

Математическое моделирование процесса лазерной перфорации микроотверстий отклоненным вращающимся лучом

Ткаченко М. Н.¹

Научный руководитель – канд. тех. наук, доцент Помпеев К. П.¹

¹Университет ИТМО

maxim.tkachenko00@inbox.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР №623106 «Автономные интеллектуальные системы».

Введение

В последние годы микроотверстия находят все большее применение в изделиях различных отраслей промышленности (электронной, приборостроительной, медицинской, авиационной, аэрокосмической, инструментальной, автомобильной, электротехнической, оборонной и др.) Такая тенденция обусловлена общей миниатюризацией изделий, которая позволяет повысить количество интегрированных функций, надежность, функциональность, удобство использования изделий, снизить их вес и стоимость, а также уменьшить потребление энергии и ресурсов в процессе производства и эксплуатации [1].

В настоящее время существуют различные методы формообразования микроотверстий, в том числе: механические, электрофизические, электрохимические, лучевые и др. способы воздействия на материал [1].

Современным решением обработки разнофазных материалов является лазер. Лазер имеет значительные преимущества перед другими методами, в том числе: бесконтактность, размер рабочего инструмента, локальность процесса обработки, высокое качество поверхностей и точность обработки, а также возможность работы с широким спектром материалов.

Однако распространенные способы лазерной перфорации сталкиваются с некоторыми ограничениями при обработке микроотверстий. Гауссово распределение плотности энергии в фокальном пятне приводит к неравномерному удалению материала, следствием чего является формирование конического профиля отверстия [2].

Основная часть

Целью данной работы является разработка способа лазерной перфорации микроотверстий отклоненным лазерным лучом и его математической модели с последующей ее верификацией.

В качестве решения описанной выше проблемы предлагается способ лазерной перфорации отклоненным вращающимся лучом. В отличие от традиционного способа обработки, при котором ось луча совпадает с осью отверстия, в предлагаемом методе луч наклонен и вращается вокруг оси обработки. Абляция материала происходит только в зоне фокального пятна, скользящего вдоль стенки. Периферийная область луча, несущая меньшую плотность энергии, выводится из зоны резания [2].

Такой подход исключает влияние периферийной зоны луча на формирование профиля отверстия, концентрирует энергию у его стенок и позволяет управлять углом их наклона. Это дает возможность получать

микроотверстия с цилиндрическим или коническим профилем с контролируемым соотношением входного и выходного диаметров.

Для проверки применимости данного способа была разработана математическая модель формообразования микроотверстий, основанная на методе сеточного анализа и концепции флюенса энергии лазерного излучения. Модель описывает распределение эффективной плотности энергии по поверхности обрабатываемого материала с учетом гауссова профиля пучка, кинематики вращающегося отклоненного луча, а также порогового характера абляции. Модель позволяет прогнозировать профиль формируемого отверстия на всех этапах обработки и устанавливать зависимости между режимами обработки, пространственными характеристиками лазерного луча и геометрическими параметрами полученного отверстия.

Верификация разработанной математической модели проводилась на основе результатов, описанных в научных трудах ряда исследователей. Поскольку реализация предлагаемого способа перфорации динамическим лазерным лучом требует разработки специализированной оптической системы – прототипа устройства, отклоняющего луч, сравнение результатов моделирования проводилось только с отверстиями, полученными способом, отличным от предлагаемого.

Установлено, что расхождение экспериментальных и расчетных данных не превышает 10 мкм по диаметру, что подтверждает адекватность модели и корректность заложенных в нее физических допущений. Проведенный сравнительный анализ показывает, что разработанная математическая модель может быть использована для прогнозирования геометрических параметров отверстий при реализации способа обработки отклоненным вращающимся лучом.

Выводы

Разработанная математическая модель корректно описывает процесс лазерной перфорации традиционным способом и подтверждает свою работоспособность в диапазоне погрешности до 10 мкм.

На следующем этапе планируется изготовить прототип оптической системы для лазерного станка с ЧПУ, реализующий предложенный способ обработки отклоненным вращающимся лучом. Это позволит формировать цилиндрические и конические микроотверстия с контролируемой геометрией.

Дальнейшие работы будут направлены на проведение экспериментальных исследований с использованием разработанного прототипа и сопоставление полученных результатов с расчетными данными.

Литература

1. Ткаченко М. Н., Помпеев К. П., Васильев О. С., Рамос Веласкес А. Модернизация лазерной сканирующей головки за счет использования блока изменения хода лазерного луча в пространстве. Современное машиностроение. Наука и образование. 2025. № 14. С. 780–795.
2. Tkachenko M. N., Pompeev K. P., Vasilev O. S., Ramos A. V. Modernization of laser scanning head using laser beam path modification unit. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2026.

Автор:

Ткаченко М. Н. _____

Научный руководитель:

Помпеев К. П. _____