

# Создание микроканалов на поверхности стали с помощью лазерного излучения ИК-диапазона

В. В. Лавриненко, А. В. Васильева, В. А. Парфёнов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

Lavrinenko\_valerav@inbox.ru, anastasiastru@mail.ru, vadim\_parfenov@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассматривается возможность создания элементов микрофлюидной топологии на пластине из нержавеющей стали с помощью лазерной обработки. Представлены параметры ИК-лазера для многоэтапного воздействия на поверхность металла с целью создания микроканалов с полукруглым профилем, а также сквозных отверстий, составляющих часть типичных микрофлюидных топологий.

**Ключевые слова:** микрофлюидика; лазерная обработка; лазерная перфорация; микрофлюидная топология

## I. ВВЕДЕНИЕ

Системы «лаборатория-на-чипе» (lab on a chip) на сегодняшний день являются одним из наиболее быстро развивающихся направлений в прикладной фотонике и, в частности, биофотонике. Такие системы представляют собой сложные микрофлюидные чипы, внутри которых располагаются микроканалы. Технологии на основе микрофлюидных систем очень многообразны. Они применимы для определения изменений параметров окружающей среды, таких как состав или температура, а также используются учеными-биохимиками, клиницистами, фармакологами и медиками для анализа биологических и химических жидкостей, для создания новых лекарственных препаратов, для манипуляций разными группами клеток и даже для имитации работы органов человека и животных [1–4]. Микрофлюидные чипы позволяют создавать условия для культивирования клеток, близкие к физиологическим. В этих устройствах можно организовать непрерывный мониторинг различных параметров с помощью встраиваемых датчиков. Основными требованиями к таким системам являются высокая энергетическая и экономическая эффективность, небольшой вес, компактность, высокая чувствительность и быстродействие [5].

В отдельную группу чипов можно выделить микрофлюидные устройства для контроля и анализа микропотоков жидкостей. Они могут быть изготовлены из широкого спектра материалов, таких как прозрачный силиконовый эластомер, хроматографическая бумага, фоторезист, гидрогели, стекло, кремний и различные металлы. В зависимости от используемого материала микрофлюидный рисунок может быть создан с помощью мягкой литографии, где мягкая пресс-форма используется для нанесения фигурного слоя на поверхность твердой подложки [6]. Другая технология – изготовление отливок, заключающаяся в заполнении литейной формы расплавленным материалом для придания нужной формы. Существуют также другие методы: метод горячего тиснения (метод нанесения изображения на различные виды материалов посредством температурного воздействия и давления),

лития под давлением (впрыск расплава материала под давлением в пресс-форму с последующим охлаждением), восковой печати (выкройка воска на бумаге желаемого дизайна, который затем плавится на плитке для создания каналов), механического фрезерования (обработка резанием, при которой режущий инструмент совершает вращательное движение, а обрабатываемая заготовка – поступательное), струйной печати (получения изображения при помощи микроскопических капель, распыляемых на обрабатываемую область), двухфотонной полимеризации (наращивание структуры с помощью отверждения фоторезиста), травления (удаления поверхностного слоя материала под действием химических веществ), 3D-печати (изготовление трехмерных объектов путем нанесения материала слоями) и лазерной микрообработки (формирование топологий с помощью лазерного воздействия на поверхность материалов) [7]. Создание микрофлюидного рисунка с помощью лазерной микрообработки имеет ряд особенностей и преимуществ по сравнению с другими методами, например, экологичность, отсутствие механического контакта с материалами и адаптивность к потребностям производства, а использование металла в качестве материала для заготовки уменьшает стоимость производства данных изделий, что делает их более доступными для широкого профиля исследований и задач.

Характеристика созданных на металлической поверхности микроканалов с помощью лазерного излучения с длиной волны 1,064 мкм подробно приведена в работе ученых из Индийского института технологий, где рассматриваемые изделия могут применяться в автомобилестроении, аэрокосмической и микроэлектронной промышленности [8]. Процесс взаимодействия лазерного излучения с металлами весьма сложен и представляет собой совокупность таких физических явлений, как нагрев, образование жидкой фазы и испарение металла. Также стоит учитывать эффект экранирования области воздействия пароплазменными образованиями, возникающими в результате разрушения материала, и охлаждение аблируемой области металла за счёт его теплопроводности и теплообмена с окружающей средой [9].

Влияние описанных выше процессов приводит к необходимости решения сложных технологических задач при лазерной обработке материалов. Кроме того, на конечный результат обработки влияет геометрия аблируемой области, поэтому разработка технологического процесса получения микротопологий должна осуществляться с учетом не только оптических и теплофизических свойств материала, но и геометрических параметров заданной топологии.

Главной задачей данной работы является исследование режимов лазерной обработки поверхности стали для получения геометрически точных микроканалов, имеющих низкие шероховатость и конусность, а также морфологию поверхности без микротрещин. В частности, данные параметры важны для микрофлюидных технологий, так как высокое значение шероховатости может заметно изменить свойства движения жидкости из-за трансформации влияния капиллярных и гравитационных сил внутри чипа, вплоть до невозможности стабильного функционирования всей системы. Поэтому решение данной задачи дает новые возможности производства микрофлюидных чипов и других устройств с микроканалами.

## II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе с помощью лазерной обработки решаются следующие задачи:

- Создание микроканалов с полукруглым профилем.
- Создание сквозных отверстий с низкой конусностью.

Исследования проводились на металлической пластине из нержавеющей стали толщиной 2 мм, которая подвергалась воздействию прецизионным лазерным маркером «МиниМаркер2» (ООО «Лазерный Центр», Россия), на базе волоконного иттербиевого лазера. Общие характеристики лазерной установки представлены в табл. 1. Создание чертежа топологических элементов происходило с помощью специализированного ПО MaxiGraf, поставляемого вместе с лазерным маркером.

Лазерное воздействие производилось в несколько этапов, в ходе которых менялись такие параметры обработки, как длительность импульса, частота следования импульсов, скорость сканирования лазерного луча и плоскость фокусировки.

ТАБЛИЦА I. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ «МИНИМАРКЕР2»

Характеристика	Значение
Длина волны	1064 нм
Длительность импульса	От 4 до 200 нс
Средняя мощность	20 Вт
Частота следования импульсов	До 1000 кГц
Энергия в импульсе	0,7 мДж
Скорость сканирования	До 8000 мм/сек
Поле обработки	110 × 110 мм
Разрешение	0,25 мм

Контроль поперечных размеров структуры осуществлялся с помощью оптического микроскопа «NVMicro» (производитель «NORGAU», Россия), характеристики которого представлены в табл. 2. Измерение ширины канавок происходило в трёх местах: по центру и дополнительно по одному измерению по краям структуры. Если у элемента топологии наблюдался «порожек», то он был измерен схожим образом. Это позволило найти погрешность измерения ширины микроканалов, которая оказалась порядка 1 %.

ТАБЛИЦА II. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ «NVMICRO»

Характеристика	Значение
Оптическое увеличение	0,7x – 4,5x
Поле зрения 0,7x	11,18 мм
Поле зрения 4,5x	3,94 мм
Рабочая дистанция	88 мм ± 2 мм
Диагональ монитора	23,6 дюйма

Измерение глубины канавок производилось с помощью высокоточной ручной 3D-измерительной машины Sinowon серии iTouch производства малайзийской компании «MSP METROLOGY». Для получения точного значения глубины использовался метод фокусировки на поверхности. Когда линия сканирования измерительной машины проходила поперёк канавки, происходила расфокусировка. С помощью функции автофокуса система устанавливала фокус на дне канавки. Изменение фокусного расстояния при попадании линии сканирования на топографию составляло значение глубины канавок. На каждой канавке производилось 5 замеров, после чего вычислялось среднее значение глубины по всей длине канавки. Погрешность измерений составляла около 1 %.

## III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### A. Создание микроканалов

В ходе многоэтапного воздействия на металлическую пластину ИК-лазером удалось выявить режимы обработки стали для создания экспериментальных канавок, представляющих собой элементы микрофлюидной системы. Микроканалы шириной порядка 500 мкм были получены при значении плотности мощности порядка  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, длительности импульса от 8 до 100 нс, частоте следования импульсов 40 кГц, скорости сканирования 1000 мм/с, изменении фокусировки по оси z от +350 до -350 мкм.

В результате микроскопических исследований было выявлено, что в некоторых случаях, когда изменялись такие параметры, как средняя мощность лазерной установки и длительность импульса, происходило формирование многоступенчатого профиля канавки. Особенность таких канавок (рис. 1, рис. 2б) заключалась в наличии «порожка» шириной около 400 мкм у верхней плоскости обработки пластины. У канавок другого типа (рис. 2а,б) этот элемент отсутствовал, и геометрия профиля визуально была ровнее, близкая к полукруглой.

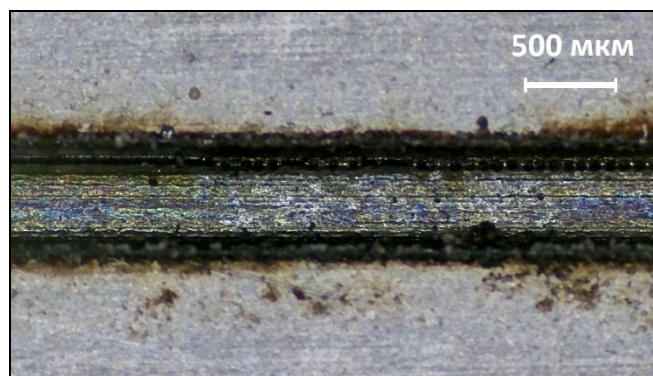


Рис. 1. Фотография канавки со ступенчатым профилем

На гранях микроканалов виден нагар, что связано с достаточно длительным временем воздействия лазерного излучения на материал, в ходе которого обрабатываемая область окислялась на воздухе естественным путем (рис. 1, рис. 2).



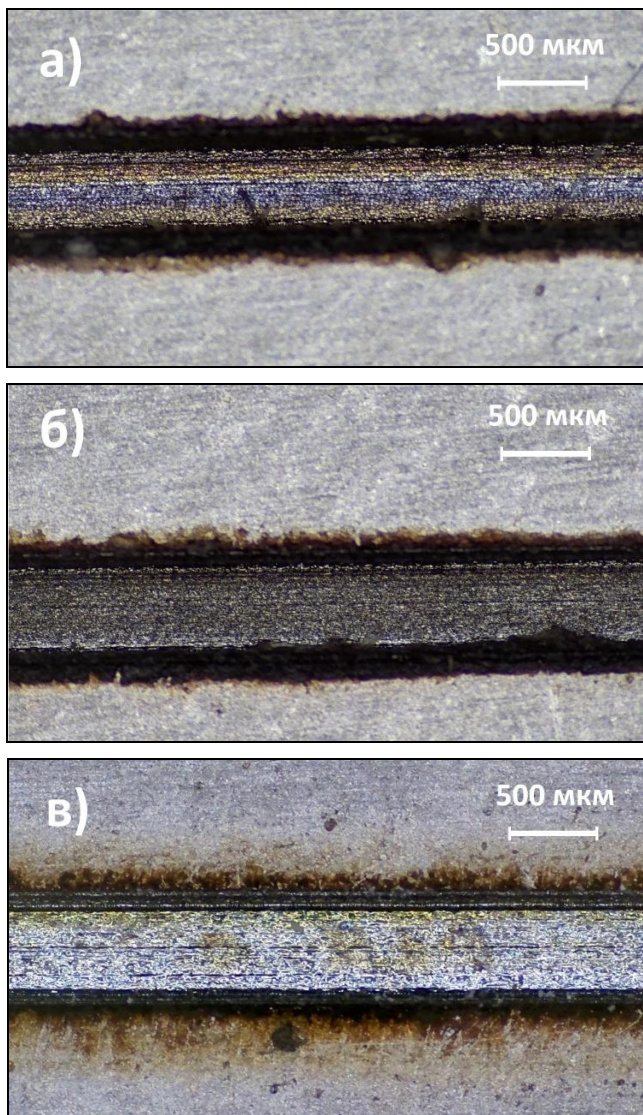


Рис. 2. Фотографии канавок с полукруглым профилем (а,б) и со ступенчатым профилем (в)

На стенках микроканалов видны бороздки соответствующих траекторий сканирования лазерного луча во время создания топологии. По ним можно судить о наличии шероховатостей на структуре, которые могут помешать движению потоков жидкости в каналах. Придать более гладкую морфологию поверхности может помочь ещё один этап воздействия более мягкими, полировочными режимами, о чем свидетельствует металлический блеск на дне структуры (рис. 2 а, в).

В ходе работы было обнаружено, что в процессе лазерной обработки на дне структур образовывалась оксидная плёнка (рис. 1, рис. 2а), которая придаёт цветность стенкам каналов. Этот эффект наблюдается из-за того, что нагретые газы окружающей среды вступают в реакцию с нагретым материалом пластины, образуя на её поверхности оксиды железа и других примесей. Появление оксидной плёнки потенциально может оказать положительный эффект при уменьшении шероховатости стенок каналов за счёт заполнения неровностей слоем оксида.

Также в процессе создания топологических элементов было рассмотрено влияние расфокусировки на структуру микроканала (рис. 3). Фокус лазерного луча (область с наибольшей плотностью мощности

излучения) располагался выше или ниже обрабатываемой поверхности с заданными интервалами по оси z, после чего производилась лазерная обработка.

Расфокусировка оказывает незначительное влияние на геометрические размеры каналов, однако визуально увеличивает шероховатость структуры, о чём свидетельствует отсутствие металлического блеска на стенках канавок.

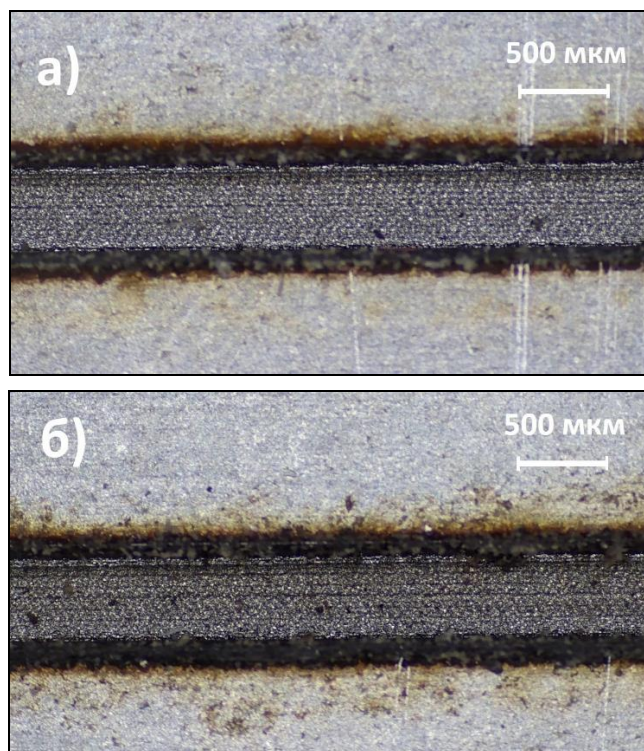


Рис. 3. Фотографии канавок с перенастройкой фокуса +350 мкм (а) и -350 мкм (б) относительно поверхности пластины

В экспериментах с перемещением фокуса не было зафиксировано появление оксидной плёнки. Кроме того, стали более видны бороздки, оставшиеся после сканирования поверхности лазерным лучом, что также указывает на увеличение шероховатости поверхности.

### В. Создание сквозных отверстий

С помощью лазерного воздействия удалось просверлить сквозное отверстие в металлической пластине толщиной 2 мм (рис. 4). Ввиду относительно большой толщины пластины обработка совершалась в несколько этапов, между которыми производилась перенастройка фокуса по мере углубления в толщу пластины для поддержания необходимого значения плотности мощности, требуемой для эффективной абляции материала, которая составила порядка  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Из-за расфокусировки увеличивается диаметр лазерного пятна и уменьшается плотность мощности, что не позволяет быстро и эффективно осуществить перфорацию.

Измерение размеров отверстия происходило также при помощи оптического микроскопа. На рис. 4 видно, что входное отверстие в диаметре около 600 мкм, в то время как выходное порядка 500 мкм, то есть диаметры отличаются примерно на 100 мкм, что свидетельствует о конусности структуры значением около 0,05. На границах отверстия, так же, как и у канавок, видны следы гари.



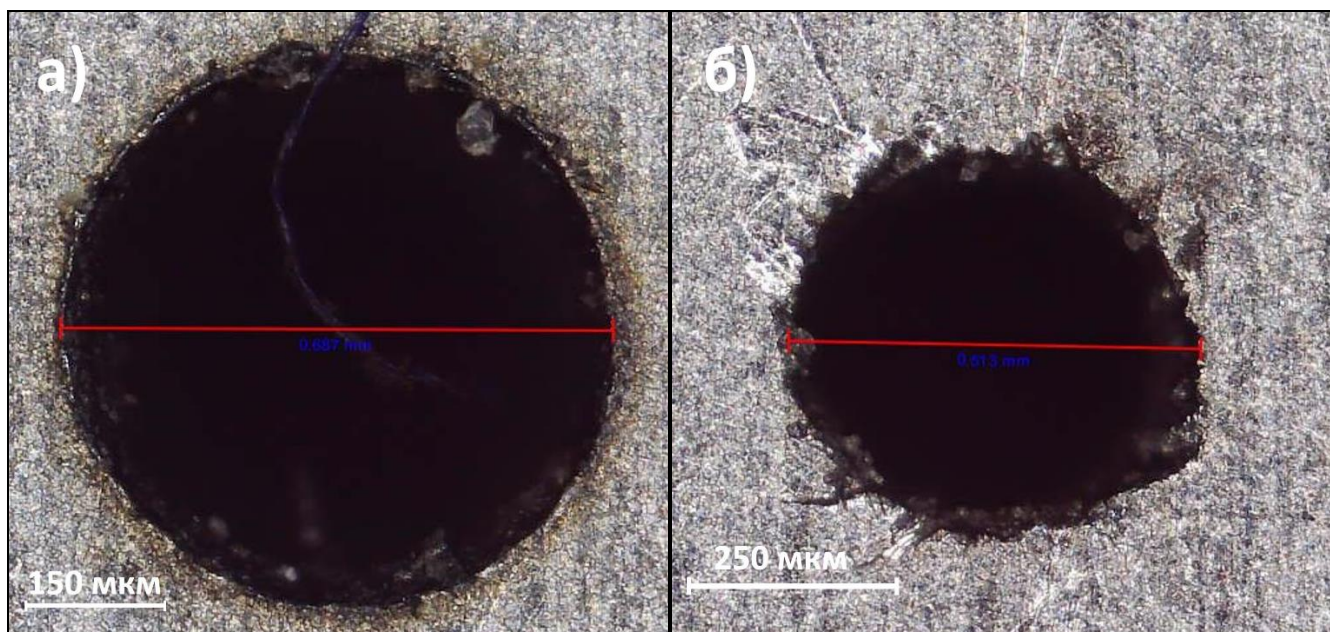


Рис. 4. Фотографии сквозного канала с измеренными диаметрами входного (а) и выходного (б) отверстий

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью лазерной обработки излучением ИК-диапазона удалось получить на поверхности нержавеющей стали канавки с профилем, близким к полукруглому, глубиной до 500 мкм. Экспериментальные данные позволили выявить существенные факторы, влияющие на результат обработки. Так, эффект расфокусировки приводит к образованию явно выраженных бороздок на стенках канавок, что неприемлемо для решения задач данного исследования, так как потенциально приводит к увеличению шероховатости поверхности. Наличие оксидных пленок, наоборот, потенциально уменьшает шероховатость поверхности, сглаживая микронеровности.

Многоэтапная лазерная обработка позволила получить сквозные отверстия диаметром до 600 мкм в стальной пластине толщиной 2 мм. В ходе работы был произведён контроль геометрических размеров отверстий и посчитана их конусность, которая составила значение порядка 0,05, что удовлетворяет требованиям к входным каналам микрофлюидного чипа, размер которых может составлять от сотен микрометров до нескольких миллиметров.

Дальнейшим развитием исследований будет выполнение измерений на сканирующем зондовом микроскопе. Измерения профиля канавок и значений шероховатости обработанной поверхности дадут возможность в дальнейшем оптимизировать режимы лазерного воздействия и геометрию каналов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Зими́на Т.М., Гвозде́в Ю.А., Шири́ян Т.В. Лаборатории-на-чипе: современное состояние // Биотехносфера. 2014, вып. No 6(36). С. 41-66.
- [2] Халимова А.А., Коваленко А.В., Парамонов Г.В. «Органы-на-чипе»: оценка перспектив использования в фармацевтической отрасли // Medical & pharmaceutical journal «Pulse». 2022, Vol.24. №5. P. 81-87.
- [3] Organs-on-a-chip: A new paradigm for toxicological assessment and preclinical drug development / D. Bovard, A. Iskandar, K. Luettich et al. // Toxicology Research and Application. 2017, Volume 1. P. 1-16.
- [4] Microfluidic Organ-on-a-Chip Technology for Advancement of Drug Development and Toxicology / J.D. Caplin, N.G. Granados, M.R. James et al. // Advanced Healthcare Materials. 2015, 4(10). P. 1426-1450.
- [5] Многоканальная сенсорная система для одновременного опроса нескольких рефрактометрических датчиков на основе фотонной интегральной схемы / А.Г. Закоян, Г.С. Воронков, Я.В. Алексаккина и др. // Спецвыпуск «Фотон-экспресс-наука». 2023, №6. С. 135-136.
- [6] Альтернативные подходы при создании мастер-форм для изготовления микрофлюидных чипов методом «мягкой» литографии / Я.С. Посмитная, А.С. Букатин, Д.А. Макаров и др. // Научное приборостроение. 2017, том 27, № 2. С. 13–20.
- [7] Wlodarczyk K.L., Hand D.P., Maroto-Valer M.M. Maskless, rapid manufacturing of glass microfluidic devices using a picosecond pulsed laser // Scientific Reports. 2019, No 9. P. 1-13.
- [8] Sahu A.K., Jha S. Microchannel fabrication and metallurgical characterization on titanium by nanosecond fiber laser micromilling // Materials and Manufacturing Processes. 2020, No 35. P. 279-290.
- [9] Некоторые особенности взаимодействия лазерного излучения с металлами / А.Н. Готов, Ю.В. Голубенко, В.А. Десяцков и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2020, №1. С. 15-32.