

УДК 621.373

Эффективность использования фемтосекундного лазерного излучения для задач обработки силикатного стекла

Норов Парвиз Мироджевич^(*)

pnorov5@gmail.com

Умарбаев Арисбек Тохирович

aris.umarbaev@inbox.ru

Шупенев Александр Евгеньевич

ash@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Целью работы являлось теоретическое и экспериментальное выявление оптимальных режимов лазерной обработки силикатного стекла для задач резки и сварки. Для этого проводились серии экспериментов на фемтосекундной лазерной установке TETA10 с вариацией важных параметров обработки, преимущественно таких как мощность и скорость. Результаты экспериментов показали, что силикатное стекло поддается лазерному фемтосекундному воздействию. Был вырезан кружочек диаметром 10 мм, а также сварены 2 пластины между собой. Таким образом в данной статье описаны работающие режимы фемтосекундной лазерной обработки силикатного стекла.

Ключевые слова: фемтосекундное лазерное излучение, лазерная резка, лазерная сварка, абляция, силикатное стекло

Efficiency of using femtosecond laser radiation for silicate glass processing

Norov Parviz Mirodzevich^(*)

pnorov5@gmail.com

Umarbaev Arisbek Tokhirovich

aris.umarbaev@inbox.ru

Shupenev Alexandr Evgenievich

ash@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The aim of the work was the theoretical and experimental identification of optimal modes of laser processing of silicate glass for cutting and welding tasks. For this purpose, a series of experiments were conducted on a femtosecond laser installation TETA10 with a variation of important processing parameters, mainly such as power and processing speed. The results of the experiments showed that silicate glass is amenable to femtosecond laser exposure. A circle with a diameter of 10 mm was cut out, and 2 plates were welded together. Thus, this article describes the appropriate modes of femtosecond laser processing of silicate glass.

Keywords: femtosecond laser radiation, laser cutting, laser welding, ablation, silicate glass

Введение. Обработка стекла лазерным излучением непростой процесс, из-за механических и оптических свойств стекла [1]. Активно развивающимся методом является резка с помощью лазерной абляции. Применяются, как правило, эксимерные лазеры, работающие в УФ диапазоне, и CO₂-лазеры, рабо-

тающие в ИК диапазоне. Недостатки этого метода: низкая скорость обработки, образование трещин, оплавление соседних с областью резки участков, большая ширина пропила, необходимость линейного поглощения материала на длине волны лазера. Для уменьшения ширины пропила в случае лазерной обработки применяют комбинированные методы, включающие в себя лазерное нагревание и параллельное охлаждение струей воды. Улучшение параметров резки получают за счет использования импульсных лазеров. Одним из наиболее известных способов — фемтосекундная, импульсная обработка, приводящая к нелинейным эффектам.

Такой вид обработки стекла [2] отличается высокой производительностью, а также универсальностью, которая выражается в том, что лазерную систему можно применять для различных задач обработки стекла, например сварка и резка или травление микроканалов [3].

Материалы и методы. Все эксперименты выполнялись в лабораторных условиях на фемтосекундной лазерной установке TETA 10/200 с длительностью импульса 270 фс. Цель работы заключалась в определении оптимального режима резки. В качестве варьируемых параметров рассматривались мощность, частота, скорость обработки и количество проходов. В качестве задачи стояла вырезка отверстия диаметра 10 мм.

Результаты. На первом этапе исследований были проварьированы мощность и частота лазерного излучения при линейном резе шириной 100, 250 и 500 мкм соответственно. Полученные результаты представлены на **Ошибка! Источник ссылки не найден..** Режимы представлены в табл. 1

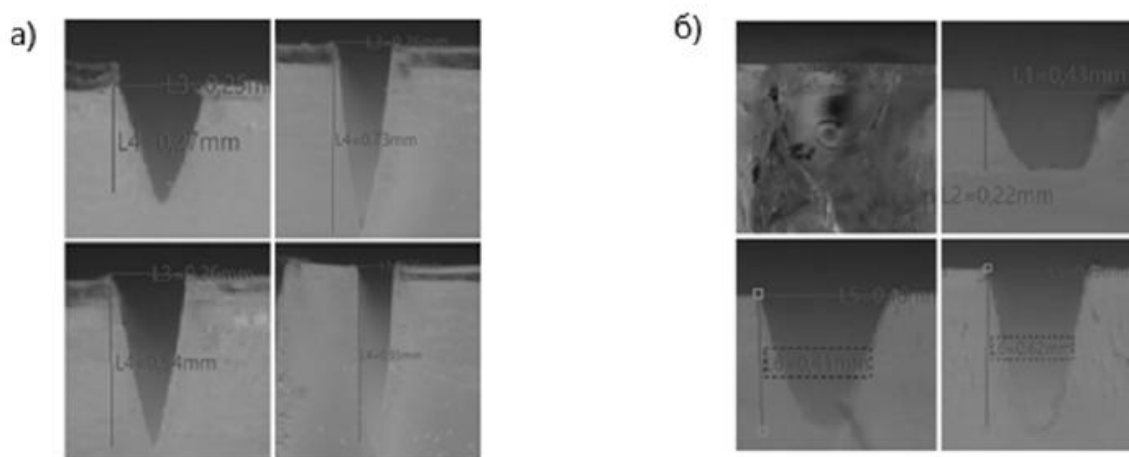


Рис. 1. Фотографии реза: а) при частоте 25 кГц; б) при частоте 50 кГц

На фотографиях видно, что наибольшее заглубление достигается при более низкой частоте. Также стоит отметить, что высокая мощность 10 Вт способствовала появлению микротрещин. Таким образом можно сделать вывод, что для наибольшей глубины обработки необходимо взять максимальную мощность, при которой материал не разрушается, т. е. 8 Вт и наименьшую частоту т. е. 25 кГц.

Таблица 1

Варьирование мощности

Мощность, Вт	Частота, кГц	Скорость мм/с	Проходов
4	25	100	10
6	25	100	10
8	25	100	10
10	25	100	10
2	50	100	10
4	50	100	10
6	50	100	10
8	50	100	10

Иным, немаловажным параметром является скорость обработки, входящая в формулу коэффициента перекрытия:

$$K = 1 - \frac{V}{fd},$$

где K — коэффициент перекрытия; V — скорость обработки, $\frac{\text{мм}}{\text{с}}$; f — частота следования импульсов, Гц; d — диаметр пятна, принят 0,04 мм.

На **Ошибка! Источник ссылки не найден.** представлены результаты экспериментов по варьированию скорости лазерного пучка. В **Ошибка! Источник ссылки не найден.** показаны коэффициенты перекрытия при соответствующих скоростях.

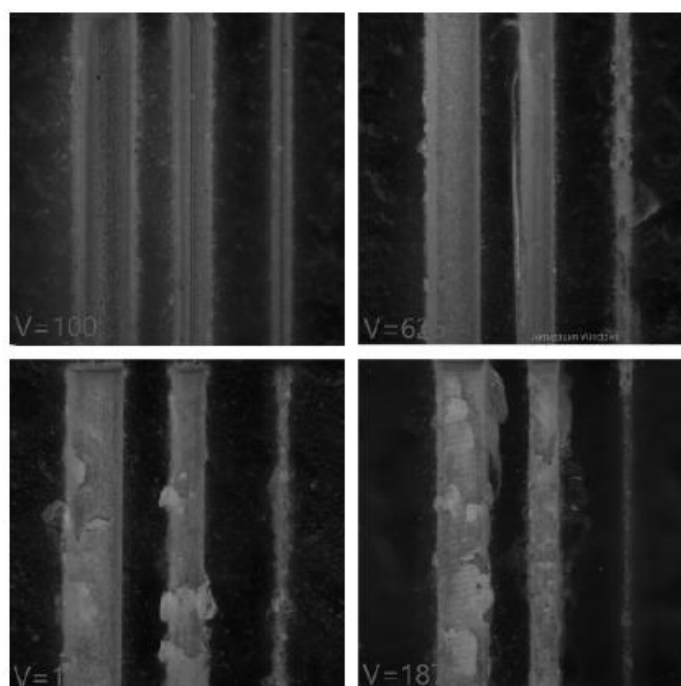


Рис. 2. Фотографии поверхности реза, при различных скоростях

Анализ полученных результатов показал, что оптимальной скоростью обработки является 100 мм/с, т. к. при ней получено наилучшее качество реза, за счет высокого коэффициента перекрытия, а при более высоких скоростях появляются сколы, трещины и заусенцы.

На втором этапе исследований был найден режим сварки стекла (табл. 2).

*Таблица 2***Режим сварки стекла**

Мощность, Вт	Частота, кГц	Скорость мм/с	Проходов
5,5	100	20	15

Полученное сварное соединение двух пластин из силикатного стекла, наложенных друг на друга, можно наблюдать на рис. 3.

На рис. 4 можно наблюдать глубину проплавления при сварке стекла.

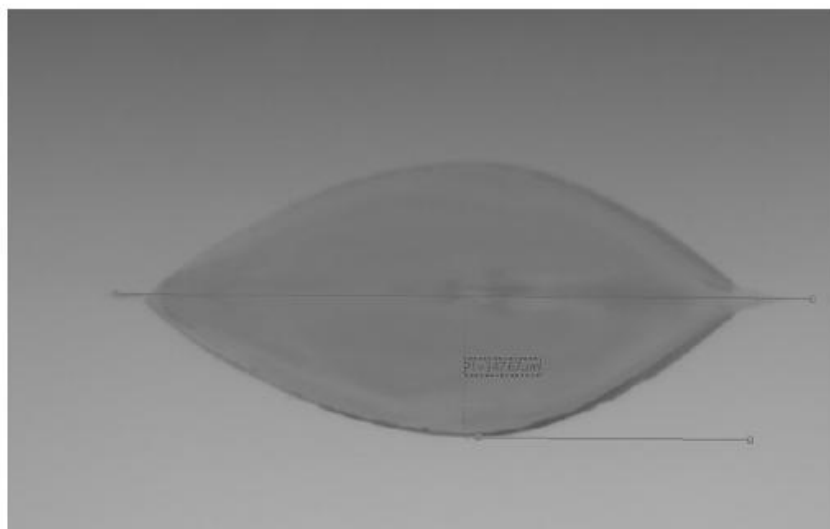
**Рис. 3.** Сварное соединение двух пластин, вид сверху

Рис. 4. Глубина проплавления при сварке стекла

Обсуждение полученных результатов. Результаты экспериментов показали, что увеличение частоты и уменьшение мощности, приводит к снижению глубины реза, а увеличение скорости ухудшает его качество.

Если же наоборот увеличить мощность и уменьшить частоту, то при коэффициенте перекрытия в районе 90 % можно получить весьма хорошие результаты. А также экспериментальные данные показали возможность сварки силикатного стекла на фемтосекундной установке.

Заключение. В рамках проведенных исследований была выполнена серия экспериментов по резке стекла с использованием фемтосекундного лазерного излучения. В результате варьирования мощности, частоты и скорости обработки был подобран оптимальный режим для обработки: мощность 8 Вт, частота 25 кГц, скорость обработки 100 мм/с. И так же был найден режим сварки стекла.

Список источников

- [1] Ben-Yakar A., Byer R.L. Femtosecond laser ablation properties of silicate glass. *Journal of applied physics*, 2004. <https://doi.org/10.1063/1.1787145>
- [2] Беспалов В.Г., Козлов С.А., Петров Н.В. и др. *Фемтосекундная оптика и фемтотехнологии*. Санкт-Петербург, Университет ИТМО, 2018, 136 с.
- [3] Kim S., Kim J., Joung Y.-H., Choi J., Koo C. Bonding Strength of a Glass Microfluidic Device Fabricated by Femtosecond Laser Micromachining and Direct Welding. *Micromachines*, 2018, vol. 9 (12). <https://doi.org/10.3390/mi9120639>
- [4] Miyamoto I., Knorovsky G.A. *Laser microwelding in Microjoining and Nanojoining*. Cambridge, Woodhead Publishing, 2008.