

## Управление глубиной микротрещины при резке материалов методом лазерного термораскалывания

*В. С. Кондратенко, М. Т. Мелкумян*

*В статье рассматриваются преимущества метода лазерного управляемого термораскалывания. Описывается экспериментальная установка, созданная для повышения эффективности резки за счет развития и углубления микротрещины. Рассматриваются способы коррекции функции перемещения устройства докола и возможность реализации двух операций в одном цикле.*

*Ключевые слова:* лазерное управляемое термораскалывание, ЛУТ, стекло, микротрещина, докол стекла, пьезопривод, цифровая коррекция.

### Введение

Традиционные способы разделения хрупких неметаллических материалов обычно выполняются с помощью механических операций, при этом в качестве режущего инструмента используют алмазные кристаллы, искусственные кристаллы (типа корунда) и твердосплавные ролики [1]. Такая резка вызывает засорение наружных частей заготовок и не обеспечивает высокой прочности по механическим характеристикам, прежде всего, из-за возникновения большого количества микротрещин на кромках изделий, по которым обычно происходит раскол материала.

При сравнении метода лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ) [2] с механическими способами разделения материалов обнаруживается масса преимуществ, к которым можно отнести следующие факторы: более высокая чистота процесса резки; нулевая ширина реза; более низкие энергетические затраты; высокая скорость резки; повторяемость и минимальные отклонения от заданных границ разрезаемых материалов, повышение механической прочности заготовок до 5,5 раз при сравнении с резкой, в которой используется твердосплавные ролики [3, 4]. Однако

сложность получения сквозного термораскалывания при толщинах материала более 0,6 мм можно отнести к недостаткам способа ЛУТ. При этом наибольшие сложности возникают при криволинейном раскрое материалов.

Очевидная необходимость оптимизации метода ЛУТ вызвана также возрастающими требованиями к параметрам качества и точности раскроя хрупких материалов, особенно в случае материалов полупроводниковой электроники.

Целью данной работы является поиск возможных методов обеспечения высокоэффективной резки методом ЛУТ за счет управления глубиной микротрещины с помощью дополнительных воздействий на термораскалываемый материал.

### Основы метода ЛУТ

Способ ЛУТ [2] заключается в создании микротрещины в поверхностных слоях материала в виде канавки, возникающей за счет напряжений в результате нагрева лазером верхнего слоя материала с последующим интенсивным охлаждением. Схема метода ЛУТ приведена на рис. 1. Для начального зарождения микротрещины в необходимой точке наносят локальный надрез на краю пластины, используя наконечник алмазной пирамидки или ультрафиолетовый лазер, создающий микротрещину глубиной несколько мкм. Из-за возникновения существенной разницы температур после нагрева и резкого охлаждения в поверхностных слоях материала возникают напряжения сжатия и растяжения, которые превышают предел прочности материала и приводят к образованию микротрещины, распространяющейся вдоль лазерного пучка и охлаждающего сопла. Глубина возникающей трещины зависит от большого количества переменных, таких как тип разрезаемого материала

**Кондратенко Владимир Степанович**, директор, профессор, д.т.н.

**Мелкумян Марлен Тигранович**, аспирант.

Физико-технологический институт

Московского технологического университета.

Россия, 107996, Москва, ул. Стромьнка, 20.

Тел.: +7 (499) 681-33-56 доб. 1771.

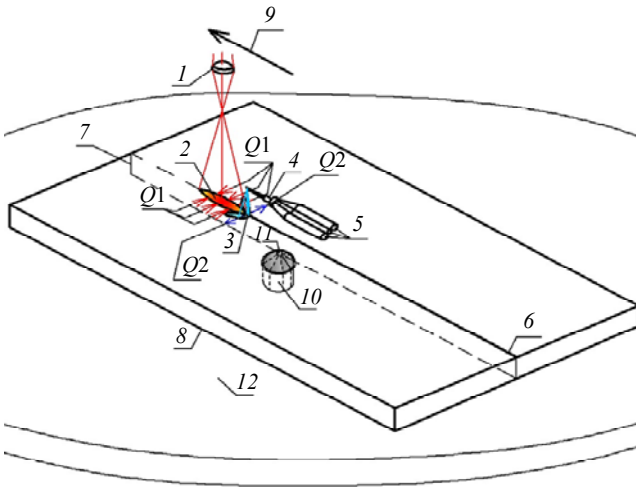
E-mail: kondratenko\_vs@mgupi.ru, kondratenko@mirea.ru,

mr-marlen@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2016 г.

© Кондратенко В. С., Мелкумян М. Т., 2017

ла, длина волны лазерного пучка, тип хладагента и т. д.



**Рис. 1. Схема метода ЛУТ:** 1 – фокусирующий объектив, 2 – лазерный пучок, 3 – хладагент, 4 – форсунка, 5 – водяной и воздушные капилляры, 6 – микротрещина, 7 – линия разделения, 8 – приборная пластина, 9 – направление перемещения лазерного пучка и форсунки; 10 – электропривод для углубления микротрещины, размещаемый под заготовкой в пространстве стола; 11 – концентратор энергии в виде шарика; 12 – стол; Q1 – напряжения сжатия, Q2 – напряжения растяжения.

### Оптимизация метода ЛУТ

С целью оптимизации метода ЛУТ собрана испытательная установка с дополнительными функциями для выполнения операции разделения изделий из хрупких материалов повышенной толщины. Принцип дополнительного воздействия базируется на передаче упругих колебаний в заготовку. За основу выбран один из способов докола, рассмотренный ранее в [5]. Выбранный способ базируется на устройстве докола, предложенном в [6].

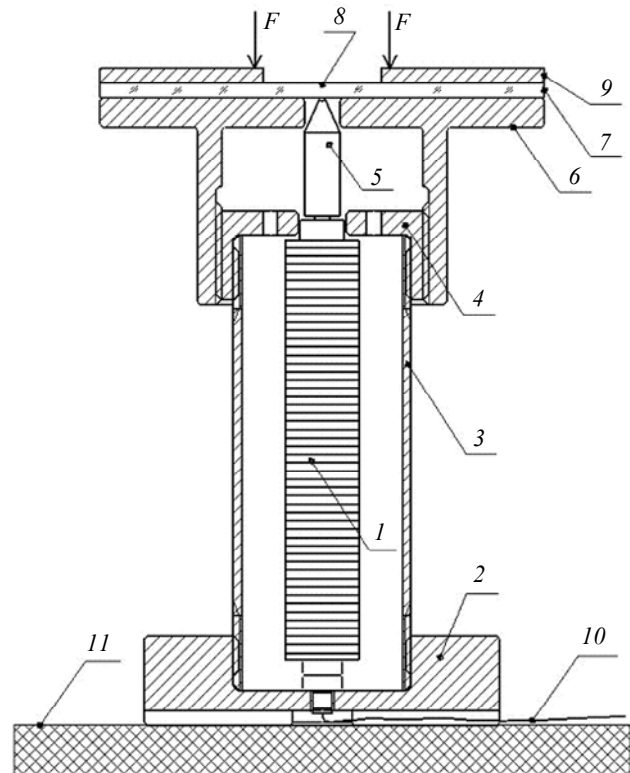
В интересах повышения эффективности устройства докола [6] в установку дополнительно введены следующие функции:

- управление приводом, который создает упругую волну, с помощью изменения подаваемой на него функции напряжения;
- контроль параметров привода.

На созданной испытательной установке используется армированный актуатор – пьезопривод продольного исполнения ППУ1 [7]. Пьезопривод имеет возможность линейного перемещения на десятки мкм и конструктивно состоит из набора пьезодисков. Армирование шпилькой с большим усилием (около 250 кгс) позволяет пьезоприводу перемещаться при его прижиге к заготовке. Перемещение с амплитудой 24 мкм осуществляется за

счет сжатия или растяжения при подаче на него напряжения до  $\pm 300$  В.

На рис. 2. показана основная схема испытательной установки для докалывания стекла. Заготовка из стекла с нанесенной микротрещиной методом ЛУТ устанавливается на столик. Прижимная пластина придавливает стеклянную заготовку к столику. Столик имеет возможность перемещения вниз-вверх для регулировки силы прижатия ударника к стеклянной заготовке. Пьезопривод управляется с персонального компьютера или любого другого цифрового источника напряжения. Применяется схема усиления напряжения на базе усилителя звуковых частот и трансформатора. За счет подачи напряжения привод растягивается. Конический ударник, выполненный с впрессованным шариком, служит для увеличения давления в точке контакта и передает упругую сферическую волну в заготовку. Волна отражается от противоположной стороны, где нанесена микротрещина, и вызывает тем самым растягивающие напряжения, приводящие к доколу стекла по нанесенной линии реза.



**Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки для докалывания стекла.** 1 – пьезоэлектрический привод, 2 – крышка нижняя, 3 – корпус, 4 – крышка верхняя, 5 – ударник, 6 – столик, 7 – стеклянная заготовка, 8 – микротрещина, 9 – прижимная пластина, 10 – провода к управляющей электрической части, 11 – стол.

В Московском технологическом университете способом ЛУТ были нанесены линии реза на

отрезки стекла. Основные параметры процесса ЛУТ были следующими: эллиптический пучок газового  $\text{CO}_2$ - лазера с размерами  $2 \times 10$  мм (длина волны излучения 10,6 мкм), скорость перемещения пластины – 25 мм/с, в качестве хладагента применялась смесь вода–воздух. Глубина нанесенной микротрещины способом ЛУТ составляла 350 мкм.

На испытательном стенде получены положительные результаты по доколу стекла с толщинами до 6 мм.

### Оценка результатов и выбор оптимальных режимов докола

По полученным отрезкам стекла (после операции докалывания) выполнена оценка качества получившихся торцов при разных формах сигнала частотой 50 Гц («прямоугольный», «пилообразный» и «треугольный»), подаваемого на пьезопривод.

На рис. 3 представлен один из результатов докола отрезка из стекла толщиной 6 мм и длиной 60 мм при подаче прямоугольного сигнала напряжением 500 В от пика до пика и частотой 50 Гц. Неровность вначале отрезка вызвана дефектом, возникшим во время нанесения микротрещины способом ЛУТ. Углубление – место контакта шарика и заготовки во время операции докола.

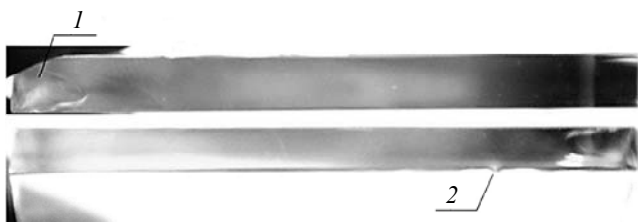


Рис. 3. Фотография торца доколотой заготовки при использовании сигнала «прямоугольник» амплитудой 250 В,  $f = 50$  Гц, вид с разных сторон. 1 – неровности, возникшие во время резки ЛУТ, 2 – место контакта ударника с заготовкой.

При использовании сигнала «пила» качество докола получается хуже, чем с сигналом «прямоугольник». При низком давлении шарика ударника на отрезке сложнее получить докол до конца по длине, при большом давлении скосы получаются сильнее. При использовании сигнала «треугольник» качество докола заготовок получается наилучшим.

В работе также проведена оценка качества торцов доколотых заготовок, варьируя сигналы разных частот и определяя минимальную необходимую амплитуду напряжения для докалывания отрезка длиной 60 мм и толщиной 6 мм по всей длине при одном ударе.

### Пути дальнейшего совершенствования установки на базе ЛУТ

Очевидно, что управление амплитудой напряжения, а соответственно, и силой удара, позволяет, в принципе, оценить возможность докола предложенным способом с минимальными или даже отсутствующими сколами. Для снятия выходной функции, т. е. функции удара по заготовке, необходимо использовать обратную связь, размещаемую на дисках пьезопакетов (встроена в пьезопривод), а также используя тензодатчик, размещаемый вместо заготовки в точке контакта с целью более точной оценки движения привода.

После получения функции движения можно будет применить цифровую коррекцию фазы к исходному цифровому сигналу, используя фильтр конечной импульсной характеристики [8]. Для этого потребуются измерить функцию давления на тензодатчике при подаче единичного дельта-импульса относительно используемой частоты дискретизации и шкалы цифро-аналогового преобразователя с последующей оценкой амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик. Современное программное обеспечение для персонального компьютера [9], использующее различные методы измерений [10], а также наличие звуковой карты с цифро-аналоговыми и аналого-цифровыми преобразователями позволяют выполнить нужные измерения. Реверсированная измеренная импульсная характеристика, в целом, будет искомым фильтром конечной импульсной характеристики [11], но при его применении необходимо учитывать возможный существенный рост амплитудных значений напряжения на низких частотах, которые в исходном сигнале ограничены фильтром источника и трансформатора. При очень больших изменениях амплитуды виртуальный фильтр можно генерировать, используя программное обеспечение Rephase [12] и тем самым корректируя значения фазы и амплитуды на нужную величину. Такого рода фильтр обеспечит постоянность времени групповой задержки и, следовательно, наиболее резкий фронт сигнала, трансформирующийся в удар.

После полученных результатов можно будет точно сказать о перспективе внедрения такой установки непосредственно при резке методом ЛУТ, а также о необходимости высоковольтного усилителя, к которому пьезопривод будет подключаться непосредственно без трансформатора.

На установке ЛУТ источник колебаний можно встроить в пространство координатного столика. В координатном столике необходимо предусмотреть отверстие для ударника привода (см. рис. 1), которое разместить вслед за хладагентом

том, причем заготовка дополнительно прижимается сверху к столику.

Возможен вариант, когда перемещается оптика, а привод размещается в пространстве неподвижного стола, заготовка также дополнительно прижимается сверху к столу.

И последний вариант – под линией реза по всей длине размещается цилиндрический стержень, заготовка дополнительно прижимается к координатному столику сверху, ударник выполняется V-образной формы и воздействует эквидистантно со стороны микротрещины.

Можно говорить об автоматизации процесса докола заготовок, т. к. давление удара контролируется функцией электрического напряжения, которое очень точно генерируется любым источником, используя цифро-аналоговый преобразователь (звуковая карта персонального компьютера, смартфон, микроконтроллер и т. д.). Это обеспечит повторяемость операции докола на установке. Достаточно будет сделать приспособления для определенных типов заготовок, если выполнять как отдельную операцию.

### Заключение

На основании проведенных экспериментальных исследований на созданной испытательной установке, а также с учетом имеющегося опыта использования метода ЛУТ можно сделать следующие выводы.

1. Способ ЛУТ при резке хрупких неметаллических материалов имеет существенные преимущества в сравнении с традиционными механическими методами.

2. Для оптимизации процесса собрана испытательная установка для докола отрезков с предварительно нанесенными линиями реза методом ЛУТ. В ходе её создания рассмотрены принципиальная схема и способы управления приводом.

3. Экспериментально подтверждена возможность докола стекол с толщинами до 6 мм при использовании периодических сигналов.

4. Для качественного повышения результатов докола необходимо использовать коррекцию управляющего сигнала с целью получить импульс с регулируемой мощностью, что позволит оценить возможность докола без скола в месте контакта ударника и заготовки.

4. Внедрение усовершенствованной установки для реализации способа ЛУТ может позволить полностью автоматизировать операцию докывания стекла непосредственно в момент или после создания микротрещины.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Yong Sang Byun, Moo Yeol Park, Sung Su Jung, et al.* / United States Patent No.: US7710534 B2. Int.Cl. G02F 1/1339. System and method for manufacturing liquid crystal display devices. 2010.
2. *Кондратенко В. С.* / Патент РФ № 2024441, М.Кл.5 C03B33/02. Способ резки хрупких материалов. 1992.
3. *Жималов А. Б., Солинов В. Ф., Кондратенко В. С., Каплина Т. В.* // Стекло и керамика. 2006. № 10. С. 3.
4. *Kondratenko V. S., Gindin P. D., Trubienko O. V., Hsu Muchi, Naumov A. S.* // Journal of Optical Technology. 2009. Vol. 76. No. 11. P. 733.
5. *Гиндин П. Д., Кондратенко В. С., Коденко Н. М.* / Тез. докл. XIII Междунар. Конф. «Лазеры в науке, технике, медицине» – Сочи, 2002.
6. *И. Б. Синани* / Патент СССР 789444, М.Кл.3 C03 B 33/02. Устройство для отломки стекла. 1998.
7. Армированные актуаторы продольного типа ППУ1...ППУ8: Компания АО «Научно-исследовательский институт «Элпа», URL: <http://www.elpapiezo.ru/Datasheets/AKTUATORS%20armir.pdf>
8. *Steven W. Smith.* The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. Second Edition. Chapter 18. – California Technical Publishing P.O. Box 502407 San Diego, CA 92150-2407, ISBN 0-9660176-6-8.
9. *John Mulcahy* Program «REW–Room EQ Wizard», URL: <http://www.roomeqwizard.com>
10. *Guy-Bart Stan, Jean-Jacques Embrechts, Dominique Archambeau.* // JAES 2002. Vol. 50, No. 4. P. 249.
11. *Беляев К. П., Морозов А. А.* // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. 1993. № 4. С. 40.
12. *Thomas Drugeon* Program «Rephase»: URL: <https://sourceforge.net/projects/rephase>.

## Controlling of a microcrack depth during cutting of materials using the laser thermal cracking method

V. S. Kondratenko and M. T. Melkumyan

Physical-Technological Institute of the Moscow Technological University  
20 Strominka str., Moscow, 107996, Russia  
E-mail: kondratenko\_vs@mgupi.ru, kondratenko@mirea.ru, mr-marlen@mail.ru

Received December 26, 2016

**Consideration is given to advantages of the laser controlled thermal cracking method. An experimental setup has been made to improve the efficiency of the method by deepening of microcracks. Some ways have been offered to correct the displacement function of cracking device and to obtain a possibility of implementing two operations in one cycle.**

**Keywords:** laser controlled thermocracking, glass, glass splitting, piezodrive, digital correction.

### REFERENCES

1. Yong Sang Byun, Moo Yeol Park, Sung Su Jung, et al., United States Patent No.: US7710534 B2. Int.Cl. G02F 1/1339. (2010).
2. V. S. Kondratenko, Russian Federation Patent №2024441, M.Kl.5 C03B33/02. (1992).
3. A. B. Jimalov, V. F. Solinov, V. S. Kondratenko, and T. V. Kaplina, *Steklo i Ketamika*. No. 10, 3 (2006).
4. V. S. Kondratenko, P. D. Gindin, O. V. Trubienko, Muchi Hsu, and A. S. Naumov, *Journal of Optical Technology* **76**, 733 (2009).
5. P. D. Gindin, V. S. Kondratenko, and N. M. Kodenko, in Proc. XIII Conf. «Lasers in science, engineering, medicine» (Sochi, 2002).
6. I. B. Sinani, SU Patent 789444, M.Kl.3 C03 B 33/02. (1998).
7. *Reinforced actuators longitudinal type PPU-1...PPU-8*: Elpa Research Institute, JSC. URL: <http://www.elpapiezo.ru/Datasheets/AKTUATORS%20armir.pdf>
8. S. W. Smith. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. Second Edition. Chapter 18* (California Technical Publishing P. O. Box 502407 San Diego, CA 92150-2407, ISBN 0-9660176-6-8).
9. John Mulcahy, *Software «REW - Room EQ Wizard»*: URL: <http://www.roomeqwizard.com>
10. Stan Guy-Bart, Embrechts Jean-Jacques, and Archambeau Dominique, *JAES* **50**, 249 (2002).
11. K. R. Belyaev and A. A. Morozov, *Vestnik MGTU. Ser. Priborostroenie*, No. 4, 40 (1993).
12. Thomas Drugeon, *Software «Rephase»* URL: <https://sourceforge.net/projects/rephase>.