

УДК 621.375.826

Применение наносекундных волоконных лазеров с длиной волны 1064 нм в технологии гидролазерной резки

Дубровин Глеб Николаевич^(*)

dubrovingleb@yandex.ru

Самарин Петр Евгеньевич

psamarin@vpglaserone.ru

ООО «ВПП Лазеруан», Фрязино, Россия

Аннотация. Рассмотрены особенности применения импульсных волоконных лазеров с длиной волны 1064 нм и длительностью импульсов 100–200 нс в технологии гидролазерной резки. Определены основные параметры, влияющие на форму и глубину канала реза. Предложен способ повышения эффективности обработки. Представлены результаты резки металлов (алюминиевого и титанового сплава, нержавеющей стали, меди) и неметаллов (керамики, кремния).

Ключевые слова: гидролазерная резка, волоконный лазер, термическая резка с охлаждением

Application of 1064 nm nanosecond fiber lasers for hydrolaser cutting technology

Dubrovin Gleb Nikolaevich^(*)

dubrovingleb@yandex.ru

Samarin Petr Evgenievich

psamarin@vpglaserone.ru

VPGLaserone, Fryazino, Russia

Abstract. The article considers the features of using pulsed fiber lasers with a wavelength of 1064 nm and a pulse duration of 100–200 ns in hydrolaser cutting technology. The main parameters influencing the shape and depth of the cutting channel are determined. A method for increasing the processing efficiency is proposed. The results of cutting metals (aluminum and titanium alloys, stainless steel, copper) and non-metals (ceramics, silicon) are presented.

Keywords: hydrolaser cutting, fiber laser, thermal cutting with cooling

Введение. Технология гидролазерной резки — уникальный процесс обработки материалов. Ключевая особенность процесса заключается в том, что лазерное излучение распространяется внутри ламинарной струи воды. Достигая поверхности заготовки лазерное излучение нагревает и испаряет материал, а вода моментально охлаждает зону реза и удаляет продукты абляции. Такое комбинированное воздействие на обрабатываемый материал приводит к минимизации зоны термического влияния, отсутствию грата, а также к низким значениям параметров шероховатости поверхности.

Наиболее важным вопросом в данной технологии является выбор лазерного источника. Для предотвращения закипания воды при воздействии ла-

зерного излучения используют импульсные приборы. Основным параметром лазера, определяющим поглощение излучения водой, является длина волны излучения. В работе [1] отмечается, что для лазеров с длиной волны 1064 нм потери излучения при прохождении 20 мм воды составляют около 60 %. Исследования по гидролазерной резке различных металлов также указывают на небольшую эффективность использования таких источников [2]. В работах [1, 3] выделяют длины волн 532 и 355 нм как наиболее перспективные для данной технологии. Однако широкий спектр лазерных приборов, представленный в данный момент на рынке, делает актуальным проведение новых исследований по применению лазеров с длиной волны 1064 нм в технологии гидролазерной резки.

Материалы и методы. В работе использовался наносекундный волоконный лазер YLP-V2-1-100-50-50 производства ООО «ВПГ Лазеруан» и его модификация с энергией импульсов 5 мДж. Наиболее важными характеристиками данного лазера являются параметры луча: $M^2 = 1,75$, диаметр коллимированного пучка 7,77 мм, расходимость 0,32 мрад. Максимальная средняя мощность 50 Вт, частота следования импульсов 2–200 кГц, длительность импульсов 100–200 нс.

Потери средней мощности в струе воды измерялись с помощью датчика мощности «Coherent PM30». Вода при измерениях отделялась защитным стеклом, пропускающее лазерное излучение, тем самым возможно было определить значение средней мощности на любом участке струи по ее длине.

Для исследования процесса формирования канала реза были проведены эксперименты по оценке влияния различных технологических параметров на форму и глубину реза при обработке образцов алюминия (сплав АМгЗ). Алюминий выбран как материал, относительно легко поддающийся обычной газолазерной резке плавлением. Шлифы алюминия имеют светлый оттенок, что позволило детально исследовать форму канала реза. Качество гидролазерной обработки оценивалось по параметрам, предложенным в ISO 9013:2002(e) для термической резки.

Результаты. Проведены измерения потерь средней мощности по длине струи, формируемой соплом 50 мкм при давлении воды 200 бар (рис. 1).

Таким образом, полученные потери мощности (28,1 %) на длине струи 20 мм более чем в 2 раза ниже, чем в работе [1]. При взаимодействии струи с поверхностью металла визуального расплава не образовывался. Канал реза формируется за счет послойного испарения материала.

Скорость резки определяет количество удаляемого материала за один проход. Чем меньше скорость резки, тем более глубокий канал реза формируется после одного и более проходов. Наиболее характерные изменения в форме канала реза в зависимости от количества проходов для скорости 20 мм/с видно на полученных шлифах (рис. 2).

Прирост глубины резки уменьшается с увеличением количества проходов. Например, для скорости 20 мм/с увеличению количества проходов с 1 до 3 соответствует прирост глубины 169 %, с 3 до 10 — 115 %, с 10 до 20 —

всего 6,5 %, с 20 до 300 — 17 %. Визуально уменьшение эффективности про-резания материала характеризуется сужением канала реза. Для 1–3 проходов характерно образование U-образного канала реза, а с последующим увеличением количества проходов канал становится V-образным.

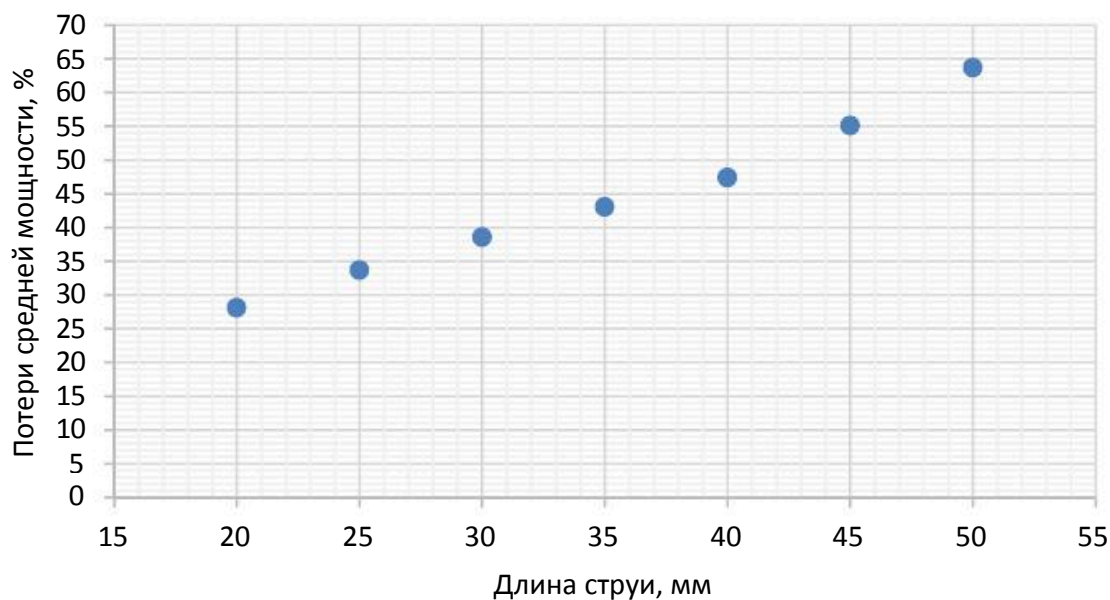


Рис. 1. Зависимость потерь средней мощности по длине струи

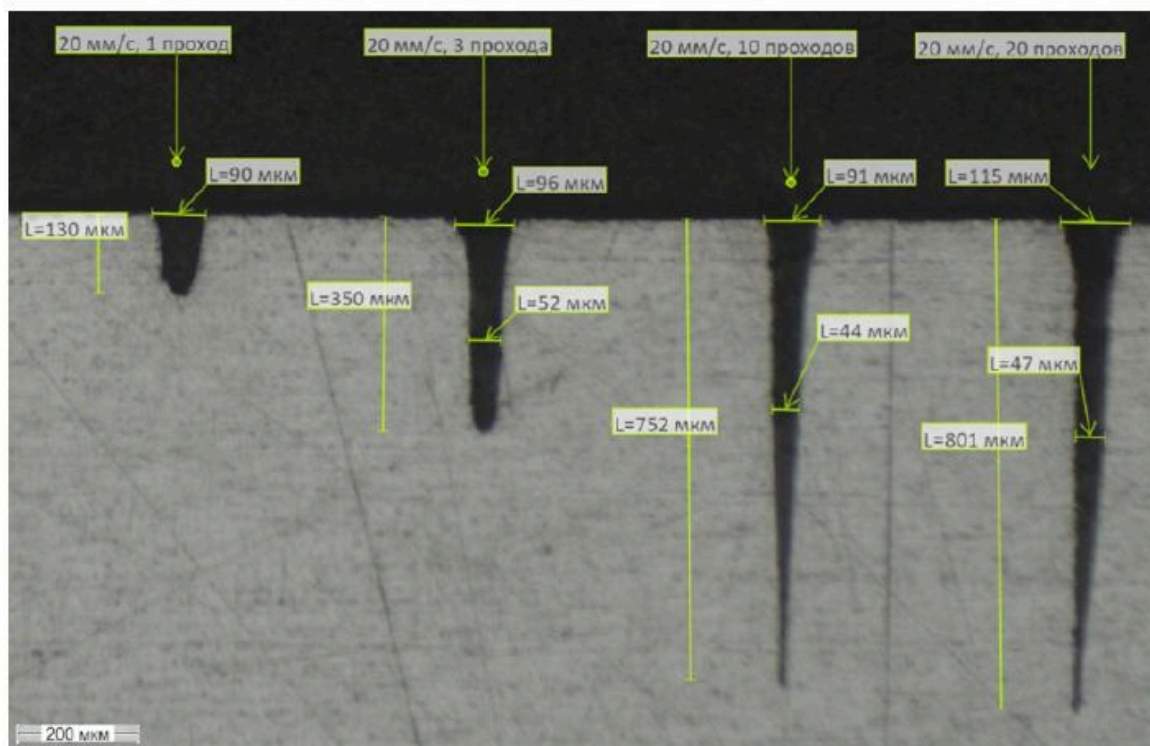


Рис. 2. Шлифы резов на скорости 20 мм/с за 1, 3, 10 и 20 проходов (сопло 80 мкм, давление воды 100 бар)

С уменьшением скорости резки увеличивается глубина прорезания: 3 прохода на скорости 1,5 мм/с позволяют достичь глубины резки примерно такой же, как за 300 проходов на скорости 20 мм/с. Внешний вид реза как в первом, так и во втором случае характеризуется сужением канала. Поэтому значительный прирост глубины резки с увеличением проходов при дальнейшем уменьшении скорости (1,5 мм/с и медленнее) не ожидается.

С целью увеличить ширину реза и не допускать сужение канала были проведены эксперименты со смещением траектории резки после одного прохода и возвращению в начальное положение на следующем проходе. Ширина реза на входе струи в заготовку увеличилась относительно полученного ранее среднего значения (90 мкм) без смещения на 59 мкм для смещения 25 мкм и на 84 мкм для смещения 50 мкм. После достижения глубины реза примерно 350 мкм наблюдается значительное сужение канала реза, визуально не имеющее отличий от полученных ранее результатов без смещения траектории. Подобное решение проблемы сужения реза в работах [4, 5] также не привело к существенному росту глубины прорезания.

Для оценки влияния средней мощности лазерного излучения на образование канала реза была проведена серия экспериментов с обработкой алюминиевого образца за 1 проход (рис. 3). Средняя мощность изменялась за счет изменения частоты следования импульсов для сохранения постоянной энергии импульсов.

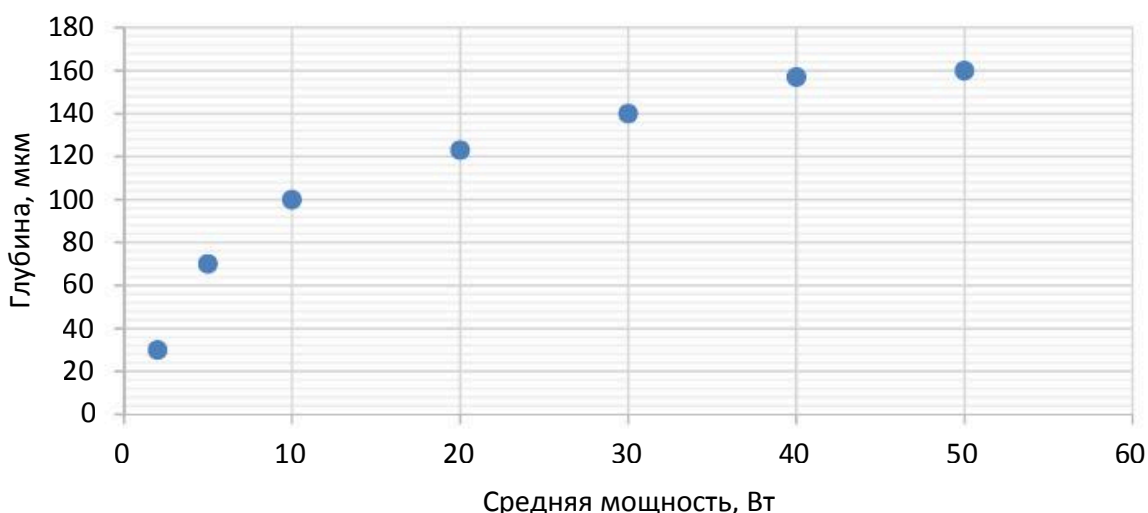


Рис. 3. Зависимость глубины реза за 1 проход от средней мощности лазерного излучения

Из полученного графика видно, что прирост глубины резки с увеличением средней мощности снижается и фактически отсутствует для 40 и 50 Вт. Наибольшее влияние на формирование канала реза оказывает энергия импульсов. Для наносекундного лазера с энергией импульсов 5 мДж наблюдается постоянный прирост глубины резки с увеличением количества проходов и U-образная форма канала реза. При этом для лазера с энергией импульсов

1 мДж процесс резки затухает после третьего прохода, а форма канала реза становится V-образной.

Форма канала реза сужается более чем в 2 раза до третьего прохода при энергии импульсов менее 1 мДж. Для энергии 1 мДж сужение происходит между третьим и десятым проходом. Для 5 мДж сужения канала не происходит даже на 41-ом проходе. При резке алюминия для энергии импульсов 1 мДж при скорости сканирования 20 мм/с сужение канала реза произошло примерно после третьего прохода и при дальнейшем увеличении количества проходов до 300 не привело к значительному росту прорезаемой толщины. Для лазера с энергией импульсов 5 мДж при скорости сканирования 10 мм/с наблюдается постоянный прирост глубины резки с увеличением количества проходов.

Давление воды не оказывает существенного влияния на форму канала реза. По результатам экспериментов и данных исследований [1–3] этот параметр важен для формирования ламинарного потока и достижения максимальной рабочей длины струи. Проводились эксперименты с давлением воды 60, 100, 150 и 200 бар для сопла диаметром 80 мкм. Для первого и третьего проходов изменение давления приводит к незначительным изменениям глубины прорезанного материала (от 5,0 до 7,5 % относительно среднего значения). Для десяти проходов максимальная глубина 910 мкм достигается при давлении 100 бар, которое является рекомендованным для сопла 80 мкм [1].

Важным параметром в технологии гидролазерной резки является диаметр струи, который определяется диаметром используемого сопла. В данной работе исследовались сопла 140, 80 и 50 мкм. При использовании сопла 140 мкм уже после трех проходов наблюдается сужение канала реза (V-образный рез). При использовании сопел 80 и 50 мкм, сужение канала не наблюдается после 10 проходов. На основании полученного результата можно сделать вывод о том, что помимо энергии импульсов на эффективность обработки влияет плотность энергии в струе воды, что увеличивает эффективность процесса. Для используемых в работе сопел был проведен расчет плотности энергии: 140 мкм — 47,2 Дж/см², 80 мкм — 144,5 Дж/см², 50 мкм — 370 Дж/см². В расчете учитывалось, что реальный диаметр струи на 17 % меньше диаметра сопла [3]. Результаты экспериментов по резке алюминия различными соплами представлены на графике (рис. 4).

Эффективность применения сопла 50 мкм растет с увеличением количества проходов. До десятого прохода глубина резки примерно одинаковая, как и для сопла 80 мкм. На десятом проходе глубина резки на 16 % больше при использовании сопла 50 мкм. На 20-м проходе глубина на 23 % больше, на 40-м — на 82 %. Получен образец боковой кромки реза толщиной 8 мм (рис. 5).

Обсуждение полученных результатов. Наиболее важным параметром для увеличения глубины при послойном удалении материала в технологии гидролазерной резки является плотность энергии лазерного излучения в струе

воды. Она определяется энергией импульсов лазерного источника и диаметром сопла. С учетом полученных данных были проведены эксперименты по резке других металлов. На производительность резки ожидаемо оказывают влияние теплофизические свойства обрабатываемого материала. За 40 проходов с соплом 80 мкм глубина прорезания алюминия составила 2,9 мм, нержавеющей стали (12Х18Н10Т) — 1,2 мм, титана (BT-1) — 1,1 мм, меди (М1) — 0,5 мм. На всех полученных шлифах при использовании наносекундных лазеров не было выявлено следов застывшего расплава и наличие зоны термического влияния.

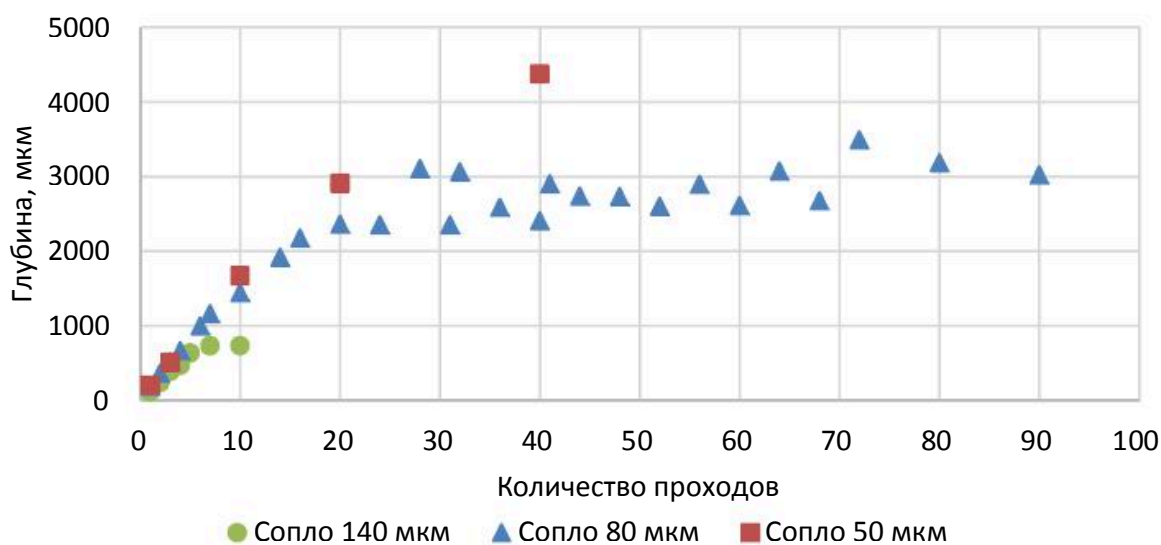


Рис. 4. Зависимость глубины прорезания алюминия от количества проходов для разных сопел



Рис. 5. Боковая кромка реза алюминия толщиной 8 мм (шероховатость поверхности: Ra 5,13 мкм, Rz 32,8 мкм; отклонение от перпендикулярности 0,0245 мм, грат отсутствуют)

Наносекундным лазером с энергией импульсов 5 мДж был получен сквозной рез в нитридной керамике толщиной 1,25 мм, композитном материале состоящем из слоев меди-керамики-алюминия-пленки суммарной толщиной 2 мм, текстолите с медью толщиной 0,8 мм, пластине кремния толщиной 0,25 мм.

Заключение. Применение источников с длиной волны 1064 нм может быть обусловлено экономической эффективностью по сравнению с более дорогими лазерами, работающими на длинах волн 355 и 532 нм. Повышение эффективности обработки может быть достигнуто при увеличении энергии импульсов используемых лазерных источников и разработке оптических схем, позволяющих вводить лазерное излучение в сопла диаметром менее 50 мкм. Применение лазеров с длиной волны 1064 нм в технологии гидролазерной резки целесообразно для обработки материалов, поглощающих данную длину волны.

Список источников

- [1] Liu Y., Wei M., Zhang T., Qiao H., Li H. Overview on the development and critical issues of water jet guided laser machining technology. *Optics and Laser Technology*, 2021, vol. 137. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106820>
- [3] Porter J.A., Louhisalmi Y.A., Karjalainen J.A., Fuger S. Cutting thin sheet metal with a water jet guided laser using various cutting distances, feed speeds and angles of incidence. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2007, vol. 33. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0521-7>
- [3] Wagner F., Sibailly O., Vago N., Romanowicz R., Richerzhagen B. The laser microjet technology — 10 years of development. *International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, 2003, M401. <https://doi.org/10.2351/1.5060119>
- [4] Cheng B., Ding Y., Li Y., Yang L. Theoretical and Experimental Investigation on SiC/SiC Ceramic Matrix Composites Machining with Laser Water. *Jet. Appl. Sci.*, 2022, vol. 12, art. no. 1214. <https://doi.org/10.3390/app12031214>
- [5] Bai C., Ye D., Yuan L., Jingyi L., Junjie X., Qiang L., Lijun Y. Coaxial helical gas assisted laser water jet machining of SiC/SiC ceramic matrix composites. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2021, vol. 293. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117067>