

М.Н. Ткаченко¹, К.П. Помпеев², О.С. Васильев³, А. Рамос-Веласкес⁴

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ С ИЗМЕНЕННЫМИ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛУЧА



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



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.: +79213097890, E-mail: tesla_90@mail.ru



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

Аннотация

В работе рассматриваются методы получения отверстий малого диаметра и микроотверстий, а также конусных отверстий и полостей сложной формы путем их механической и электрофизической обработки на различного типа станках с ЧПУ. Выявлены основные проблемы сверлильной, фрезерной, электроэрозионной и лазерной обработки при формировании таких конструктивных элементов. Также в работе рассматриваются перспективы развития методов лазерной обработки микроотверстий в соответствии с требуемым качеством получаемых изделий.

Ключевые слова: лазерная сканирующая система, лазерная обработка, лазерное сверление, микроотверстия, полости сложной формы, оптическая схема.

Введение

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

Значительная часть всей номенклатуры деталей приборов представляет собой тонкостенные осесимметричные (корпусы, чашечки, обоймы, цанги, штыри и т.д.), а также плоские детали, в конструкции которых присутствуют такие элементы, как отверстия малого размера, глухие отверстия, отверстия с резьбой, фильтры, а также конусные отверстия с разной формой стенок.

Объединение лазерных технологий и технологий механической обработки позволит дополнить традиционные процессы фрезерования материалов и выполнять их на обрабатывающих центрах [2–4]. Использование сконцентрированного потока энергии лазерного излучения в качестве рабочего инструмента позволит не только сократить расходы, связанные с износом механического контактного инструмента, но и выйти на принципиально новые диапазоны микрообработки различных изделий. При этом спектр видов лазерной обработки заготовок из различных материалов достаточно широк. Это маркирование [5], гравирование [6], в том числе 3D-рельефов, обработка керамических поверхностей [7] и труднообрабатываемых материалов [6], макро- и микроструктурирование поверхностного слоя [8, 9], резка металлов [10], сплавов и углепластика [11], сварка листового материала [12], перфорация [13] и другие виды обработки [4] и воздействия лазером [4, 14].

Сверление – это один из самых ранних технологических процессов, используемых для получения различных типов отверстий. С развитием технологий появилось множество нетрадиционных методов сверления, таких как электрохимическая обработка, электроэрозионная обработка, лазерно-лучевая обработка и т.д. Среди всех нетрадиционных методов сверление лазерным лучом показало большую приемлемость по сравнению с другими методами на основе применимости из-за более высокой производительности для широкого спектра материалов.

В соответствии с установившейся практикой, основным методом формообразования деталей различного конструктивного исполнения, остается механическая обработка. Однако, основными технологическими проблемами при обработке отверстий малого диаметра, в том числе микроотверстий, являются отсутствие необходимых инструментов и

сложность выбора способа обработки, позволяющего сделать деталь с требуемыми точностными и качественными характеристиками.

Существующие методы обработки отверстий малого диаметра, микроотверстий и полостей сложной формы

В настоящее время существуют различные методы обработки отверстий малого диаметра, микроотверстий и полостей сложной формы. К ним относятся: механическая, электроэрозионная, электрохимическая и лучевая обработка, которые более подробно рассмотрим ниже.

Методы механической обработки отверстий малого диаметра, микроотверстий и полостей сложной формы. Традиционный метод получения отверстий малого диаметра – обработка сверлами. Однако во время этой операции возникают трудности, связанные с воздействием сил резания на инструмент в начале и в конце обработки.

Сила подачи действует на сверло, создавая изгибающий момент, способный разрушить инструмент, что приводит к отклонению от требований конструкторской документации. Кроме того, могут возникать различные дефекты, в частности несоосность изготовленных отверстий. Для увеличения стойкости инструмента и обеспечения надежности процесса обработки сверление следует выполнять с постоянной малой подачей и большой скоростью резания [15].

Однако в данном случае применение механического сверления имеет существенные недостатки. Зачастую после выполнения операции на месте выхода сверла остаются заусенцы, которые необходимо удалять, а для получения отверстий с точным размером необходима их доработка разверткой [15]. В этом случае используется такой способ выполнения отверстий малого диаметра, при котором после сверления проводится раззенковка входного участка с последующим развертыванием отверстия. Но такой способ сложно применять при получении отверстий диаметром менее 1 мм (микроотверстий) ввиду того, что трудно изготовить нужный для этого инструмент и его стойкость при обработке будет невысока. Учитывая, что материалами для обработки могут быть высокопрочные металлы, керамика, алмазы и т.д. Дополнительно необходимо обеспечить удаление стружки из таких отверстий, поэтому требуется исключить нагружение полученных поверхностных слоев изделия.

Также стоит учитывать, что инструменты, используемые в механической обработке, обычно имеют определенную форму, которая ограничивает возможные формы отверстий. Например, сверла обычно имеют круглое сечение рабочей части, что делает возможным обработку только цилиндрических отверстий. Фрезерные инструменты могут

создавать полости, сквозные окна и отверстия с более сложными формами поперечного сечения [16], но они также имеют свои ограничения из-за геометрии своих режущих кромок, в отличие от лазерного вырезания [17].

Немеханические методы получения отверстий малого диаметра и микроотверстий. В машиностроении для выполнения отверстий малого диаметра широко используются комбинированные методы обработки, в частности, электроэрозионный и электрохимический [18]. При электроэрозионном способе на заготовку оказывается воздействие электрическими разрядами, а инструментом служит электрод-инструмент. В процессе обработки заготовка находится в рабочей среде, например, в дистиллированной воде или керосине. Данный способ позволяет формировать отверстия малого диаметра, а также различной формы (рис.1).

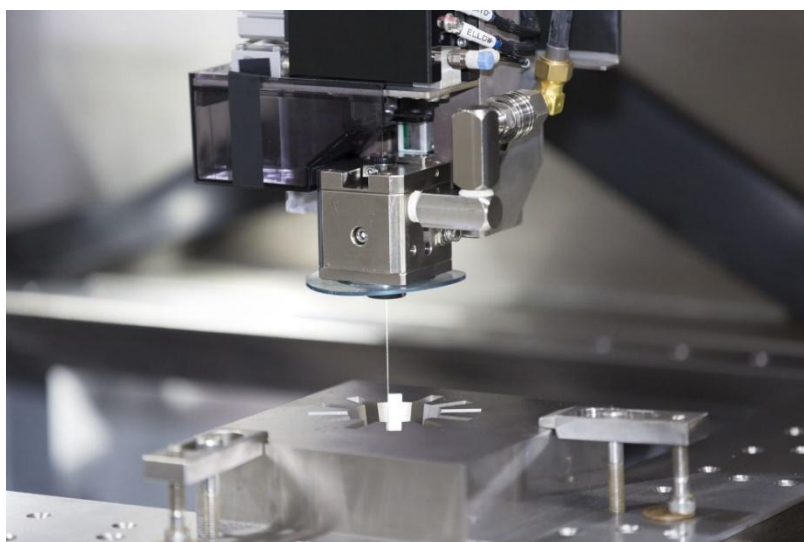


Рис. 1. Проволочная электроэрозионная обработка отверстия сложной формы

Однако при таком способе образуется 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 и входной поверхностях отверстия. Дефектный слой имеет неровную поверхность с высокими остаточными напряжениями.

Для удаления поврежденного слоя и доводки отверстий малого диаметра применяется электрохимическая обработка, заключающаяся в анодном растворении материала. Процесс обработки проходит в рабочей среде электролита, в качестве электролита используют водные растворы соляной кислоты или хлорида натрия. Однако данный способ не одинаково эффективен для различных материалов, среди которых находятся как металлы, так и неметаллы: керамика, кристаллы и т.п.

Современным решением обработки разнофазных материалов является лазер. Лазер имеет значительные преимущества перед механическими, химическими и электрическими методами воздействия на материал: бесконтактность, размер рабочего инструмента, локальность процесса и тд. Длина волны излучения, его пространственно временные характеристики напрямую влияют на качество обработки. Кроме того, лазерные системы неприхотливы, в общем случае не имеют расходных материалов и имеют достаточную вариацию исполнений для обработки 98% используемых в производстве материалов.

Обработка лазером несет испарительный (абляционный) характер. При лазерном сверлении материал удаляется в виде смеси расплавленных и испаренных частиц, соотношение которых зависит от свойств материала и характеристики источника лазерного излучения.

Лазерная перфорация позволяет получать различные по форме отверстия в разных материалах, включая труднообрабатываемые сплавы. Ограничением может служить только диаметр сфокусированного луча и области геометрической тени, куда лазерному излучению не проникнуть. Возможно сверление отверстий под малыми углами к поверхности. Высокая производительность этого метода обеспечивает получение сотен и тысяч отверстий в одной детали.

Лазерное сверление выполняется различными способами в зависимости от толщины заготовки, диаметра и глубины отверстия, его точности и желаемой воспроизводимости. 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).

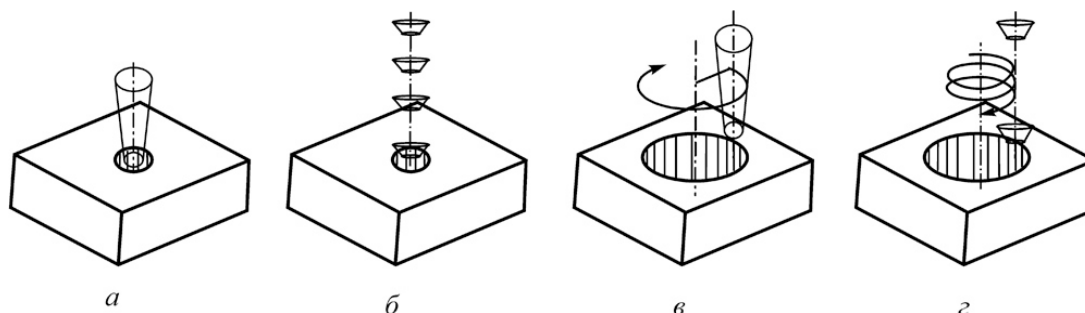


Рис. 2. Схемы лазерного сверления: а – прошивка единичным импульсом; б – импульсная прошивка; в – контурная резка; г – спиральная резка

Первый способ – прошивка отверстия лазерным лучом. Производится одним или множеством импульсов лазера, где излучение всегда падает сверху вниз и хорошо кинжально фокусируется, при этом необходимо

обеспечить высокую плотность мощности (рис.3). Перемещение пучка осуществляется посредством пространственно осевого движения лазерной фокусирующей системы или перемещением изделия под неподвижным лазерным соплом. Также присутствует возможность использовать поддув газом через сопло. Размеры фокусного пятна в зависимости от диаметра отверстия составляют $df = 0,05 \dots 0,75$ мм.

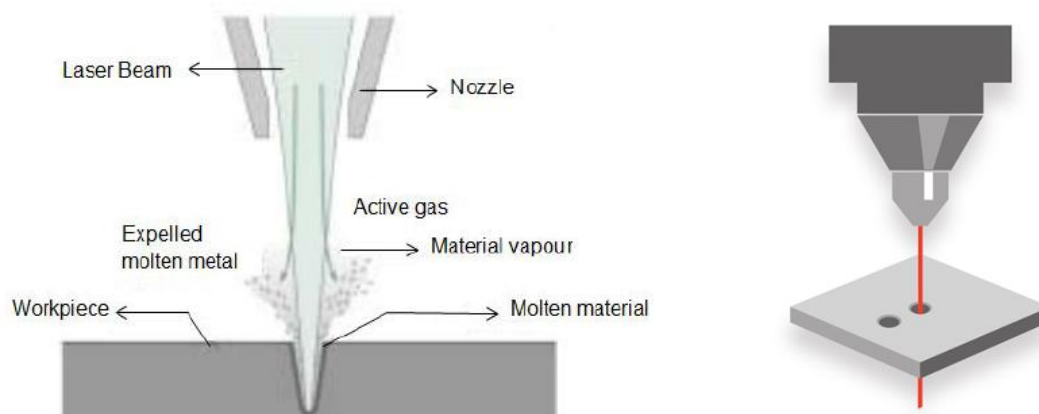


Рис. 3. Точечная прошивка отверстия лазерным пучком

Для лазерной прошивки используют лазеры мощностью от $1 \dots 5000$ Вт, в зависимости от типа материала и его реакции на электромагнитное излучение. Длительность импульсов выбирается исходя из фазовых переходов в материале при нагреве и итогового требуемого качества отверстия. Следует иметь в виду, что уменьшение продолжительности импульса снижает его энергию. Типичные значения длительности импульса, используемые для лазерного сверления, находятся в диапазоне $1 \text{ нс} \dots 2 \text{ мкс}$, однако имеются установки, работающие с длительностями импульсов в пикосекундном и фемтосекундном диапазоне. При этом уменьшение длительности импульса в ряде случаев позволяет повысить качество получаемых отверстий ценой увеличения времени обработки. Выбираемая частота импульсов должна обеспечивать оптимальный баланс между производительностью, нагревом и в итоге качеством обработки. При прошивке частоту можно регулировать в пределах от $1 \dots 20$ Гц до 1 МГц . Энергия импульса зависит от диаметра обрабатываемого отверстия, толщины и вида материала. С ее ростом увеличивается производительность, но снижаются качественные характеристики отверстия [19, 20].

Размер фокального пятна определяет диаметр обрабатываемого отверстия. При прошивке тонких материалов (до 1 мм) диаметр пучка задается равным диаметру получаемого отверстия. Чем толще прошиваемый лист, тем больше требуемое фокусное расстояние линзы. Обычно оно составляет $10 \dots 250 \text{ мм}$. Фокальная точка может располагаться на поверхности обрабатываемой детали, выше или ниже ее в зависимости от того какие эффекты требуется обеспечить. Наиболее часто фокальную точку

устанавливают ниже поверхности на расстоянии, соответствующем 5...15% толщины материала. Наилучшее положение точки фокуса обычно определяют экспериментально, исходя из лучшего качества получаемого отверстия. Точность обработки снижается с увеличением длины волны лазерного излучения [19, 20].

В данном случае фокусировка луча происходит «песочными часами» (рис.4), следовательно при подобном способе обработки полученные отверстия имеют конусность стенок (рис.5).

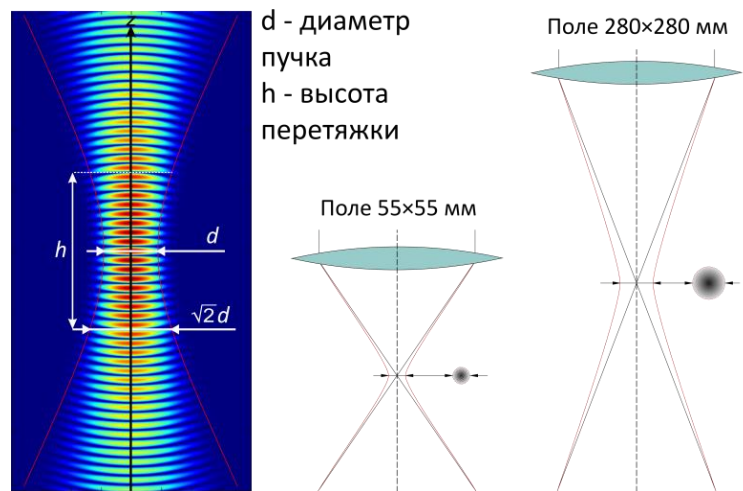


Рис. 4. Форма «песочных часов» при лазерном сверлении

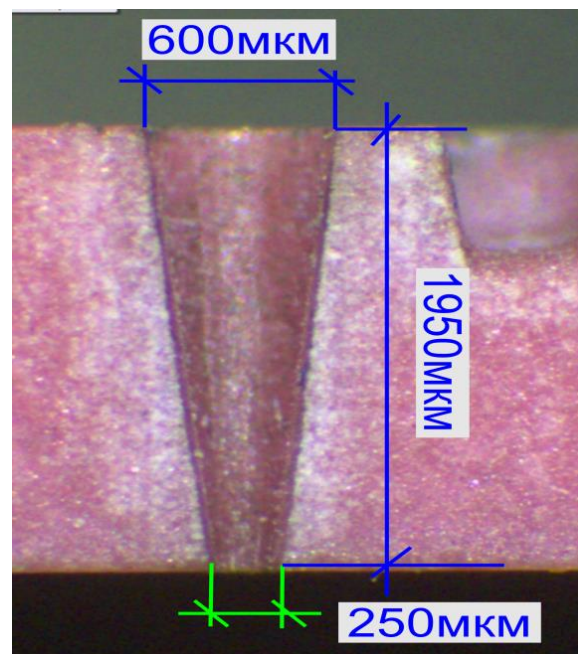


Рис. 5. Конусное отверстие, полученное лазерным сверлением корундовой керамики

Второй способ – резка с разверткой, обычно выполняется перемещением лазерного луча по заданному контуру. В данном случае в оптической схеме лазерной сканирующей системы располагается одно или

два зеркала, которые позволяют отклонить луч в сторону и двигать его по определенной траектории (рис.6). Обработка проводится аналогично лазерной резке с предварительным получением стартового отверстия в центре с дальнейшим выходом луча на заданный контур и перемещением по нему. Изменяя угол отражения луча и траекторию его перемещения, можно управлять формой и размерами отверстия как в сечении, перпендикулярном оси, так и осевом [17]. Следует отметить, что точность, достигаемая приемами векторной резки, выше, чем при прошивке. Данный метод обычно используется для получения отверстий диаметром более 0,5 мм.

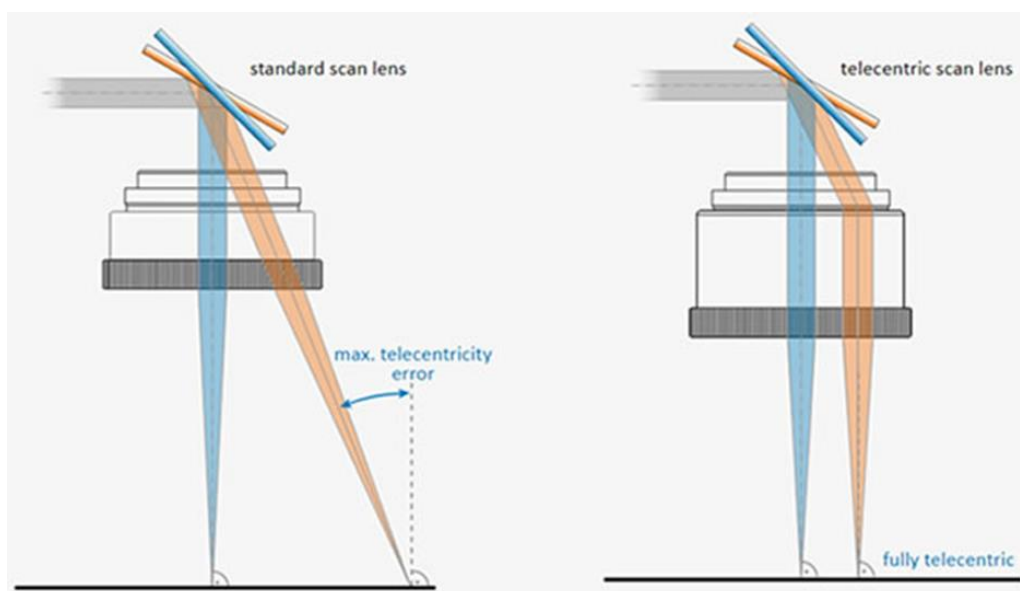


Рис. 6. Гальванометрическое отклонение лазерного луча при использовании объектива с плоским полем фокусировки и телецентрического объектива

Спиральное формирование отверстия является относительно новой технологией лазерной обработки отверстий, позволяющей существенно повысить их качество. В отличие лазерной резки, при сканировании отверстие получают за несколько проходов лазерного луча. Спиральное сверление по сравнению с прошивкой позволяет получать отверстия более правильной формы, а при использовании наносекундных лазеров – значительно уменьшить величину оплавленного слоя. По этой технологии получают отверстия диаметром от 300 мкм [17]. Кроме того, можно обрабатывать отверстия не только круглой формы. Спиральная обработка особенно эффективна в тех случаях, когда диаметр обрабатываемого отверстия близок к диаметру фокального пятна.

Результаты

При спиральной перфорации сфокусированный лазерный луч вращается 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. После создания сквозного отверстия лазерный луч несколько раз перемещают вокруг отверстия, чтобы сгладить края. В результате этого процесса могут быть получены глубокие отверстия высокого качества и разнообразной формы (рис. 7–9).

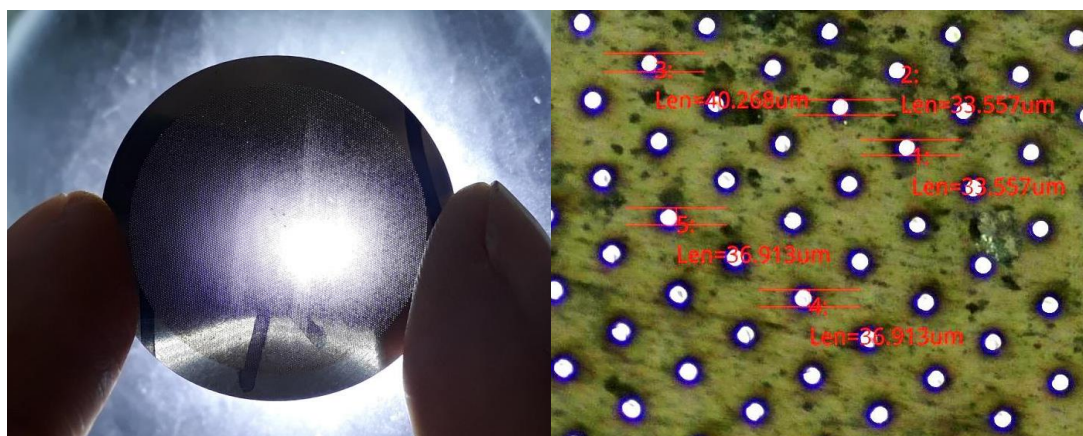


Рис. 7. Перфорация инвара толщиной 300 мкм. Размер отверстий 30...35 мкм с шагом 100 мкм



Рис. 8. Перфорация титана с толщиной 0,3 мм. Отверстия – шестиугольник размеров 0,8 мм

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

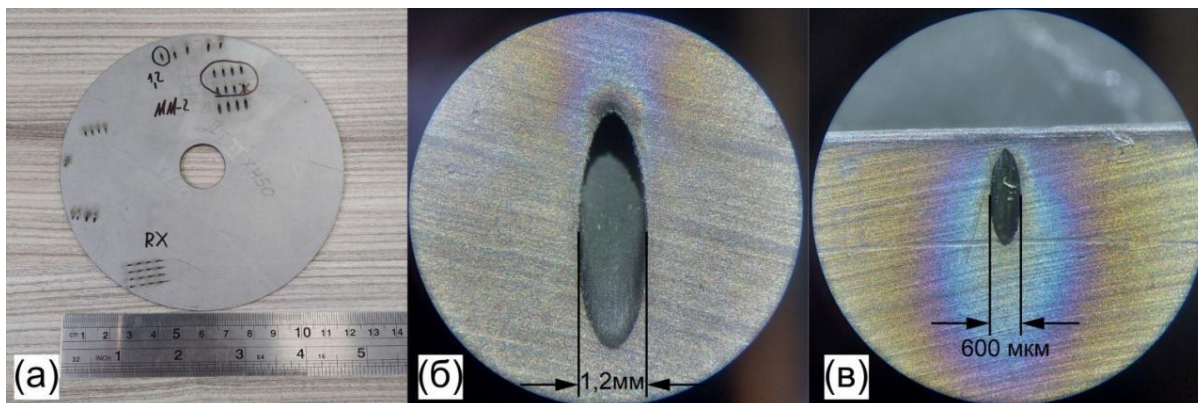


Рис. 9. Косое отверстие в жаропрочной стали турбинного двигателя, в заготовке толщиной 1,5 мм

Следовательно, требуется добиться движения луча состоящего из двух синхронизированных вращений. Одно вращение перемещает ось луча поперек заготовки, а другое вращает сам луч (рис.10).

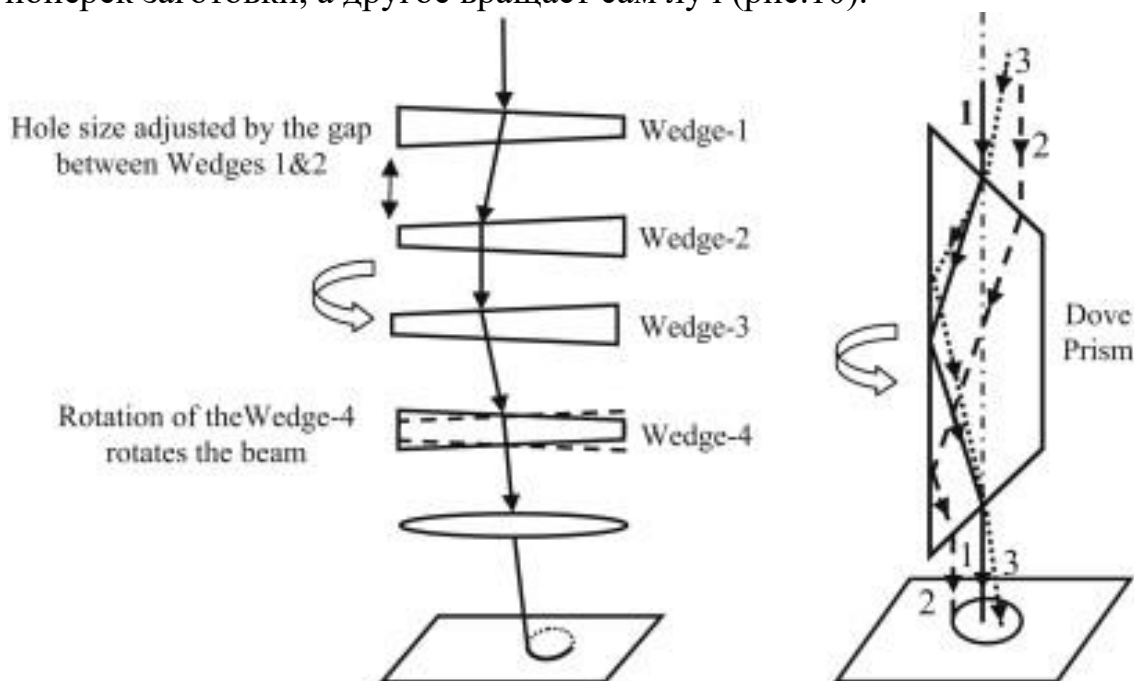


Рис. 10. Принцип действия метода спирального сверления при помощи оптических отклоняющих элементов [13]

Обсуждение

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. Оба вращательных движения могут быть реализованы с помощью вращения оптических прозрачных

преломляющих элементов [13]. За один цикл работы такого элемента сам луч вращается два раза. Если луч сместить параллельно оптической оси, то ось выходящего луча движется по круговой траектории с частотой вращения, вдвое превышающей частоту вращения отклоняющего элемента (рис.10).

При наклоне луча относительно оси вращения выходящий луч описывает конус. Угол конуса определяет входной диаметр, а смещение приводит к конусности отверстия. Изменяя два параметра, наклон и сдвиг, можно создавать цилиндрические микроотверстия, а также конические отверстия разной конусностью.

Оптический элемент устанавливается в высокоскоростном двигателе с полым валом. Смещение лазерного луча осуществляется моторизованным перемещением лазерного зеркала, а наклон – моторизованной клиновой призмой. Все двигатели управляются внешним блоком управления, который предоставляет интерфейс для изменения параметров. В двигатель с полым валом также встроена полуволновая пластина, которая вращает поляризацию, синхронизированную с лазерным лучом. Оптика сверления допускает частоту вращения до 20000 об/мин. Диаметр спирали находится в диапазоне 0–400 мкм, а соотношение сторон отверстий может достигать 1:40 для толщины материала 2 мм. Возможны конические отверстия со степенью расширения от входа к выходу в диапазоне от 1:4 до 2:1 [13].

Таким образом, лазерная система должна обеспечивать возможность создания контролируемой геометрии стенки полости или отверстия любой формы в зоне реза, обеспечивая высокую точность и повторяемость процесса. Кроме того, такая лазерная система позволит усовершенствовать существующие методы лазерной перфорации, что значительно повысит качество производимых изделий и увеличит их функциональные возможности, а также снизит затраты на производство благодаря оптимизации процесса.

Заключение

Использование лазерного оборудования с ЧПУ при обработке полостей и микроотверстий имеет следующие достоинства:

- лазерная обработка обладает преимуществом отсутствия физического контакта с материалом, что исключает необходимость использования расходных материалов, таких как сверла и фрезы.
- сравнительный анализ размеров рабочего инструмента подтверждает преимущество лазерной обработки перед традиционными методами: лазерный луч имеет диаметр 50 мкм, в то время как фреза имеет диаметр 100 мкм, что свидетельствует о более высокой точности и возможности работы с более мелкими деталями.

- возможность получения отверстий с контролируемыми углами открывает новые перспективы для применения лазерного сверления в различных технических задачах, где требуется особая конфигурация отверстий.
- не критичная зависимость от материала обработки делает лазерную обработку более универсальным и гибким методом, поскольку разные типы материалов могут быть обработаны с использованием соответствующих лазерных излучателей, что повышает его эффективность и применимость в различных областях производства.
- наличие большого опыта в освоении существующих методов сверления подтверждает готовность к инновациям. Разработка прототипа лазерной головки для более качественного типа сверления подчеркивает актуальность исследований в этой области, поскольку расширяет возможности применения лазерного сверления и повышает эффективность производственных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Колганова Е. Н. Технологическое обеспечение вибрационной обработки деталей, имеющих малые пазы и отверстия : дис. – Е.Н. Колганова: Ростов н/Д, 2022. – 169 с.
- [2] Николаев А.Д. и др. Модернизация обрабатывающих центров посредством интеграции в их состав лазерных систем // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2018. – №. 7. – С. 506-515.
- [3] Николаев А. Д. и др. Внедрение систем лазерной обработки в состав многооперационных обрабатывающих центров // Металлообработка. – 2019. – №. 5 (113). – С. 26-33.
- [4] 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.
- [5] Петкова А.П., Ганзуленко О.Ю. Технологические аспекты маркировки изделий машиностроения прецизионным импульсным лазером // Современное машиностроение. Наука и образование. 2014. No 4. С. 1177–1187.
- [6] 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.
- [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] 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.
- [9] Васильев, О.С., Горный, С.Г. Технология создания поверхностных микроструктур на листовых материалах с использованием волоконного лазера // Металлообработка, Издательство «Политехника». – 2016. – No 3 (93). – С. 20–25.
- [10] Przystacki 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Schulz W., Eppelt U., Poprawe R. Review on laser drilling I. Fundamentals, modeling, and simulation // Journal of laser applications. – 2013. – Vol. 25. – №. 1.
- [14] Efimov A.E., Timofeev D.Yu., Maksarov V.V. Modeling dynamic processes at stage of formation of parts previously subjected to high-energy laser effects // IOP Conf. Series 2018: Materials Science and Engineering, 327(1) 22026.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Артамонова Е. и др. Лазерная вырезка сквозных микроотверстий в прозрачных пьезоматериалах // Фотоника. – 2008. – №. 4. – С. 34-37.
- [18] Макаров В. Ф. и др. Особенности применения совмещенной скоростной электроэрозионно-лазерной обработки отверстий малых диаметров в деталях газотурбинных двигателей с керамическим покрытием // Электронная обработка материалов. – 2020. – Т. 56. – №. 5. – С. 128-135.
- [19] 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.

[20] Абрамов Д. В., Хорьков К. С., Прокошев В. Г. Способ пробивки микроотверстий лазерным импульсным излучением. – 2013.

M.N. Tkachenko¹, K.P. Pompeev¹, O.S. Vasilev², A. Ramos-Velazquez²

PERSPECTIVES OF USING AN OPTICAL SCANNING SYSTEM WITH ALTERED SPATIAL BEAM CHARACTERISTICS

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia;

²Laser Centre LLC, St. Petersburg, Russia

Abstract

The paper examines methods of obtaining small diameter holes and micro-holes, as well as conical holes and complex-shaped voids through their mechanical and electro-physical processing on various types of CNC machines. The main problems of drilling, milling, electro-erosion, and laser processing in the formation of such structural elements are identified. Additionally, the paper discusses the prospects for the development of laser processing methods for micro-holes in accordance with the required quality of the resulting products.

Keywords: laser scanning system, laser processing, laser drilling, micro-holes, complex-shaped voids, optical scheme.

REFERENCES

- [1] Kolganova E.N. Technological support for vibrational processing of parts with small slots and holes: dissertation. – E.N. Kolganova: Rostov-on-Don, 2022. – 169 p., 2022. (rus.)
- [2] Nikolaev A.D. et al. Modernization of machining centers through integration of laser systems // Modern Mechanical Engineering. Science and Education. – 2018. – No. 7. – Pp. 506-515. (rus.)
- [3] Nikolaev A.D. et al. Implementation of laser processing systems in multi-operation machining centers // Metalworking. – 2019. – No. 5 (113). – Pp. 26-33. (rus.)
- [4] Nikolaev A.D., Pompeev K.P. Improvement of the laser head by changing the topology of its housing parts and the method of collimator attachment // Proceedings of higher educational institutions. Instrument making. – 2021. – Vol. 64. – No. 4. – Pp. 300-306. (rus.)
- [5] Petkova A.P., Ganzulenko O.Yu. Technological aspects of marking engineering products with a precision pulsed laser // Modern Mechanical Engineering. Science and Education. 2014. No. 4. Pp. 1177–1187. (rus.)

- [6] 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.
- [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] Vasilev, O.S., Veyko, V.P., Gorny, S.G., Ruzankina, Yu.S. The laser machine for microstructuring a metal surface using a fiber laser // Optical Journal. 2015. Vol. 82. No. 12. Pp. 70-77. (rus.)
- [9] Vasilev, O.S., Gorny, S.G. The technology of creating surface microstructures on sheet materials using a fiber laser // Metalworking, Publishing House «Polytechnica». 2016. No. 3 (93) / 2016. Pp. 20-25. (rus.)
- [10] Przystacki 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Schulz W., Eppelt U., Poprawe R. Review on laser drilling I. Fundamentals, modeling, and simulation // Journal of laser applications. – 2013. – Vol. 25. – №. 1.
- [14] Efimov A.E., Timofeev D.Yu., Maksarov V.V. Modeling dynamic processes at stage of formation of parts previously subjected to high-energy laser effects // IOP Conf. Series 2018: Materials Science and Engineering, 327(1) 22026.
- [15] Lomakin I.V. et al. High-efficiency technologies for obtaining small diameter holes in components of liquid rocket engines // Engineering Journal: Science and Innovation. – 2023. – No. 3 (135). – P. 5. (rus.)
- [16] 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.
- [17] Artamonova E. et al. Laser cutting of through micro-holes in transparent piezoelectric materials // Photonics. – 2008. – No. 4. – Pp. 34-37. (rus.)
- [18] Makarov V.F. et al. Features of combined high-speed electro-erosion and laser processing for small diameter holes in gas turbine engine components with ceramic coatings // Electronic Materials Processing. – 2020. – Vol. 56. – No. 5. – Pp. 128-135. (rus.)

- [19] Bessonov D.A. et al. Investigation of the features of applying short and ultrashort pulse 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.)
- [20] Abramov D.V., Khorkov K.S., Prokoshev V.G. Method of punching micro-holes with pulsed laser radiation. – 2013. (rus.)