ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.373.826:621.375.826:621.7.09:544.032.65:67.02:621.715.4
doi:10.18720/SPBPU/2/id-151

М.Н. Ткаченко[1], К.П. Помпеев[2], О.С. Васильев[3], А. Рамос-Веласкес[4]

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ ГОЛОВКИ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЛОКА ИЗМЕНЕНИЯ ХОДА ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА В ПРОСТРАНСТВЕ

[1]Максим Николаевич Ткаченко,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79187885467, E-mail: maxim.tkachenko00@inbox.ru

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

[3]Олег Сергеевич Васильев,
ООО «Лазерный центр»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79213097890, E-mail: tesla_90@mail.ru

[4]Алехандро Рамос-Веласкес,
ООО «Лазерный центр»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79520974027, E-mail: alexandroramosv@itmo.ru

Аннотация

В работе рассматриваются методы получения микроотверстий и полостей сложной формы, а также конусных отверстий путем их механической, электрофизической, электрохимической обработки и лазерной обработки. Выявлены основные проблемы, возникающие при формировании таких конструкционных элементов, где особое внимание уделено лазерной перфорации. В работе предложена технология, позволяющая обеспечить лазерную обработку микроотверстий с прямыми стенками, а также конических отверстий со степенью расширения от входа

к выходу в контролируемом диапазоне. Представлена конструкция блока лазерной головки, позволяет расширить ход распространения луча в пространстве и реализовать предлагаемую технологию лазерной перфорации отверстий.

Ключевые слова: лазерная сканирующая система, лазерная обработка, лазерное сверление, лазерная перфорация, микроотверстия, оптическая система.

Введение

В настоящее время в приборостроительной отрасли четко обозначилась тенденция повышения требований к качеству деталей, обеспечить которое можно на основе совершенствования и разработки эффективных технологий их формообразования [1, 2].

Значительная часть всей номенклатуры деталей приборов представляет собой различные осесимметричные, в том числе с тонкими стенками, а также плоские детали, в конструкции которых присутствуют такие элементы, как отверстия малого размера (микроотверстия), а также конусные отверстия и полости разной формы [3].

Использование лазерных технологий в процессах формообразования таких конструкционных элементов обладает рядом преимуществ в том числе: локальностью процесса обработки, отсутствием режущего инструмента и высокой производительностью. При этом спектр обрабатываемых материалов достаточно широк. Однако для обеспечения требуемой формы конструктивных элементов существенным ограничением является форма лазерного излучения и ограничение в диапазоне хода распространения лазерного луча в пространстве [4-7].

Методы обработки микроотверстий и полостей

Механическая обработка микроотверстий и полостей. В настоящее время существуют различные методы обработки отверстий малого диаметра и полостей сложной формы. Традиционным методом является механическая обработка спиральными сверлами. Однако во время этой операции возникают трудности, связанные с воздействием сил резания на инструмент [1].

Применение механического сверления при обработке микроотверстий имеет существенные недостатки, ключевым из которых является высокое отношение длины сверла к его диаметру. При этих условиях инструмент имеет низкую жесткость, что приводит к его частой поломке, а повышение прочностных характеристик сверла кратно повышает его стоимость.

Зачастую после выполнения сверления отверстия в месте выхода сверла остаются заусенцы, а для получения точных отверстий необходима

их доработка разверткой (рис. 1) [1]. Но такой способ сложно применять при получении микроотверстий ввиду того, что трудно изготовить нужный для этого инструмент. Учитывая перечисленные недостатки обработка сверлением высокопрочных металлов и сплавов, керамики, алмазов и т.п. может быть затруднительна.

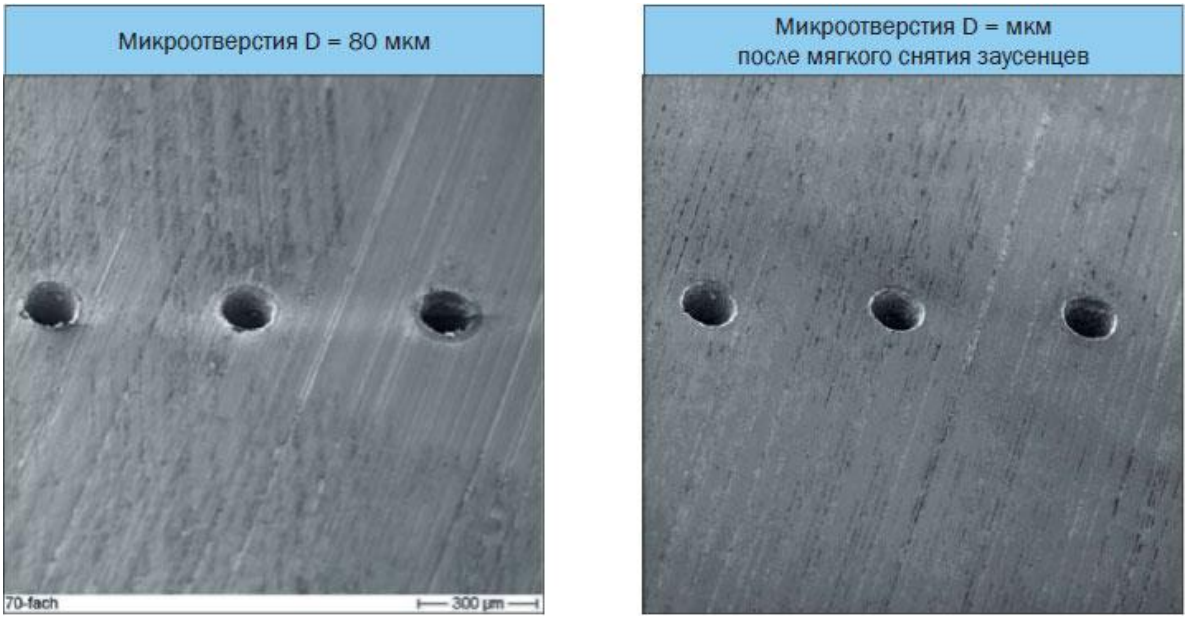

Рис. 1. Обработка микроотверстий спиральным сверлом с последующим снятием образовавшихся заусенцев

Также необходимо помнить, что инструменты, используемые при механической обработке, обычно имеют определенную геометрию, которая ограничивает возможные формы отверстий. Так, сверла имеют круглое поперечное сечение рабочей части, что делает возможным обработку только цилиндрических (конических) отверстий. Фрезерные инструменты могут создавать полости, сквозные окна и отверстия разной формы поперечного сечения, но они также имеют свои ограничения из-за геометрии своих режущих кромок.

Немеханические методы обработки микроотверстий и полостей. В приборостроении для выполнения отверстий малого диаметра широко используются комбинированные методы обработки, в частности, электроэрозионный и электрохимический [1]. При таком способе образуется неравномерный дефектный слой, зачастую возникают высокие значения шероховатости, форма и размер получаемых отверстий ограничены толщиной электроэрозионной проволоки, также возможны затруднения при проектировании средств технологического оснащения. В целом, появляются повреждения на внутренней поверхности и на входе в отверстие [8-11].

Для удаления дефектного слоя и доводки отверстий малого диаметра применяется электрохимическая обработка, заключающаяся в анодном растворении материала. Такой комбинированный способ обработки имеет

низкую производительность и не одинаково эффективен для различных типов обрабатываемых металлических и неметаллических (керамика, кристаллы и т.п.) материалов [12].

Лазерная обработка микроотверстий и полостей сложной формы. Современным решением обработки разнообразных материалов является лазер. Лазерная обработка имеет значительные преимущества перед механическими, химическими и электрическими методами воздействия на материал: бесконтактность, размер рабочего инструмента, локальность процесса, высокая производительность и т.д. [13, 14] Лазерная перфорация позволяет получать различные по форме отверстия в разных материалах, включая труднообрабатываемые сплавы [15].

Существует два способа лазерного сверления: прошивка отверстия лазерным пучком, которое может быть получено либо единичным импульсом (рис. 2, *а*), либо импульсной ударной прошивкой (рис. 2, *б*); а также сверление подвижным отклоненным лазерным лучом, применяющее метод лазерной пробивки отверстий (рис. 2, *в*) или спиральной перфорации (рис. 2, *г*) [16, 17].

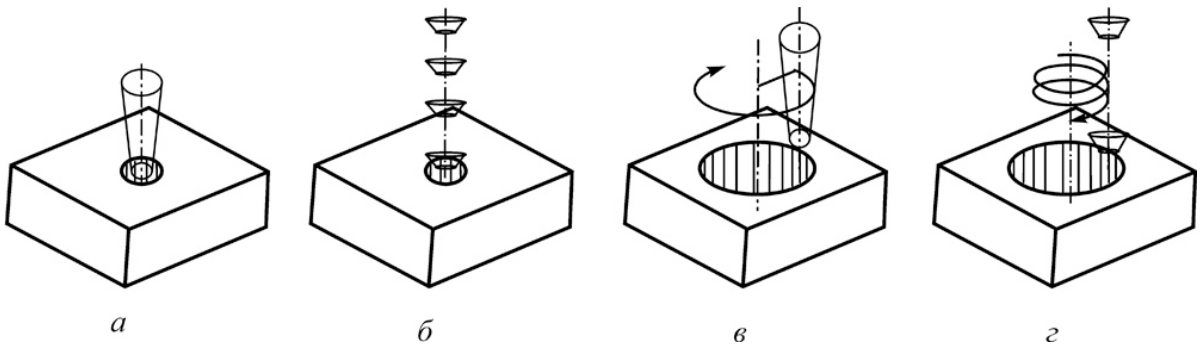

Рис. 2. Схемы лазерного сверления: *а* – прошивка единичным импульсом; *б* – импульсная прошивка; *в* – контурная резка; *г* – спиральная резка

Распространенным способом лазерной обработки микроотверстий является спиральная резка. В данном случае обработка проводится с предварительным получением стартового отверстия импульсной прошивкой в центре с дальнейшим выходом луча на заданный контур и перемещением по нему. Лазерный луч перемещается по периметру и постепенно углубляет отверстие, понижая фокальное положение с каждым вращением по спирали. Перегретый материал в процессе выбрасывается вверх под действием давления паров отдачи и газовой струи. Фокус лазерного луча регулируется таким образом, чтобы он всегда находился на дне отверстия [18].

По данной технологии возможно получать отверстия диаметром от 300 мкм. Кроме того, можно обрабатывать не только отверстия, но и полости различных форм. Также стоит отметить, что спиральная обработка особенно

эффективна в тех случаях, когда диаметр обрабатываемого отверстия близок к диаметру фокального пятна.

Обработка лазером несет испарительный (абляционный) характер, удаление материала происходит в области фокального пятна, где концентрируется максимальная плотность энергии. При таких условиях фокусировка луча происходит по форме «песочных часов» (рис. 3), что не позволяет обеспечить по всей его длине равномерный съем материала со стенок отверстий и полостей [19].

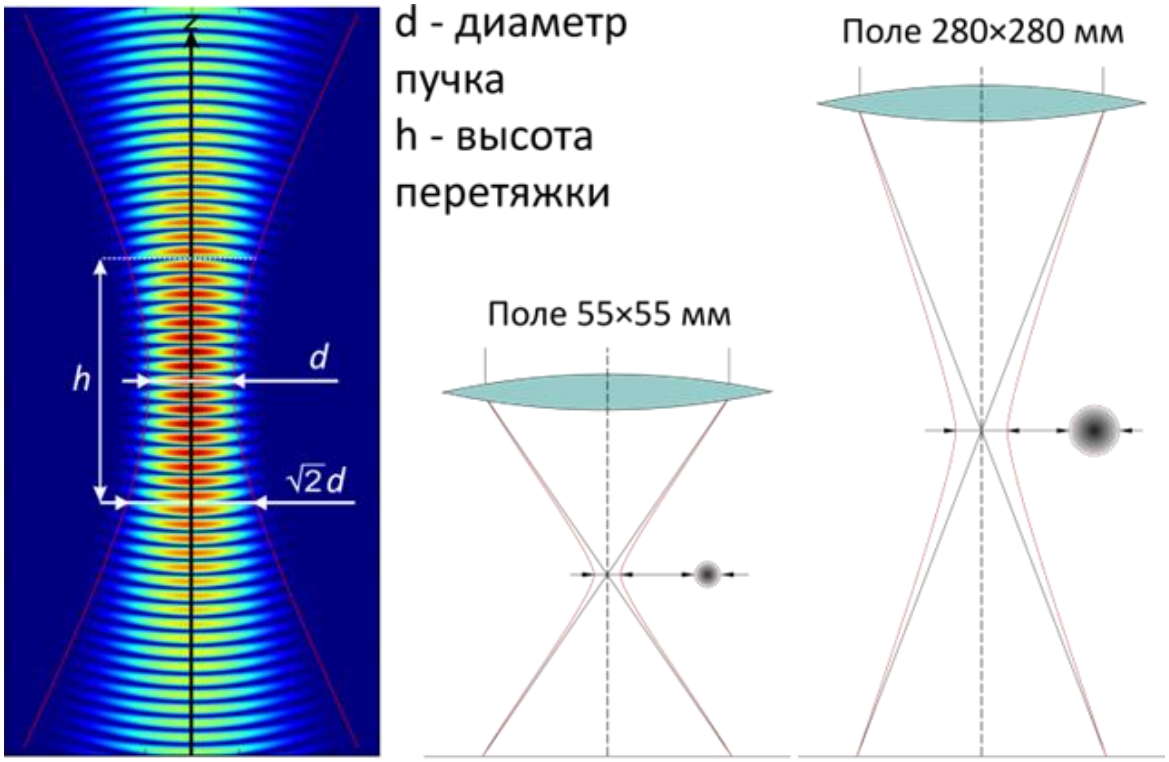

Рис. 3. Форма «песочных часов» при лазерном сверлении

В этом случае полученные отверстия и полости имеют наклонные стенки и низкое качество поверхностей, а глубина обработки ограничена диаметром фокусного пятна (рис. 4).

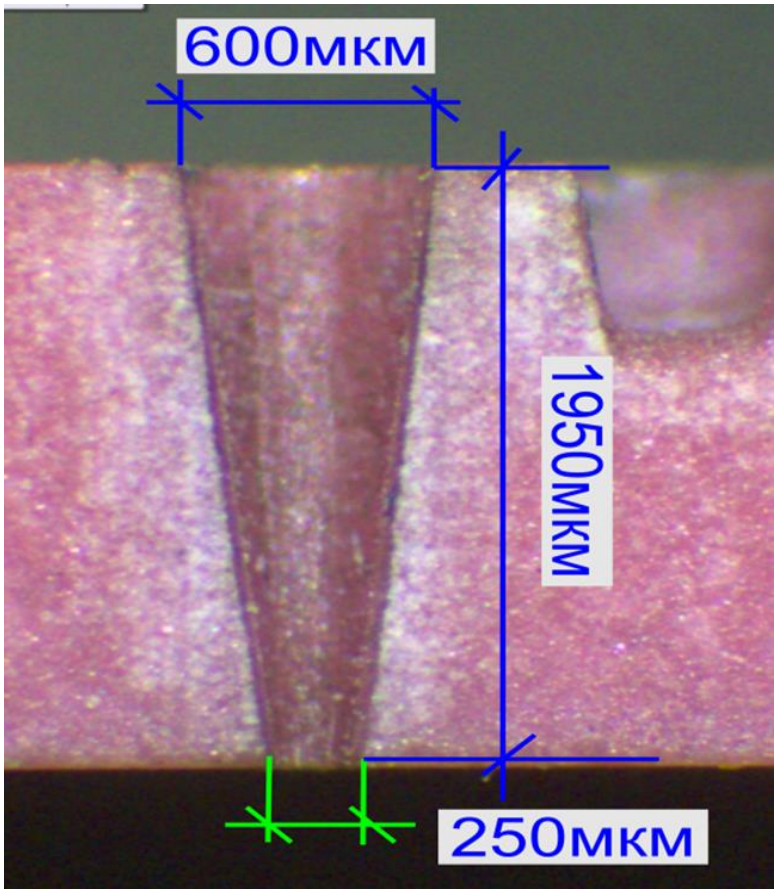

Рис. 4. Конусное отверстие, полученное лазерным сверлением корундовой керамики

Предлагаемое решение

Для того чтобы обеспечить удаление материала только в зоне фокального пятна предлагается сформировать оптическую систему, которая позволит отклонять лазерный луч в сторону. Изменяя угол отражения луча и траекторию его перемещения, можно управлять формой и размерами отверстия как в сечении, перпендикулярном оси, так и осевом (рис. 5) [20].

Однако, при отклонении луча в сторону, происходит изменение диаметра пятна. Это говорит о том, что плотность энергии и форма испарения изменяются в зависимости от положения луча на плоскости. При таких условиях получение отверстий и полостей с ровными стенками нереализуемо, так как невозможно сфокусировать излучение в нулевой точке поля, при позиционировании излучения под углом в какой-либо ненулевой координате [20].

Следовательно, требуется добиться движения луча состоящего из двух синхронизированных вращений. Одно вращение перемещает ось луча поперек заготовки, а другое вращает сам луч.

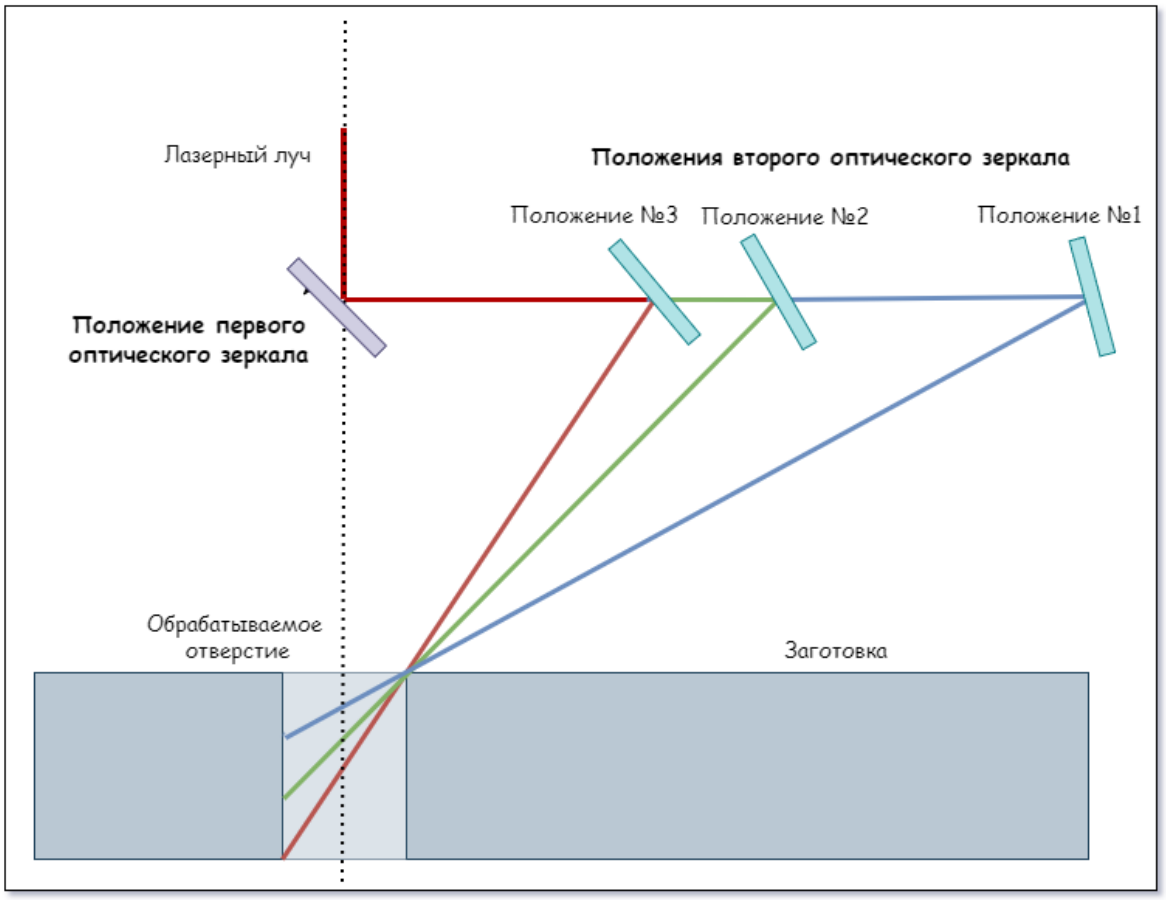

Рис. 5. Принцип действия метода спирального сверления при помощи оптических отклоняющих элементов

Подобно режущим кромкам механического спирального сверла, всегда одна и та же часть лазерного луча контактирует со стенкой отверстия за время одного оборота. Если вращение луча отсутствует, то форма сечения отверстия воспроизводит профиль луча [20]. Оба вращательных движения могут быть реализованы с помощью вращения оптических отражающих элементов.

При наклоне луча относительно оси вращения выходящий луч описывает конус. Угол конуса определяет входной диаметр, а смещение позволит контролировать наклон стенок отверстий [20]. Изменяя два параметра, наклон и сдвиг, можно создавать цилиндрические микроотверстия, а также конические отверстия со степенью расширения от входа к выходу.

Результаты

Для увеличения диапазона распространения лазерного луча в пространстве предлагается разработать блок, интегрируемый в лазерную установку. В основе оптической сканирующей системы данного блока, используются отклоняющие оптические зеркала. Использование зеркал в

качестве основных оптических элементов обусловлено их способностью эффективно отражать лазерное излучение, обеспечивая точное управление траекторией луча.

Два зеркала, располагаются последовательно, где первое – отклоняет лазерный луч на угол 90° по направлению ко второму зеркалу, второе, в свою очередь, – осуществляет дальнейшее отклонение лазерного луча к обрабатываемой поверхности. При этом обеспечивается возможность регулировки угла падения луча к поверхности материала.

Очевидно, что при изменении угла поворота второго зеркала для достижения требуемого наклона лазерного луча, необходимо также обеспечить соответствующее изменение расстояния между первым и вторым зеркалами для того, чтобы сохранить фокусное пятно лазерного луча на заданной оси вращения, обеспечить точность обработки и прямолинейность стенок отверстий и полостей.

Таким образом, для обеспечения требуемой функциональности оптической системы необходимо предусмотреть механизм, который позволит не только изменять угол наклона второго зеркала, но и регулировать расстояние между двумя зеркалами.

Общий вид разработанной конструкции блока лазерной головки представлен на рис. 6. Блок крепится к нижней крышке головки посредством трех специализированных стоек (поз. 1), обеспечивающих надежную фиксацию и жесткость конструкции.

К корпусу блока с использованием подшипникового узла (поз. 2) крепится зубчатое колесо (поз. 3). Зубчатое колесо выступает в качестве ключевого элемента, обеспечивающего вращение всей оптической системы, в том числе – отклоненного лазерного луча.

На зубчатом колесе закреплены две параллельные линейные направляющие (поз. 4). На них расположены держатели оптических зеркал (поз. 5), которые имеют возможность перемещения вдоль направляющих. На держателях установлены воротки (поз. 6) для ручной настройки угла наклона зеркал.

На рис. 7 представлен вид конструкции блока головки снизу.

В случае необходимости работы лазерного станка в “стандартном” режиме (без отклонения луча) первый держатель с зеркалом может быть отодвинут. В таком положении лазерный луч проходит через насадку, не отклоняясь от первоначальной траектории, и воздействует на обрабатываемую поверхность под прямым углом. Это позволяет сохранить исходный функционал лазерной установки.

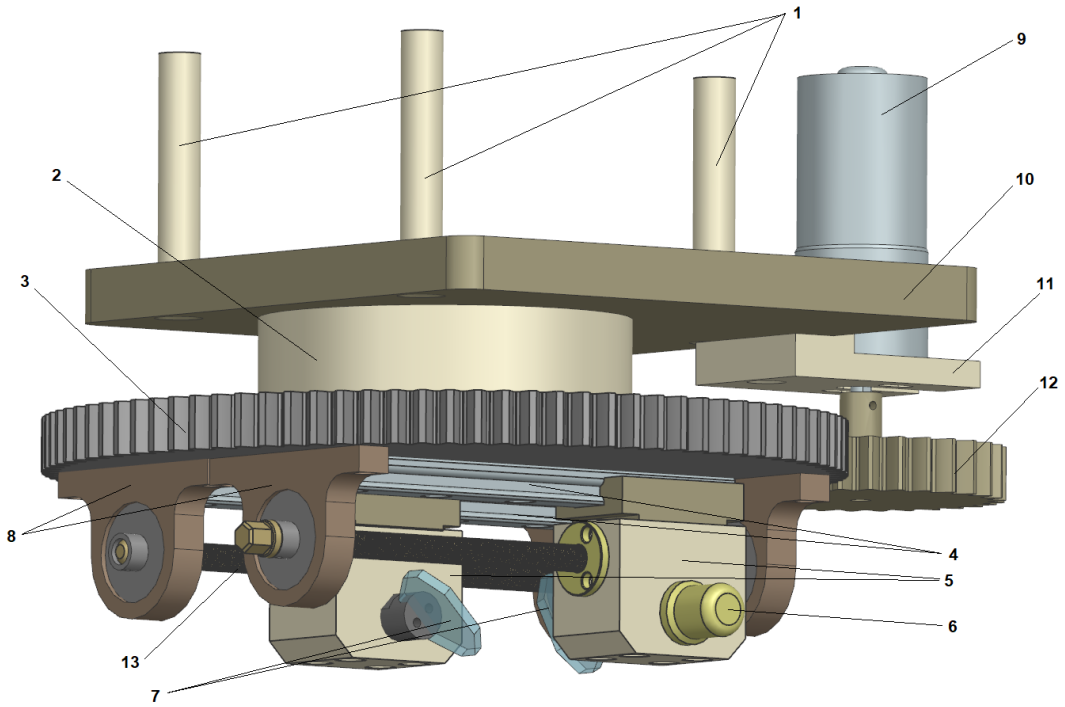

Рис. 6. Общий вид блока изменения хода распространения луча для модификации лазерной сканирующей системы наведения, где 1 – стойка, 2 – корпус, с подшипниковым узлом, 3 – зубчатое колесо, 4– линейная направляющая, 5 – держатель зеркала, 6 – вороток, 7 – оптическое отражающее зеркало, 8 – подшипниковый узел, 9 – мотор, 10 – верхняя крышка блока, 11 – кронштейн для крепления мотора, 12 – шестерня.

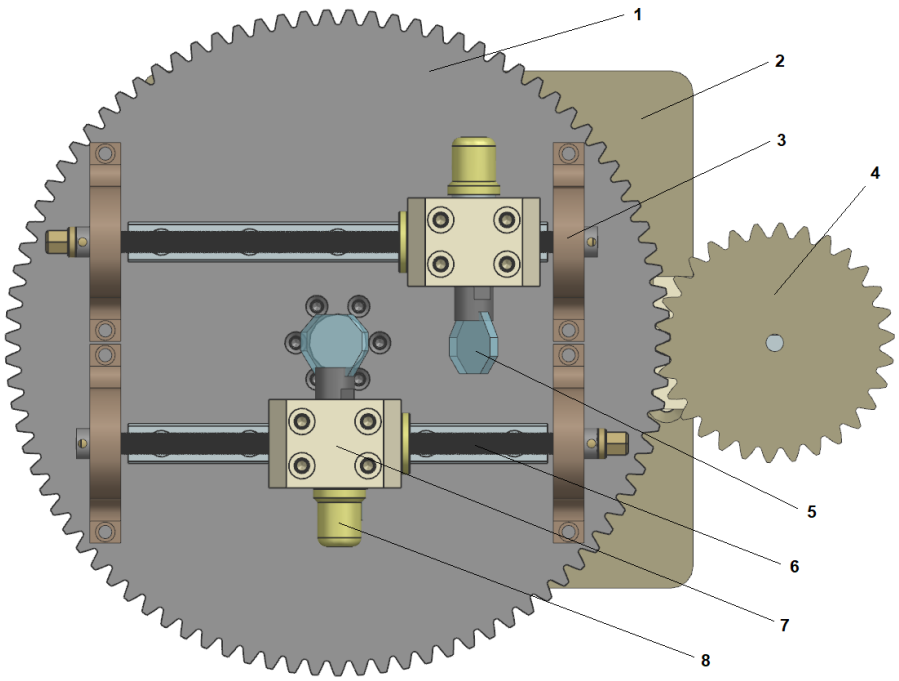

Рис. 7. Блок лазерной головки, изменяющий ход распространения луча для модификации лазерной сканирующей системы. Вид снизу, где 1 – зубчатое колесо, 2 – верхняя крышка блока, 3 – подшипниковый узел, 4 – шестерня, 5 – оптическое отражающее зеркало, 6 – ходовой винт, 7 – держатель зеркала, 8 – вороток.

Обсуждение

Предлагаемая конструкция блока лазерной головки, позволяет расширить ход распространения луча в пространстве (рис. 8). Изменение угла подхода лазерного луча к обрабатываемой поверхности позволяет удалять материал только в зоне фокального пятна, а при углублении отверстия обеспечить корректировку фокусного расстояния. Использование предлагаемой технологии позволяет получать микроотверстия с прямыми стенками, а также конические отверстия с регулируемой степенью расширения от входа к выходу.

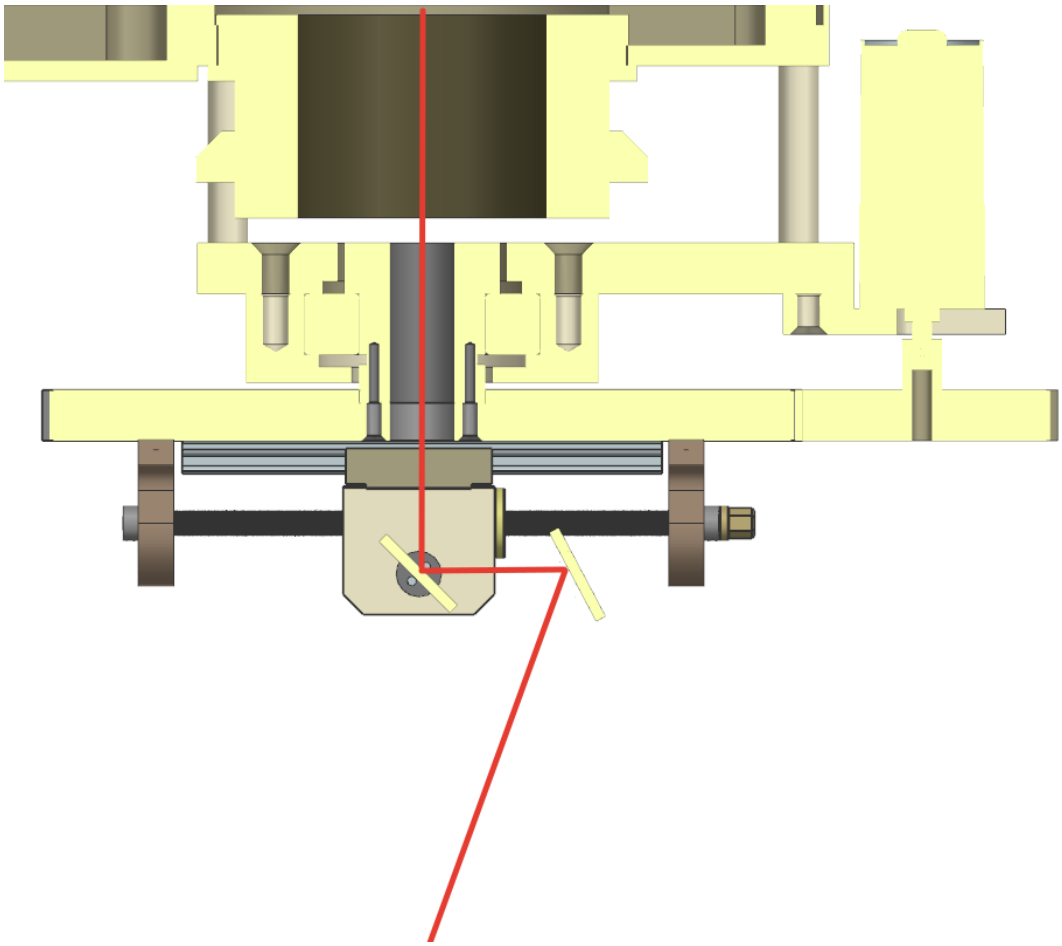

Рис. 8. Ход распространения отклоненного лазерного луча с использованием отражающих оптических элементов

Предлагаемая конструкция также имеет и недостатки, снижение влияния которых будет осуществляться в будущем. Так при обработке отверстий требуется обеспечить точное позиционирование оптических зеркал, их калибровку после установки, а также точную регулировку угла наклона. Для этого необходимо доработать конструкцию оптических

державок, реализовав вращение зеркал, например, с помощью зубчатой или винтовой передачи.

Блок лазерной головки оснащен мотором (см. рисунок 6, поз. 9), вращающим оптическую систему при заданных оборотах, что позволяет получать только цилиндрические и конические отверстия. Для обработки полостей сложной формы требуется обеспечить дискретное вращение зубчатого колеса и, как следствие, всей оптической системы изменения хода распространения луча. При этом вращение должно быть синхронизировано с системой управления лазерной установки.

Также стоит отметить, что перемещение и регулировка угла наклона оптических зеркал выполняются вручную, в этом случае процесс перфорации имеет низкую производительность в сравнении с традиционными методами обработки. Дальнейшие исследования должны быть направлены на повышение автоматизации работы с блоком изменения хода лазерного луча в пространстве для лазерной установки.

Заключение

Совершенствование технологических процессов получения микроотверстий и полостей сложной формы является важной задачей для предприятий приборостроительной отрасли. При этом технологии лазерной перфорации являются наиболее приоритетными ввиду отсутствия режущего инструмента, локальности процесса обработки, высокой производительности и возможности обработки различных материалов. Однако структура лазерного луча не позволяет получать микроотверстия и полости сложной формы из-за неравномерного распределения энергии в луче.

Для решения данной проблемы была предложена технология, позволяющая расширить ход распространения лазерного луча в пространстве, что делает возможным получение цилиндрических микроотверстий, а также конических, с регулируемой степенью расширения входного и выходного диаметра.

Для реализации предложенной технологии был разработан блок лазерной головки, обеспечивающий отклонение лазерного луча и его вращения. Однако конструкция модуля имеет и недостатки, ключевыми из которых являются: низкая производительность процесса обработки при работе установки с интегрированным блоком, а также недостаточная точность позиционирования оптических элементов системы. Дальнейшая работа будет направлена на модернизацию предложенной технологии обработки и реализующую ее конструкцию блока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Колганова Е. Н. Технологическое обеспечение вибрационной обработки деталей, имеющих малые пазы и отверстия: дис. – ЕН Колганова: Ростов н/Д, 2022. – 169 с.

[2] Николаев А. Д. и др. Внедрение систем лазерной обработки в состав многооперационных обрабатывающих центров // Металлообработка. – 2019. – №. 5 (113). – С. 26-33.

[3] Ломакин И. В. и др. Высокоэффективные технологии получения отверстий малого диаметра в деталях жидкостных ракетных двигателей //Инженерный журнал: наука и инновации. – 2023. – №. 3 (135). – С. 5.

[4] Nasedkin Yu. V., Khmelnitsky A. K. Laser cutting of carbon fiber-reinforced plastic thin sheets // Journal of Physics. Conf. Ser. 2018. Vol. 1109, N 1. P. 012041.

[5] 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 // Journal of Physics. Conf. Ser. 2018. Vol. 1109, N 1. P. 012036.

[6] Николаев А. Д., Помпеев К. П. Совершенствование лазерной головки за счет изменения топологии деталей ее корпуса и способа крепления коллиматора // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64. – №. 4. – С. 300-306.

[7] Andreev A. O., Kosenko M. S., Petrovskiy V. N., Mironov V. D. Prototyping of Dental Structures Using Laser Milling // Journal of Physics. Conf. Ser. 2016. Vol. 691, N 1. P. 012007.

[8] Резюков И. В., Резюкова Л. В. Современное состояние электрофизических методов размерной обработки отверстий малого диаметра в деталях из хрупких неметаллических материалов // Вестник Чувашского университета. – 2016. – №. 1. – С. 76-85.

[9] Кудеников Е. Ю., Бойко А. Ф. Исследование профиля прецизионных отверстий, получаемых методом электроэрозионной обработки // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2017. – №. 3. – С. 103-106.

[10] Оглезнев Н. Д., Абляз Т. Р. Влияние режимов электроэрозионной обработки на точность получения отверстий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – №. 4-2. – С. 396-398.

[11] Владыкин А. В., Макаров В. Ф. Повышение эффективности обработки отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных сплавов на основе применения метода электроэрозионного сверления // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. ПА Соловьева. – 2010. – №. 2. – С. 29-37.

[12] Рахимянов Х. М., Леонтьев И. А., Василевская С. И. Технологические перспективы комбинирования электроэрозионных и

электрохимических процессов в обработке отверстий малого диаметра // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2016. – №. 10. – С. 64.
[13] Przestacki D., Jankowiak M. Surface roughness analysis after laser assisted machining of hard to cut materials // Journal of Physics. Conf. Ser. 2014. Vol. 483, N 1. P. 012019.
[14] 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. Ser. Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 469, N 1. P. 012124.
[15] Maksarov V. V., Khalimonenko A. D. Quality assurance during milling of precision elements of machines components with ceramic cutting tools // International Review of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 5, N 12. Pp. 437-441.
[16] Бессонов Д. А. и др. Исследование особенностей применения короткого и ультракороткого импульсного лазерного излучения для прецизионной микрообработки материалов. Обзор и анализ // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 4. – №. 1 (81). – С. 69-76.
[17] Абрамов Д. В., Хорьков К. С., Прокошев В. Г. (2013) Способ пробивки микроотверстий лазерным импульсным излучением. Патент РФ №2492036 С1.
[18] Хайруллина Л. Р., Смородин Ф. К. Технология лазерного сверления и резки отверстий в изделиях авиастроения // Вестник Казанского государственного технического университета им. АН Туполева. – 2016. – Т. 72. – №. 2. – С. 38-41.
[19] 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, ISSN 0030–4042.
[20] Ткаченко М. Н. и др. Перспективы использования оптической сканирующей системы с измененными пространственными характеристиками распространения луча // Современное машиностроение: наука и образование 2024: материалы 13-й Международной научной конференции, 20 июня 2024 года / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024, с.721-736. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-133.

M. N. Tkachenko[1], K.P. Pompeev[2], O.S. Vasilev[3], A. Ramos-Velasquez[4]

MODERNIZATION OF THE LASER SCANNING HEAD BY USING A BLOCK FOR CHANGING THE COURSE OF THE LASER BEAM IN SPACE

[1,2]ITMO University, St. Petersburg, Russia;
[3,4]Laser Center LLC,St. Petersburg, Russia

Abstract

The paper considers methods for obtaining micro-holes and cavities of complex shape, as well as conical holes by their mechanical, electrophysical, electrochemical and laser processing. The main problems that arise during the formation of such structural elements, where special attention is paid to laser perforation, are identified. The paper proposes a technology that allows laser processing of micro-holes with straight walls, as well as conical holes with a degree of expansion from the inlet to the outlet in a controlled range. The design of the laser head unit is presented, which makes it possible to expand the beam propagation in space and implement the proposed technology of laser hole perforation.

Keywords: laser scanning system, laser processing, laser drilling, laser perforation, micro-hole, optical system.

REFERENCES

[1] Kolganova E. N. Technological support for vibration processing of parts with small grooves and holes: Dissertation – E.N. Kolganova: Rostov n/D, 2022. – 169 p. (rus.)
[2] Nikolaev A. D. et al. Implementation of laser processing systems in multi-operation machining centers // Metalworking. – 2019. – No. 5 (113). – Pp. 26-33. (rus.)
[3] Lomakin I. V. et al. Highly efficient technologies for obtaining small diameter holes in liquid rocket engine parts // Engineering Journal: Science and Innovations. – 2023. – No. 3 (135). – P. 5. (rus.)
[4] Nasedkin Yu. V., Khmelnitsky A. K. Laser cutting of carbon fiber-reinforced plastic thin sheets // Journal of Physics. Conf. Ser. 2018. Vol. 1109, N 1. P. 012041.
[5] 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 // Journal of Physics. Conf. Ser. 2018. Vol. 1109, N 1. P. 012036.

[6] Nikolaev A. D., Pompeev K. P. Improvement of laser head by changing the topology of its housing parts and the method of collimator attachment // Proceedings of Higher Educational Institutions. Instrument Engineering. – 2021. – Vol. 64. – No. 4. – Pp. 300-306. (rus.)
[7] Andreev A. O., Kosenko M. S., Petrovskiy V. N., Mironov V. D. Prototyping of Dental Structures Using Laser Milling // Journal of Physics. Conf. Ser. 2016. Vol. 691, No. 1. P. 012007.
[8] Rezukov I. V., Rezukova L. V. Current state of electrophysical methods for dimensional processing of small diameter holes in parts made of brittle non-metallic materials // Bulletin of Chuvash State University. – 2016. – No. 1. – Pp. 76-85. (rus.)
[9] Kudenikov E. Yu., Boyko A. F. Investigation of the profile of precision holes obtained by electrical erosion processing // Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2017. – No. 3. – Pp. 103-106. (rus.)
[10] Ogleznev N. D., Abyaz T. R. Influence of electrical erosion processing modes on the accuracy of hole production // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2013. – Vol. 15. – No. 4-2. – Pp. 396-398. (rus.)
[11] Vladikhin A. V., Makarov V. F. Increasing the efficiency of small diameter hole processing in heat-resistant alloy parts using electrical erosion drilling // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technology Academy named after P. A. Solovyov. – 2010. – No. 2. – Pp. 29-37. (rus.)
[12] Rakhimyanov K. M., Leontiev I. A., Vasilevskaya S. I. Technological prospects for combining electrical erosion and electrochemical processes in processing small diameter holes // Science-intensive technologies in machine engineering. – 2016. – No. 10. – P. 64. (rus.)
[13] Przestacki D., Jankowiak M. Surface roughness analysis after laser assisted machining of hard to cut materials // Journal of Physics. Conf. Ser. 2014. Vol. 483, No. 1. P. 012019.
[14] 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. Ser. Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 469, No. 1. P. 012124.
[15] Maksarov V. V., Khalimonenko A. D. Quality assurance during milling of precision elements of machines components with ceramic cutting tools // International Review of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 5, No. 12. Pp. 437-441.
[16] Bessonov D. A. et al. Study of the features of using short and ultrashort pulsed laser radiation for precision microprocessing of materials. Review and analysis // Bulletin of Saratov State Technical University. – 2015. – Vol. 4. – No. 1 (81). – Pp. 69-76. (rus.)

[17] Abramov D. V., Khor'kov K. S., Prokoshev V. G. (2013) Method of drilling microholes with laser pulsed radiation. Patent RUS №2492036 C1. (rus.)
[18] Khairullina L. R., Smorodin F. K. Technology of laser drilling and cutting of holes in aerospace products // Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev. – 2016. – Vol. 72. – No. 2. – Pp. 38-41. (rus.)
[19] Vasilev O. S., Veiko V. P., Gorny S. G., Ruzankina Yu. S. Laser installation for microstructuring the surface of metal using fiber laser // Optical Journal. – 2015. – Vol. 82. – No. 12. – P. 70–77, ISSN 0030–4042. (rus.)
[20] Tkachenko M. N. et al. Prospects for using an optical scanning system with modified spatial characteristics of beam propagation // Modern mechanical engineering: science and education 2024: proceedings of the 13th International Scientific Conference, Russia, June 20 / Ed. by A.N. Evgrafov and A.A. Popovich. – SPb.: POLITECH-PRESS, 2024, pp. 721-736. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-133. (rus.)