 2018. – № 7. – pp. 506-515. (rus.)
- [23] Nikolaev A.D., Pyae P.A., Pompeev K.P., Vasiliev O.S., Gorny S.G. Introduction of laser processing systems into multi-operation machining centers // Metalworking – 2019. – № 5(113). – pp. 26-33. (rus.)
- [24] Nikolaev A.D., Phyto A.P., Pompeev K.P., Vasilev O.S. Modernization of machining centers through integration of laser systems into their composition // International Review of Mechanical Engineering – 2020, Vol. 14, No. 2, pp. 100-104.
- [25] Pyae P.A., Pompeev K.P., Nikolaev A.D., Vasiliev O.S., Gorny S.G. Modernization of the laser head housing design taking into account the capabilities of additive equipment // News of Higher Educational Institutions. Instrument Engineering – 2022. – Vol. 65. – № 1. – pp. 49-57. (rus.)
- [26] Pompeev K., 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.