

УДК 621.039

ОСОБЕННОСТИ СКВОЗНОЙ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА ВОЛОКОННЫМ ИТТЕРБИЕВЫМ ЛАЗЕРОМ

М. О. Каптаков¹, В. И. Ревенко¹, М. Е. Кустов¹, И. С. Курчатов¹,
В. В. Скрозникова¹, Т. Б. Киселёва¹, В. В. Бучанов², Э. Н. Муравьёв²,
М. А. Казарян³, Е. А. Кузнецова⁴, Е. Ф. Солинов¹, В. И. Скачков⁵

В статье рассмотрены некоторые принципиальные аспекты резки силикатных стёкол методом лазерного управляемого сквозного термораскалывания. В частности показано, что при воздействии на стекло излучением иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1.065 мкм, лежащей, практически, в области прозрачности стекла (вернее в области малого поглощения), скорость реза линейно зависит от мощности лазера. Показано, что торец стекла принимает различные геометрические формы при различном характере объемного нагрева и охлаждения. Поэтому для получения однородного торца требуется стабилизировать как мощность лазерного излучения, так и скорость перемещения лазерного луча при соответствующей геометрии лазерных лучей в области реза. Приведены способы получения различных форм сечения торцов стекла и методы получения притуплённых кромок торцов.

Ключевые слова: объемный нагрев, лучевое воздействие, сквозная резка, форма кромки, силикатное стекло.

¹АО “Научно-исследовательский институт технического стекла им. В. Ф. Солинова”.

² Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова.

³ ФИАН, 119991 Россия, Ленинский просп., 53; e-mail: kazar@sci.lebedev.ru.

⁴ Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана.

⁵ Сибирский физико-технический институт, Томский государственный университет, 634050 Россия, Томск, Новособорная пл., 1.

В 70-е годы был предложен способ резки стекла методом лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ) с использованием CO_2 -лазера. Этот способ обеспечивает удовлетворительную точность и высокое качество разделения [1–5]. Однако он имеет ограничения по толщине разделяемого стекла и скорости резки. Появление в последние годы современных высокомоощных волоконных лазеров, более стабильных и простых в эксплуатации по сравнению с газовыми, сделало актуальным проведение систематических исследований по резке стекла этими лазерами [6]. Развиваемый в данной работе метод, ранее предложенный в работе [7], в сравнении с упомянутыми выше, является более эффективным и стабильным, а также имеет существенно более широкую область применения, т.к. позволяет в несколько раз увеличить толщину разделяемого стекла. Он является перспективным для использования в авиационной, автомобильной и судостроительной промышленности.

Эксперименты по лазерной резке проводились на установках, содержащих волоконный иттербиевый лазер и робот фирмы KUKA.

Диаметр лазерного пятна на стекле задавался расстоянием от объектива до стекла и определялся как круглое отверстие, в которое проходило 86% мощности излучения, и составлял 5 мм по уровню $1/e^2$. Из форсунки обдува, расположенной рядом с объекти-

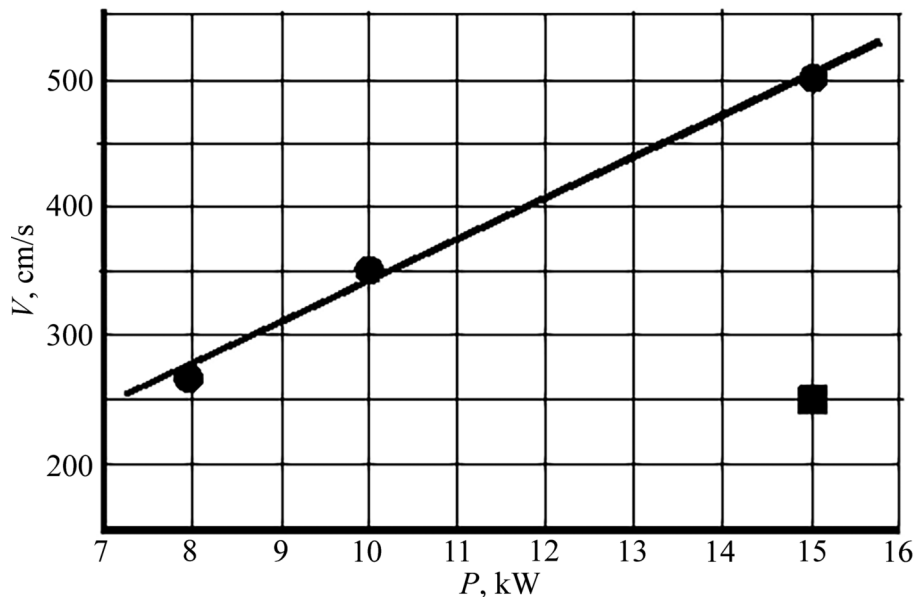


Рис. 1: Зависимость скорости резки от средней мощности лазера. Кружки – резка с наличием латунного листа под стеклом. Квадрат – резка стекла без латунного листа под стеклом.

вом шёл поток воздуха, падающий на область лазерного пятна на стекле. Расстояние от объектива до стекла составляло 650 мм. Распределение интенсивности в пучке было близко к гауссовскому.

Поскольку в части экспериментов стекло помещалось на полированную латунную плиту, отражающую до 85% падающего излучения, которое перегревало шланги и провода установки, то мощность лазера ограничивалась величиной 15 кВт. Для защиты от попадания отражённого от латуни излучения применялся также наклон лазерного пучка в плоскости, перпендикулярной плоскости падения луча, на 5 градусов.

Эксперименты с вышеописанным устройством являются достаточно трудоемкими и, в принципе, требуют большого рабочего времени, поэтому на первых парах проводились точечные предварительные измерения по определению оптимальных скоростей реза при каждом уровне мощности лазерного излучения. Тем не менее, по графику на рис. 1, просматривается близкая к линейной зависимость скорости реза от падающей мощности излучения.

Отклонение от линейности должно проявляться сильнее при низких скоростях движения лазерного луча. Когда же время перемещения пучка на диаметр лазерного пятна значительно меньше, чем характерное время рассасывания тепла в стекле, то можно считать, что при любой скорости перемещения лазерного пучка, большей некоторого критического значения, определяемого в вышеуказанных рассуждениях, и при одновременном увеличении мощности лазера с тем, чтобы количество энергии на один см траектории оставалось неизменным, скорость реза должна линейно зависеть от мощности излучения. Это и подтверждается результатами эксперимента.

При разделении образцов силикатного стекла методом сквозного ЛУТ возможно формирование новообразованной поверхности торца заданной формы. Формирование торца осуществляется за счёт создания несимметричных относительно линии реза полей напряжений в объёме материала, подвергающегося лазерному воздействию.

Формирование несимметричных полей напряжений возможно различными способами, такими как локальное охлаждение поверхности образца и/или дополнительный локальный нагрев объёма материала лазерным лучом.

В ходе экспериментальных работ, используя различные методы и режимы сквозного ЛУТ, удалось получить различные формы торцов на образцах стекла (рис. 2).

Одним из способов формирования профиля на торце образца является использование двустороннего локального обдува обеих поверхностей стекла.

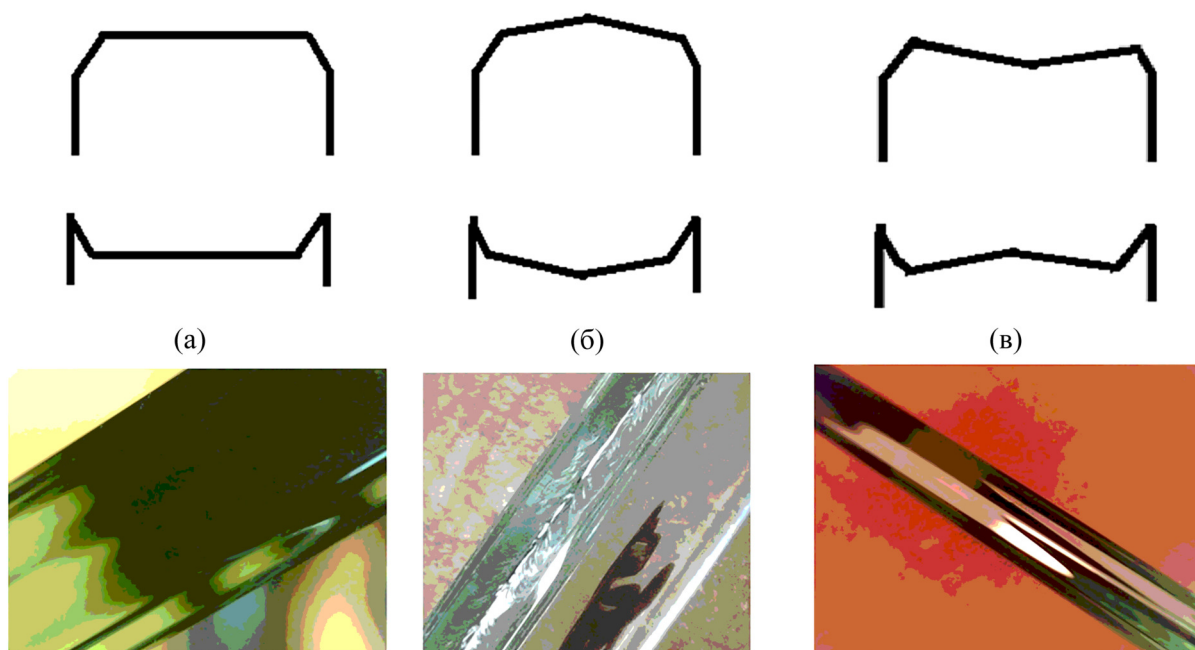


Рис. 2: Профили получаемых торцов на вогнутой и выпуклой сторонах образца, (а) – с плоским основанием, (б), (в) – с фигурным основанием.

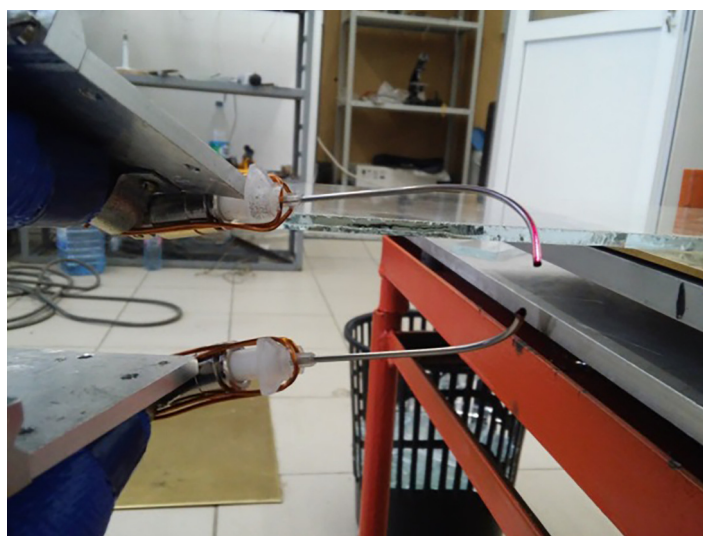


Рис. 3: Система двустороннего локального обдува поверхности стекла.

Эксперименты проводились с использованием непрерывного 700 Вт иттербиевого лазера с длиной волны 1065 нм, робота KUKA, компрессора и предметного столика, на котором струбцинами был закреплён образец. Край образца располагался за пределами столика. На фланце робота было установлено крепление оптической системы лазера и

система точечного обдува. Обдув осуществлялся через иглы диаметром 2 мм с обеих сторон образца (рис. 3).

В качестве образцов использовались стекла марок М1 и оптивайт. Положительный результат достигнут на образцах марки М1. Формируемый на образцах марки оптивайт торец слабо выражен.

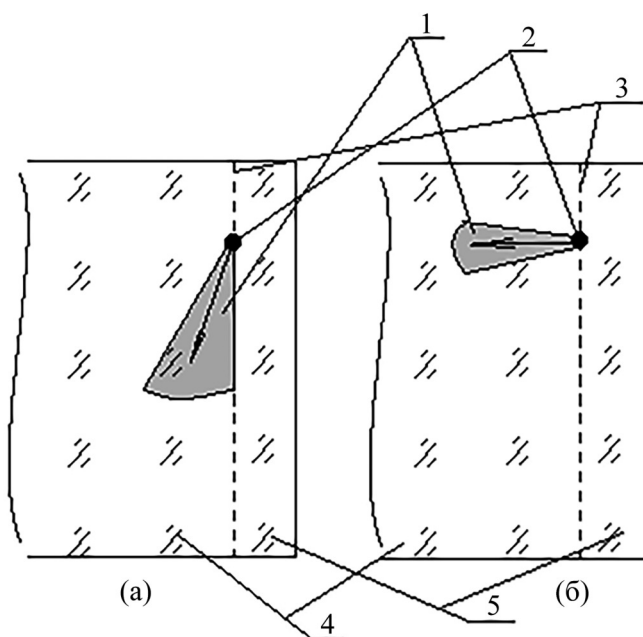


Рис. 4: Схематическое расположение зоны охлаждения (1) относительно линии реза (3) и области воздействия лазерного луча (2). Слева (4) от линии реза – большая часть образца (тело), справа (5) – отделяемый припуск.

Экспериментальным путём было получено необходимое взаимное расположение игл системы обдува относительно линии реза (рис. 4).

При расположении верхней и нижней форсунок обдува так, как указано на рис. 4(а) удаётся получить профиль (б) (рис. 2(б)) торца образца. Сектор обдува направлен в тело образца (тело – более широкая часть образца, припуск – отделяемая, более узкая, часть) вдоль линии реза в противоположном направлении движению луча. При расположении форсунок согласно рис. 4(б), наблюдается эффект “залечивания” трещины реза, когда новообразованные поверхности вновь сливаются.

Другим способом формирования контролируемого профиля торца является несимметричный нагрев за счёт отражения луча.

В этом случае образец располагался на полированной латунной поверхности предметного столика. Воздух в область реза подавался с помощью форсунки, а обдув направлялся в пятно лазера.

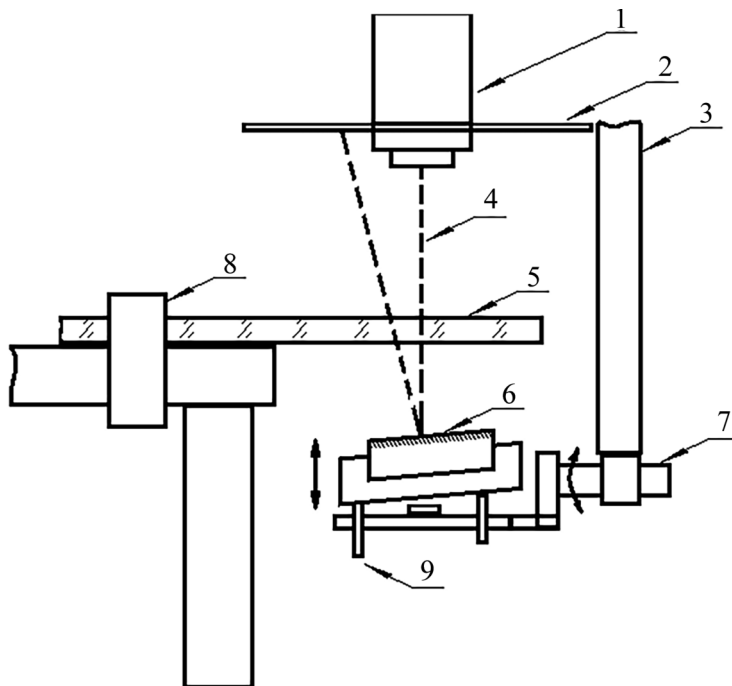


Рис. 5: Узел крепления отражающего зеркала под стеклом: 1 – объектив, 2 – защитный диск, 3 – штанга крепления зеркала, 4 – ход лазерного излучения, 5 – образец, 6 – медное зеркало с покрытием, 7 – ось вращения зеркала, 8 – трубочина для фиксации образца, 9 – регулировка наклона зеркала в плоскости, перпендикулярной плоскости реза.

В эксперименте использовалось стекло марки М1 толщиной 5 мм. Формирование притуплённого торца на теле стеклозаготовки возможно при отклонении лазерного луча таким образом, чтобы пятно отраженного луча располагалось несколько впереди основного пятна лазерного излучения и было отклонено от траектории реза в сторону тела образца. При контакте образца с подложкой отклонить отражённый луч удаётся незначительно. Кроме того, наблюдается разница в притуплении нижней и верхней кромки, по всей видимости, связанная с разницей нагрева нижней и верхней поверхности из-за контакта с подложкой. Для получения равномерного притупления требуется вывесить стекло над латунной поверхностью на некотором расстоянии (порядка 10 мм). Также для обеспечения стабильности на протяжении всего реза необходимо обеспечить

ровную отражающую поверхность. Альтернативой может служить система с нижним отражающим медным зеркалом с многослойным отражающим покрытием, закреплённым аналогичным двустороннему обдуву методом (рис. 5).

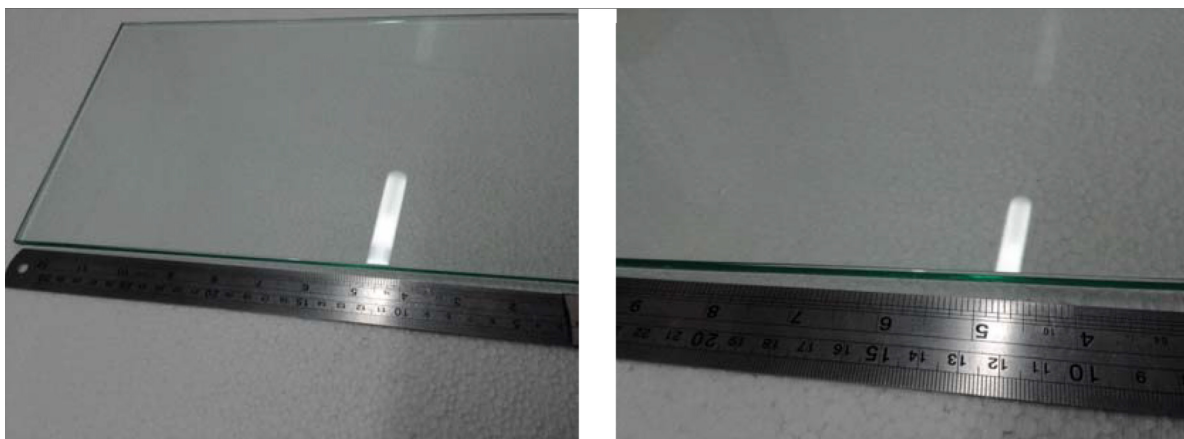


Рис. 6: Образец с притуплённым профилем кромки.

Для получения стабильной притуплённой кромки на образцах (рис. 6) необходимо расположить зеркало таким образом, чтобы отражённый пучок, как и в случае отражающей подложки, был отклонён в тело изделия и находился перед основным лучом. Данным методом удалось получить стабильную, ярко выраженную притуплённую кромку как на образцах стекла марки М1, так и на образцах марки оптивайт.

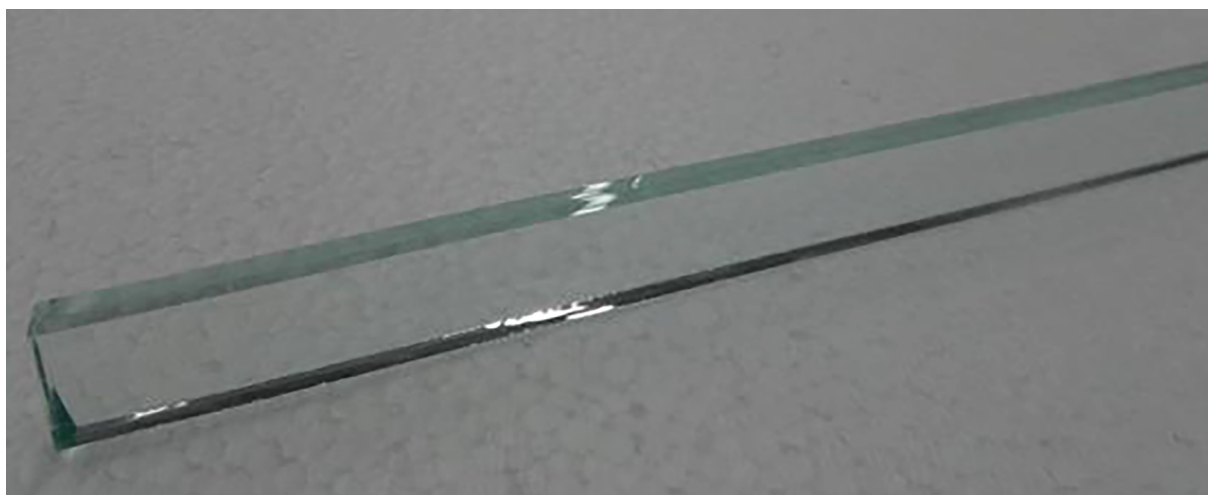


Рис. 7: Прямой торец образца, полученный с использованием отражения от нижнего зеркала. Верхняя грань на фото – поверхность разделения образца.

При расположении отражённого луча на линии реза, перед основным пятном, профиль торца нестабилен, наблюдаются многочисленные дефекты. Если отражение сильно смещено в тело образца, профиль торца представляет собой прямой ровный рез (рис. 7).

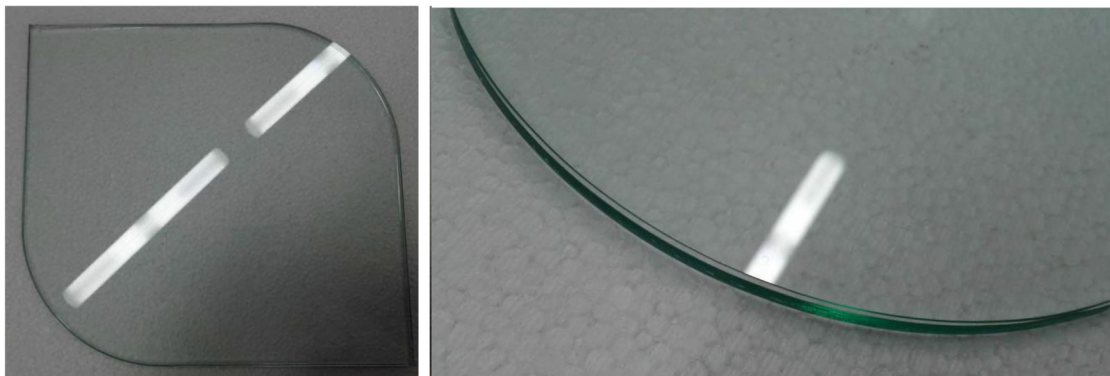


Рис. 8: Слева – вид образца после лазерной обрезки, справа – фрагмент криволинейной траектории с притуплённым торцом.

Используя данную оснастку, удаётся добиться наиболее стабильных результатов. При раскрое по криволинейной траектории, также получен положительный результат (рис. 8).

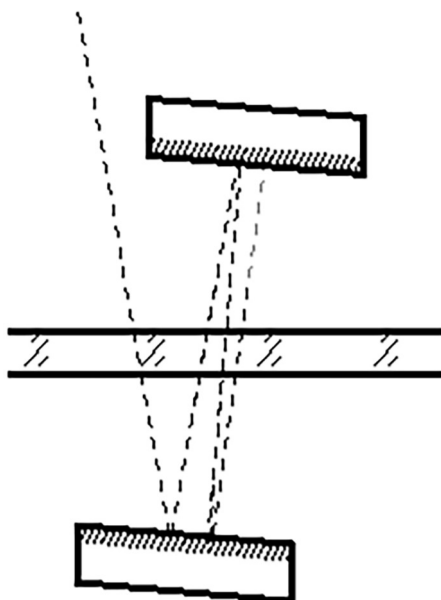


Рис. 9: Система многократного отражения лазерного луча.

Были опробованы различные модификации оснастки с нижним зеркалом.

Наиболее перспективной является оснастка со вторым отражающим зеркалом (система многократного отражения луча (рис. 9)).

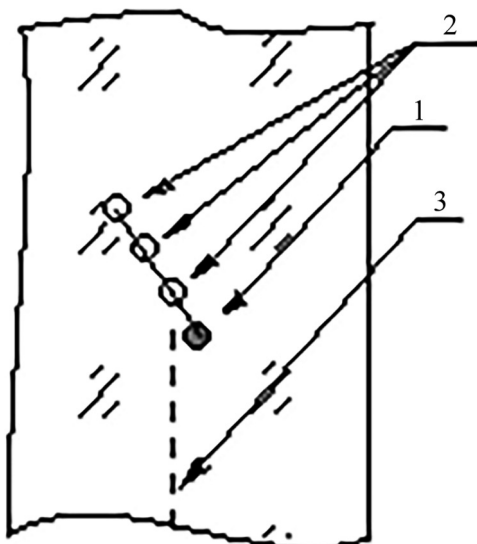


Рис. 10: Расположение пятен системы многократного прохождения через образец лазерного луча для формирования притуплённого торца на теле образца: 1 – область воздействия на образец прямого проходящего лазерного луча, 2 – области прохождения образца отражёнными лучами, 3 – линия разделения образца.

При использовании двух зеркал удалось получить ускорение процесса ЛУТ на образцах стекла М1 в три раза по сравнению с простым проходящим пучком. Для получения

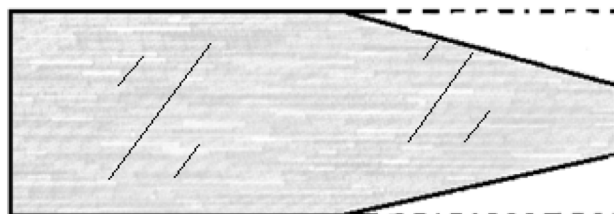


Рис. 11: Притуплённый торец, полученный методом многократного прохождения лазерного луча.

наибольшего эффекта ускорения реза необходимо использовать параллельный пучок лазерного излучения. Системой двух зеркал также удаётся получить притупление при линии лазерных пятен, повёрнутой относительно траектории реза (рис. 10).

Ярко выраженное притупление торца образца, полученное данным способом, представлено на рис. 11.

Следует отметить, что для всех вышеперечисленных способов получения притуплённого торца является характерной чертой высокая чувствительность методов к режимам скорости и мощности. Данные параметры так же, как и геометрическое расположение зон нагрева и охлаждения, существенно влияют на формирование профиля торца. Для получения торца с точно выраженным, однородным краем требуется выдерживать величины мощности лазерного излучения и скорости перемещения лазерного пучка с высокой точностью.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Г. А. Мачулка, *Лазерная обработка стекла* (М., Советское радио, 1979).
- [2] В. Ф. Солинов, В. С. Кондратенко, В. М. Брауде, *Техника, экономика, информация*. Сер. Техника. Вып. 6–7, 47 (1982).
- [3] В. С. Кондратенко, *Лазерное управляемое термораскалывание хрупких материалов* (М., МГУПИ, 2007).
- [4] *Лазерная техника и технология: в 7 кн.: учеб. пособие для вузов*. А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов; под ред. А. Г. Григорьянца (М., Высш. шк., 1988). Кн. 4: Лазерная обработка неметаллических материалов.
- [5] В. К. Сысоев, Ю. Н. Булкин, В. С. Чадин и др., *Письма в ЖТФ* **33**(1), 54 (2007).
- [6] В. В. Бучанов, М. Е. Кустов, Э. Н. Муравьев и др., *Стекло и керамика*, № 9, 6 (2014).
- [7] В. В. Бучанов, М. А. Казарян, Э. Н. Муравьев, В. И. Ревенко, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **44**(9), 25 (2017).

Поступила в редакцию 29 июня 2018 г.