



ВОЗМОЖНОСТЬ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ СТЕКЛА *

В.В. Бучанов¹, М.А. Казарян², Е.А. Кузнецова³, В.И. Ревенко⁴, В.И. Сачков⁵

¹ИП Бучанов Владимир Васильевич

«Научные исследования и разработки в области естественных и технических наук»

д. 7/5, проезд Одоевского, Москва, 117574, Россия
тел.: +7 (985) 813-70-25; e-mail: vladbuch@hotmail.com

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

д. 53, Ленинский проспект, Москва, 119991, Россия
тел.: +7(499)135-42-64; e-mail: postmaster@lebedev.ru

³Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э.Баумана

д. 1, ул. 1-я Институтская, Мытищи, Московская обл., 141005, Россия
тел.: +7(495)583-64-90

⁴АО «Научно-исследовательский институт технического стекла им. В.Ф. Солинова»

д. 29/5, ул. Кржижановского, Москва, 117218, Россия
тел.: +7(499)125-39-21

⁵Сибирский физико-технический институт при Томском государственном университете

д. 1, пл. Новособорная, Томск, 634050, Россия
тел.: +7 (3822) 53-35-77; e-mail: itc@spti.tsu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.16-18.088-097

Заключение совета рецензентов: 18.04.18 Заключение совета экспертов: 15.05.18 Принято к публикации: 01.06.18

Появление в последние годы высокомошных волоконных лазеров, более эффективных и простых в эксплуатации по сравнению с другими типами лазеров, сделало актуальным проведение систематических исследований и разработку технологии резки стекла методом управляемого термораскалывания. В статье рассмотрен вопрос о возможности высокоскоростной резки стекла современными лазерами мощностью до нескольких десятков киловатт в ближнем инфракрасном диапазоне излучения. Определялось поле упругих напряжений, возникающее в стеклянной пластине при её нагреве лазерным излучением. Метод исследования базировался на теории термоупругости.

Представлена математическая модель расчета температуры и упругих напряжений, индуцированных облучением стекла движущимся лазерным лучом. Приведены результаты численного моделирования температурных полей и профилей упругих напряжений при различных скоростях движения пятна облучения. Показано, что при высокой мощности излучения максимально достижимая скорость резки стекла прямо пропорциональна мощности. Имеющиеся в литературе данные по скорости резки борского стекла при низких мощностях излучения (менее 400 Вт) экстраполированы на высокие мощности (до нескольких десятков киловатт). Показано, что скорость резки может достигать 70 см/с при мощности лазерного излучения 20 кВт. Для резки крупногабаритных листов стекла в массовом производстве рекомендуются волоконные иттербиевые лазеры, имеющие длину волны излучения 1,065 мкм, которые удовлетворяют требованиям по уровню мощности, стабильности излучения и ресурсу работы. Кроме того, эти лазеры имеют возможность транспортировки излучения по оптоволоконному кабелю и автоматического управления пространственным положением пятна облучения. Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых

*Бучанов В.В., Казарян М.А., Кузнецова Е.А., Ревенко В.И., Сачков В.И. Возможность высокоскоростной лазерной резки стекла // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;16-18:88-97.

технологий по резке стекла на промышленных линиях по производству флоат-стекла, в технологическом процессе раскроя листов стекла и резки 3D-стеклоизделий. Метод лазерного управляемого термораскалывания, в сравнении с другими лазерными методами резки стекла, является более эффективным и стабильным, а также имеет существенно более широкую область применения, так как позволяет в несколько раз увеличить толщину разделяемого стекла.

Ключевые слова: лазерная резка; термораскалывание; упругие напряжения; иттербиевый волоконный лазер; борское стекло.

THE POSSIBILITY OF HIGH-SPEED LASER GLASS CUTTING

V.V. Buchanov¹, M.A. Kazaryan², E.A. Kuznetsova³, V.I. Revenko⁴, V.I. Sachkov⁵

¹Individual Entrepreneur Vladimir Buchanov “Research and Development on Natural Sciences and Engineering”

7/5 Odоеvsky passage, Moscow, 117574, Russia
tel.: +7 (985) 813 70 25

²P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences

53 Leninsky Av., Moscow, 119991, Russia

tel.: +7 (499) 135 42 64, e-mail: postmaster@lebedev.ru

³Mytishchi branch of the Bauman MSTU

1 First Institutuskaya St., Mytishchi, Moscow region, 141005, Russia

tel.: +7 (495) 583-64-90

⁴JSC “Scientific Research Institute of Technical Glass”

5/29 Krzhizhanovsky St., Moscow, 117218, Russia

tel.: +7 (499) 125 39 21

⁵Siberian Physical-Technical Institute of Tomsk State University

1 Novosobornaya Sq., Tomsk, 634050, Russia

tel.: +7 (3822) 53 35 77, e-mail: itc@spti.tsu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.16-18.088-097

Referred 18 April 2018 Received in revised form 15 May 2018 Accepted 1 June 2018

In recent years, the appearance of high-power fiber lasers, more efficient and easier to operate than other types of lasers, made it necessary to conduct systematic studies and develop a technology for cutting glass by the method of controlled thermal splitting. The paper considers the question of the possibility of high-speed cutting of glass by modern lasers with a power of up to several tens of kilowatts in the near-IR radiation range. In order to achieve the goal set in the work, the problem of determining the field of elastic stresses arising in a glass plate when it is heated by laser radiation has been solved. The method of investigation is based on the theory of thermoelasticity.

We have proposed a mathematical model for calculating the three-dimensional temperature distribution and elastic stresses caused by the irradiation of the glass by a moving laser beam and have presented the results of numerical simulation of temperature fields and elastic stress profiles at different irradiation spot velocities. At high radiation powers, the maximum achievable cutting speed of glass is shown to be directly proportional to the power. The data on the speed of Bohr glass at low radiation powers (less than 400 W) available in the literature we have extrapolated to a high power (up to several tens of kilowatts). The investigation shows that the cutting speed can reach 70 cm / s at a laser radiation power of 20 kW. For cutting large-sized glass sheets in mass production, the fiber ytterbium lasers having a wavelength of 1.065 m are recommended. These lasers meet the requirements for power level, irradiation stability and service life. In addition, they have the ability to transport radiation through a fiber optic cable and the ability to automatically control the spatial location of the radiation spot. The results obtained can be used to develop new technologies for cutting glass on industrial lines for the production of float glass, in the process of cutting glass sheets and cutting 3D articles. The method of laser controlled thermal splitting, in comparison with other methods of laser cutting glass, is more efficient and stable, and also has a much wider range of applications, because allows increasing in several times the thickness of the divided glass.

Key words: laser cutting; thermal splitting; elastic stresses; fiber ytterbium lasers; Bor glass.





Владимир Васильевич Бучанов
Vladimir Buchanov

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, ИП Бучанов Владимир Васильевич «Научные исследования и разработки в области естественных и технических наук».

Образование: Московский физико-технический институт (1977 г.).

Область научных интересов: лазерная физика; взаимодействие излучения с веществом.

Публикации: 60.

h-index 7; ORCID 0000-0002-9177-2940.

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Individual Entrepreneur Vladimir Buchanov “Research and Development on Natural Sciences and Engineering.”

Education: Moscow Institute of Physics and Technology, 1977.

Research interests: laser physics; interaction of radiation with matter.

Publications: 60.



Мишик Айразатович Казарян
Mishik Kazaryan

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН.

Образование: Московский физико-технический институт (1970 г.).

Область научных интересов: физика лазеров и их применение; физическая оптика.

Публикации: 600.

h-index 9, Scopus 9, РИНЦ 10, WoS 9;

ORCID 0000-0002-7087-3419

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Leading Researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of RAS.

Education: Moscow Institute of Physics and Technology, 1970.

Research interests: physics of lasers and applications; physical optics.

Publications: 600.



Екатерина Александровна Кузнецова
Ekaterina Kuznetsova

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, доцент Мытищинского филиала Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Образование: физический факультет Московского государственного университета (1970 г.).

Область научных интересов: общая физика; энергосберегающие технологии.

Публикации: 23.

ORCID 0000-0003-1237-7625

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor, the Mytishchi branch of the Bauman Moscow State Technical University.

Education: Faculty of Physics, Moscow State University, 1970.

Research interests: general physics; energy saving technology.

Publications: 23.



Валерий Иванович Ревенко
Valery Revenko

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, АО «Научно-исследовательский институт технического стекла им. В.Ф. Солинова».

Образование: физический факультет Московского государственного университета (1970 г.).

Область научных интересов: лазерная обработка материалов.

Публикации: 32.

ORCID 0000-0002-5232-1223

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher, JSC “Scientific Research Institute of Technical Glass”.

Education: Physics Faculty of Moscow State University, 1970.

Research interests: laser treatment of materials.

Publications: 32.



Виктор Иванович Сачков
Victor Sachkov

Сведения об авторе: д-р хим. наук, заведующий лабораторией Сибирского физико-технического института при Томском государственном университете.

Образование: Томский политехнический университет (2001 г.).

Область научных интересов: химия редких и радиоактивных материалов; химический катализ; химическая термодинамика; нанотехнологии; химический синтез; разделение изотопов.

Публикации: 75.

ORCID 0000-0001-7866-274X

Information about the author: D.Sc. in Chemistry, Head of the Laboratory, Siberian Physical-Technical Institute of Tomsk State University.

Education: Tomsk Polytechnic University, 2001.

Research interests: chemistry of rare and radioactive materials; chemical catalysis; chemical thermodynamics; nanotechnology; chemical synthesis; isotope separation.

Publications: 75.



1. Введение

В последние десятилетия активно развивается и внедряется в производственные технологии метод лазерной резки хрупких материалов, который основан на явлении разделения материалов упругими силами, возникающими в неоднородных температурных полях [1–3, 5–27]. Этот метод был назван лазерным управляемым термораскалыванием (ЛУТ). Ранее при резке кварцевого стекла применялись методы, основанные на процессах испарения и возгонки [1–4, 14–20], однако эти методы оказались неэффективными при резке обычных силикатных стекол [2]. В методе ЛУТ необходимые для разделения листов материала градиенты температуры возникают в результате локального лазерного нагрева до температур существенно ниже температуры размягчения стекла, часто в сочетании с локальным охлаждением. При этом линия разделения материала следует за лазерным лучом, перемещающимся относительно заготовки.

Способы лазерного термораскалывания неметаллических полупрозрачных материалов можно разделить на две большие группы:

- создание несквозной трещины с последующим механическим доламыванием;
- образование сквозной трещины.

Первым способом успешные опыты по лазерной резке стекла для получения наибольшего поглощения лазерного излучения были проведены посредством CO₂-лазера с длиной волны 10,6 мкм [1–2], излучение которого полностью поглощалось в поверхностном слое. Однако доламывание – это дополнительный и не очень удобный в производстве процесс, который значительно усложняется, если надо доламывать стекло крупногабаритной 3D-конструкции сложной формы. Кроме того, при доламывании возможно образование мелких частиц стекла, загрязняющих окружающее пространство и поверхность стекла.

Второй способ ранее считался бесперспективным вследствие малого поглощения в стекле лазерного излучения в видимой и ближней инфракрасной области спектра. С созданием компактных волоконных лазеров мощностью в несколько десятков киловатт эта проблема перестала быть актуальной. При этом способе стекло прогревается по всей толщине и происходит образование сквозной трещины, поэтому доламывания не требуется [1–3, 7–12]. В данной статье рассматривается только второй способ.

Метод ЛУТ в рамках всего технологического процесса получения стеклоизделия может оказаться не менее эффективным, чем резка другими способами,

за счёт исключения операций шлифовки и полировки и уменьшения количества отходов. Помимо этого, данный метод имеет следующий ряд технических преимуществ:

- гибкость в условиях большой номенклатуры выпускаемых изделий;
- возможность резки 3D-изделий;
- возможность полной автоматизации процесса;
- более экономичное использование стекла и уменьшение количества отходов;
- отсутствие механического воздействия на материал.

Технология лазерной резки крупногабаритных листов стекла для массового производства пока находится в стадии разработки. Лазеры для этой цели должны иметь:

- достаточный уровень мощности;
- высокое качество;
- стабильность излучения;
- возможность транспортировки излучения по оптоволоконному кабелю;
- большой ресурс работы (не менее 10⁴ часов);
- автоматическое управление мощностью и пространственным положением пучка.

Таковыми свойствами в полной мере обладают волоконные итербиевые лазеры мощностью до 100 кВт с длиной волны излучения около 1,065 мкм. Благодаря возможности транспортировки такого мощного излучения по оптическому кабелю на большие расстояния, становится вполне реалистичным размещение всего необходимого лазерного оборудования в пределах типичного цеха, предназначенного для резки или раскроя стекла.

С точки зрения экологии, технология лазерной резки стекла методом ЛУТ является наиболее привлекательной среди других методов резки стекла. Это связано прежде всего с тем, что технология является химически чистой – не требует вспомогательных материалов и не выделяет химических продуктов разделения, как при термическом разделении стекла. Технология не нуждается в присутствии операторов в зоне лазерной резки стекла, является бесшумной и может обеспечить высокую санитарно-гигиеническую безопасность.

В данной работе впервые численным моделированием проведена экстраполяция значения скорости резки стекла, экспериментально полученного при невысокой мощности лазерного излучения (сотни ватт), в диапазон мощностей в десятки киловатт.

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
ε_{ij}	Тензор деформации
δ_{ij}	Символ Кронекера
γ	Коэффициент линейного температурного расширения
λ, μ	Общепринятые обозначения коэффициентов Ляме в теории упругости

σ	Коэффициент теплопроводности
$\xi(x, y)$	Нормированное на единицу распределение интенсивности излучения в плоскости XY
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
c	Теплоемкость стекла
k	Показатель коэффициента поглощения излучения
P	Мощность лазерного излучения
q	Тепловыделение
S	Упругое напряжение
s_{ij}	Тензор упругих напряжений
T	Температура
T_0	Фоновая температура
\vec{U}	Вектор перемещения точки твердого тела в результате деформации
\vec{V}	Вектор скорости движения зоны облучения относительно поверхности стекла
<i>Индексы нижние</i>	
ij	Индексы тензоров деформаций и упругих напряжений
$crit$	Соответствует такому минимальному упругому напряжению, при котором возможно продвижение трещины
y	Соответствует напряжению вдоль оси Y
y_{max}	Соответствует максимальному на поверхности напряжению
<i>Аббревиатуры</i>	
ЛУТ	Лазерное управляемое термораскалывание

2. Теоретический анализ

2.1. Постановка задачи

Теоретические представления, связанные с поверхностным поглощением излучения в стекле, например, излучения CO₂-лазера [2], по большей части не применимы для резки, в частности, неодимовым или иттербиевым лазерами, поскольку в первом случае стекло непрозрачно, а во втором – почти полностью пропускает излучение. Математическое описание лазерного термораскалывания в условиях, когда размер движущегося пятна облучения соизмерим или меньше толщины листа, требует привлечения трехмерных моделей физических процессов.

Адекватно описать математически трехмерное распространение трещины практически невозможно, даже с помощью современных компьютеров. Однако вполне возможно описать поле напряжений, образующееся под действием различных механических нагрузок и тепловых полей. При анализе трещинообразования работает тот же принцип, который давно и широко применяется в механике разрушения: трещина распространяется в направлении области наибольшего растягивающего напряжения. В связи с этим в данной статье рассчитываются трехмерные температурные поля и на их основе распределение напряжений в рамках квазистатической теории термоупругости [28].

Уравнение теплопроводности записывалось в движущейся системе координат. Предполагалось, что начало координат движется вдоль поверхности стекла с вектором скорости движения зоны облучения относительно поверхности стекла. Тогда уравнение для температуры $T(x, y, z)$ можно представить в виде:

$$c \frac{dT}{dt} = \text{div}(\sigma \text{grad } T) - c\vec{V} \text{grad } T + q(x, y, z), \quad (1)$$

где c – теплоемкость стекла; σ – коэффициент теплопроводности; $q(x, y, z)$ – тепловыделение в стекле в результате поглощения лазерного излучения. Выражение для тепловыделения представлялось в виде:

$$q(x, y, z) = kPe^{-kz\xi(x, y)}, \quad (2)$$

где k – показатель коэффициента поглощения излучения в стекле; P – мощность лазерного излучения; $\xi(x, y)$ – нормированное на единицу распределение интенсивности излучения.

Для постановки задачи термоупругости в перемещениях использовалось следующее уравнение [28]:

$$\mu \nabla^2 \vec{U} + (\lambda + \mu) \text{grad } \text{div} \vec{U} - (3\lambda + 2\mu)\gamma \text{grad}(T) = 0, \quad (3)$$

где \vec{U} – вектор перемещения; μ и λ – коэффициенты Ляме; γ – коэффициент линейного теплового расширения. Компоненты тензора упругих деформаций ε_{ij} и напряжений s_{ij} рассчитывались через компоненты вектора перемещений \vec{U} по известным в теории упругости формулам [28]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{dU_i}{dx_j} + \frac{dU_j}{dx_i} \right), \quad (4)$$

$$s_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \left[\sum_{k=1}^3 \lambda\varepsilon_{kk} - \gamma(T - T_0) \right] \delta_{ij}, \quad (5)$$

где T_0 – фоновая температура; δ_{ij} – символ Кронекера.

Температурные зависимости тепловых и упругих параметров стекла рассматривались в диссертации [29], в которой было показано, что в диапазоне температур от 0 °C до температуры стеклования инженерные рас-



чѐты термоупругих напряжений можно проводить без учёта температурной зависимости параметров стекла.

Для численного решения уравнений (1, 3) применялась экономичная разностная схема переменных направлений [30].

3. Результаты расчетов и их обсуждение

Локальный нагрев листового стекла лазерным излучением индуцирует появление областей растягивающих и сжимающих напряжений в объеме и на поверхности стекла. С изменением мощности прямо пропорционально изменяются упругие напряжения, но пространственный профиль распределения напряжений остается неизменным (в рамках линейной теории термоупругости). Однако профиль распределения напряжений зависит от скорости движения пятна облучения по поверхности стекла. В данной работе интерес представляло изменение напряжений в зависимости от скорости движения лазерного луча облучения при одной и той же энергии облучения, приходящейся на единицу длины вдоль линии движения пятна облучения (погонная энергия).

Рассмотрим зависимость максимально достижимой скорости перемещения пятна облучения от мощности излучения на примере борского флотат-стекла толщиной 6 мм параллельным гауссовским пучком диаметром 6 мм (по уровню $1/e^2$ интенсивности). Необходимые для расчетов параметры стекла приведены в работе [29]. В той же работе приведены экспериментальные данные по достижимым скоростям перемещения пятна облучения при мощности излучения до 400 Вт.

Предположим, что луч лазера равномерно перемещается вдоль оси X в положительном направлении. В данном случае интерес в первую очередь вызывают растягивающие напряжения $S_y(x, y, z)$ (элемент тензора напряжений s_{yy}) вдоль оси Y (ось Z направлена по нормали к поверхности пластины). На рис. 1 показано установившееся во времени распределение температуры, а на рис. 2 – профиль упругого напряжения S_y при падении луча в точку с координатами $x = 60$ мм, $y = 40$ мм (в движущейся системе координат) при разных скоростях движения пятна облучения и одной и той же погонной энергии облучения $P/V = 400$ Дж/см.

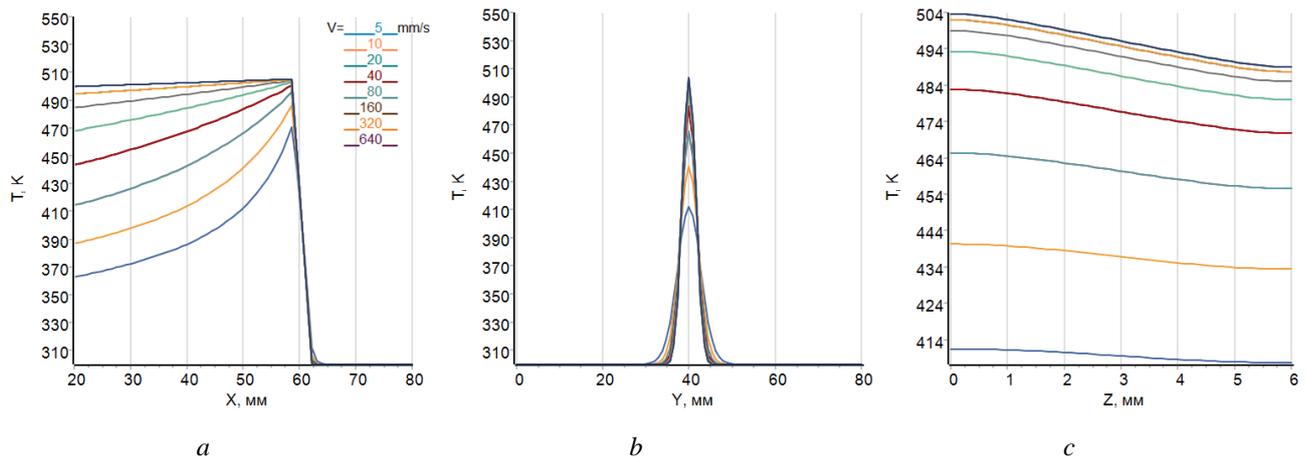


Рис. 1 – Профили температуры при разных скоростях движения пятна облучения
Fig. 1 – Temperature profiles at different speeds of the irradiation spots

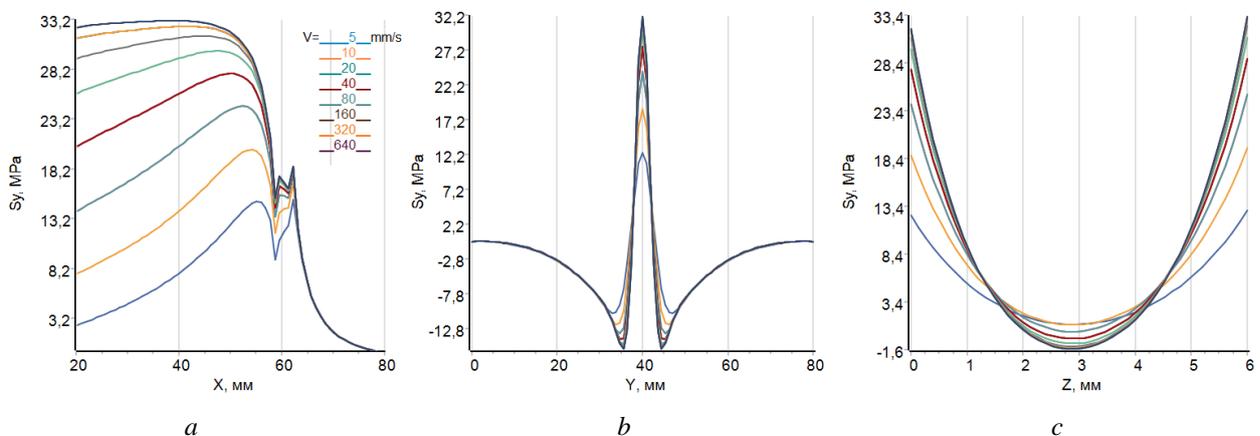


Рис. 2 – Профили упругих напряжений при разных скоростях движения пятна облучения
Fig. 2 – The profiles of elastic stresses at different velocities of the irradiation spot movement



На рис. 1а и 2а показано распределение температуры (T) и поперечных напряжений (S_y) на поверхности стекла вдоль оси X при $Y = 40$ мм; на рис. 1b и 2b – распределение температуры и поперечных напряжений вдоль оси Y при $X = 50$ мм; на рис. 1c и 2c – профили температуры и напряжения по толщине стекла при $X = 50$ мм и $Y = 40$ мм соответственно.

На приведенных графиках можно увидеть, что с возрастанием скорости распределение температуры и напряжений стремится к некоторым предельным профилям. Следовательно, при высоких скоростях пространственное распределение упругих напряжений в достаточно протяженной области вблизи пятна облучения перестает зависеть от скорости при фиксированной погонной энергии облучения P/V .

На основании рассчитанных и экспериментальных данных при заданной мощности излучения можно прогнозировать максимально достижимую скорость движения пятна облучения V_{max} , то есть такой критической скорости, выше которой трещина уже не распространяется. Будем полагать, что стационарное образование трещины возможно, если максимальное на поверхности напряжение S_{ymax} больше или равно значению некоторого критического напряжения S_{crit} , которое обеспечивает продвижение трещины. Можно ожидать, что максимально возможная скорость продвижения трещины достигается при условии $S_{ymax} = S_{crit}$.

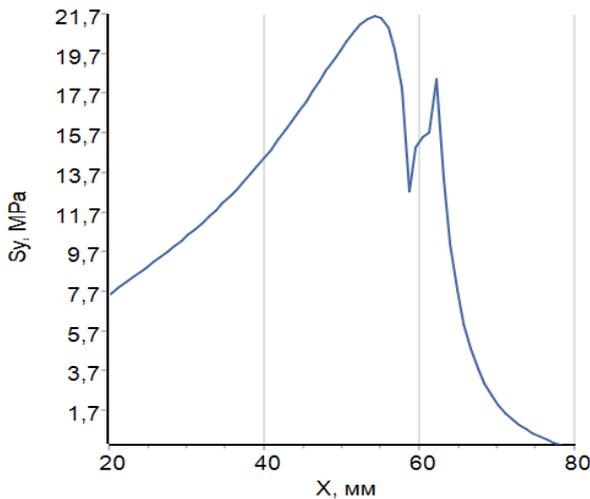


Рис. 3 – Профиль напряжения вдоль линии движения пятна облучения, соответствующий экспериментальным условиям
Fig. 3 – Voltage profile along the line of motion of the irradiation spot corresponding to the experimental conditions

Для того чтобы привязаться к конкретным скоростям, необходимо воспользоваться экспериментальными данными из работы [29], в которой приведены значения максимально достижимых скоростей резки стекла непрерывным излучением на длине волны 1,06 мкм при разной толщине стекла. В частности, при толщине стекла 6 мм, мощности

излучения 400 Вт и диаметре пятна облучения 6 мм максимальная скорость в эксперименте составляла 9 мм/с. На рис. 3 показано расчетное распределение напряжений (S_y) на поверхности стекла вдоль оси X на линии движения пятна облучения. В соответствии с графиком максимальное напряжение $S_{ymax} = 21,7$ МПа, и, как указывалось выше, оно равно критическому напряжению S_{crit} .

Зная значение критического напряжения, на основании расчетов можно определить максимально достижимую скорость распространения трещины в зависимости от мощности излучения. График этой зависимости показан на рис. 4, из которого следует, что при мощности облучения более 5 кВт имеет место почти линейная зависимость максимально достижимой скорости продвижения трещины от мощности излучения. При мощности излучения 20 кВт можно ожидать скорости резки на уровне 70 см/с.

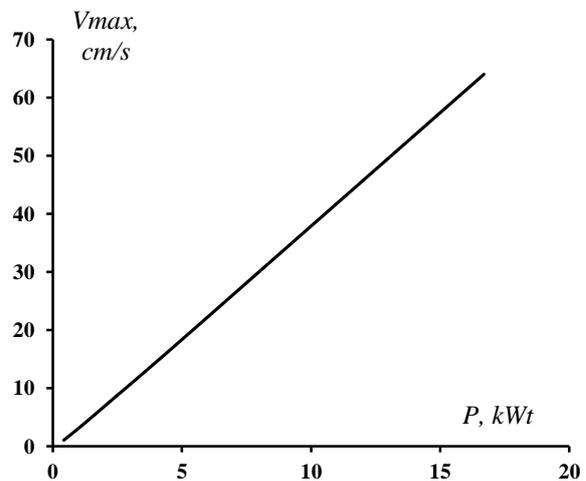


Рис. 4 – Максимально возможная скорость продвижения трещины в зависимости от мощности излучения
Fig. 4 – Maximum possible rate of crack propagation depending on the radiation power

Полученные результаты относятся к резке борского стекла, однако вывод о прямой пропорциональности максимально достижимой скорости продвижения трещины от мощности излучения справедлив и для других типов силикатных стекол, широко применяемых в строительной индустрии. Это связано прежде всего с тем, что упругие константы материала и коэффициенты линейного теплового расширения у разных стекол отличаются незначительно.

Различие в показателях поглощения излучения приводит только к изменению значения коэффициента пропорциональности между скоростью резки и мощностью излучения, поскольку, в соответствии с выражением (2), тепловыделение в стекле зависит не отдельно от коэффициента поглощения и мощности излучения, а от их произведения.

4. Заключение

Приведенные расчеты показали, что при большой мощности лазерного излучения можно достичь скоростей резки стекла на уровне 0,5 м/с и более. Такие высокие скорости лазерной резки стекол толщиной более 3 мм открывают возможности применения современных мощных лазеров в стекольной индустрии. При этом излучение мощностью в несколько десятков киловатт может доставляться в рабочую зону через гибкие световоды, наконечники которых фиксируются на фокусаторах или коллиматорах излучения. Последние легко закрепляются на каретке, способной перемещаться по направляющей балке, или на оконечном звене робота-манипулятора, тем самым снимаются многие проблемы, связанные с громоздкостью мощных лазеров.

В настоящее время уже существует возможность использования лазеров мощностью более 20 кВт для резки стекла. Коммерческие волоконные лазеры мощностью 50 кВт применяются для резки металлов и других материалов, предлагаются даже лазеры мощностью более 100 кВт (НТО «ИРЭ-ПОЛЮС»). Технология резки металлов более сложна, чем резки стекла методом ЛУТ, поскольку при резке металла образуется факел из испаряющихся материалов в зоне взаимодействия излучения с веществом и требуется удаление продуктов. С технической точки зрения, технологии транспортировки и фокусирования излучения на листе материала практически не отличаются, поэтому, по нашему мнению, принципиальных ограничений по применению мощных волоконных лазеров для резки стекла не существует.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых технологий по резке стекла на промышленных линиях по производству флоат-стекла для обрезки ленты стекла на отдельные листы. Кроме того, эти результаты могут быть полезны при разработке технологии раскроя листов стекла и резки 3D-стеклоизделий. Метод лазерного управляемого термораскалывания, в сравнении с другими лазерными методами резки стекла, является более эффективным и стабильным, а также имеет существенно более широкую область применения, так как позволяет в несколько раз увеличить толщину разделяемого стекла. В связи с этим ЛУТ перспективен для авиационной, автомобильной и строительной промышленности.

Список литературы

[1] Мачулка, Г.А. Лазерная обработка стекла / Г.А. Мачулка. – М.: Советское радио, 1979. – 135 с.
 [2] Григорьянц, А.Г. Лазерная обработка неметаллических материалов / А.Г. Григорьянц, А.А. Соловьев. – М.: Высшая школа, 1988. – 192 с.
 [3] Chui, G.K. Laser cutting of hot glass/ G.K. Chui // Amer. Ceram. Soc. Bull. – 1975. – Vol. 54. – No. 5. – P. 514–518.

[4] Lumley, R.M. Controlled separation of brittle materials used a laser / R.M. Lumley // J. of the Amer. Cer. Soc. – 1969. – Vol. 48. – No. 9. – P. 850.

[5] Higuchi, T. Application of laser to drilling and cutting / T. Higuchi, T. Miyazama, H. Yoshida // Mitsubishi Denki. – 1971. – Vol. 45. – No. 10. – P. 1298.

[6] Жималов, А.Б. Лазерная резка флоат-стекла в процессе его выработки / А.Б. Жималов [и др.] // Стекло и керамика. – 2006. – № 10. – С. 3–5.

[7] Солинов, В.Ф. Раскрой листового силикатного стекла методом термораскалывания / В.Ф. Солинов, В.С. Кондратенко, В.М. Брауде // Техника, экономика, информация. – 1982. – Сер. Техника. – Вып. 6–7. – С. 47.

[8] Hermanns, C. Laser cutting of glass / C. Hermanns // Proc. SPIE 4102. – 2000. – P. 219–226.

[9] Kang, H.S. A study of cutting glass by laser / H.S. Kang [et al.] // Proc. SPIE 4426. – 2002. – P. 367–370.

[10] Кондратенко, В.С. Лазерное управляемое термораскалывание хрупких материалов / В.С. Кондратенко. – М.: МГУПИ, 2007. – 191 с.

[11] Бучанов, В.В. Применение лазерной технологии для резки стеклоизделий / В.В. Бучанов [и др.] // Стекло и керамика. – 2014. – № 9. – С. 6–9.

[12] Buchanov, V.V. Light-induced glass cutting / V.V. Buchanov [et al.] // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2017. – Vol. 44. – No. 9. – P. 263–265.

[13] Белкин, А.М. Лазерная резка тугоплавких стекол лучом ОКГ / А.М. Белкин // Электронная техника. Сер. 3. Газоразрядные приборы. – 1969. – Вып. 4. – С. 37.

[14] Белкин, А.М. Обрезка кварцевых изделий лучом лазера / А.М. Белкин // Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. – 1977. – Вып. 5. – С. 103.

[15] Мачулка, Г.А. Резка стекла лазерным лучом / Г.А. Мачулка, В.М. Гурьянов, Л.П. Муратова // Стекло и керамика. – 1972. – № 10. – С. 10.

[16] Webster, J.M. Laser in the glass industry / J.M. Webster // Glass. – 1974. – Vol. 51. – No. 10. – P. 337.

[17] A Guide to the Laser / ed. D. Fishlock. – McDonald, London. – 1967. – 163 p.

[18] Бабенко, В.П. Газолазерная резка материалов / В.П. Бабенко // Квантовая электроника. – 1972. – № 5. – С. 3–21.

[19] Рыкалин, Н.Н. Лазерная обработка материалов / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, А.Н. Кокора. – М.: Машиностроение. – 1975. – 295 с.

[20] Реди, Д. Действие мощного лазерного излучения / Д. Реди. – М.: Мир. – 1974. – 468 с.

[21] Борода, В.И. Термораскалывание стеклянных трубок лазерным излучением / В.И. Борода, А.Ц. Вартаньянц, Н.Н. Карпов // Электронная промышленность. – 1976. – № 1. – С. 59–63.

[22] Большов, В.Ф. Лазерная технологическая установка для резки профильного стекла / В.Ф. Большов [и др.] // Квантовая электроника. – 1971. – № 6. – С. 84.



[23] Парфенов, Б.А. Лазерная установка «Квант-20» для резки стекла / Б.А.Парфенов [и др.] // Электронная техника. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1979. – Вып. 1(7). – С. 11.

[24] Белоусов, Е.К. Управляемое термораскалывание стекла с помощью лазерного излучения/ Е.К. Белоусов [и др.] // Электронная промышленность. – 1978. – № 9. – С. 65.

[25] Higuchi, T. Application of laser to drilling and cutting. Mitsubishi Denki / T. Higuchi, T. Miyazama, H. Joshida // Mitsubishi Denki. – 1971. – Vol. 45. – No. 10. – P. 1298.

[26] Солинов, В.Ф. Раскрой листового силикатного стекла методом термораскалывания / В.Ф. Солинов, В.С. Кондратенко, В.М. Брауде // Техника, экономика, информация. Сер. Техника. – 1982. – Вып. 6–7. – С. 47.

[27] Кондратенко, В.С. Исследование и разработка процесса резки стекла методом лазерного управляемого термораскалывания: Автореф. канд. дис. тех. наук. – М., 1983. – 26 с.

[28] Коваленко, А.Д. Основы термоупругости / А.Д. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1970. – 306 с.

[29] Малов, И.Е. Разработка технологии управляемого термораскалывания листового стекла излучением твердотельного лазера: Дис. канд. тех. наук. – М., 2000.

[30] Самарский, А.А. Экономичные разностные схемы для гиперболической системы уравнений со смешанными производными и их применение для уравнений теории упругости / А.А. Самарский // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1965. – Т. 5. – № 1. – С. 34.

References

[1] Machulka G.A. Laser glass processing (Lazernaya obrabotka stekla). Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1979; 135 p. (in Russ.).

[2] Grigor'yants A.G., Sokolov A.A. Laser treatment of non-metallic materials (Lazernaya obrabotka nemetallicheskih materialov). Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1988; 192 p. (in Russ.).

[3] Chul G.K. Laser cutting of hot glass. *Amer. Ceram. Soc. Bull.*, 1975; 54(5):514–518.

[4] Lumley R.M. Controlled separation of brittle materials used a laser. *J. of the Amer. Cer. Soc.*, 1969; 48(9):850.

[5] Higuchi T., Miyazama T., Joshida H. Application of laser to drilling and cutting. *Mitsubishi Denki*, 1971; 45(10):1298.

[6] Zhimalov A.B., Solinov V.F., Kondratenko V.S., Kaplina T.V. Laser cutting of float glass during production. *Glass and ceramics*, 2006; 63(9–10):319–321.

[7] Solinov V.F., Kondratenko V.S., Braude V.M. Cutting of silicate sheet glass by thermal cracking (Raskroi listovogo silikatnogo stekla metodom termoraskalyvaniya). *Tekhnika, ekonomika, informatsiya. Ser. Tekhnika*, 1982; (6–7):47 (in Russ.).

[8] Hermanns C. Laser cutting of glass. *Proc. SPIE*, 2000; 4102:(219–226).

[9] Kang H.S. Hong S.K., Oh S.C., Choi J.Y., and Song M.G. A study of cutting glass by laser. *Proc. SPIE*, 2002; 4426:367–370.

[10] Kondratenko V.S. Laser driven thermal cracking of brittle materials (Lazernoe upravlyаемое termoraskalyvanie khрупkikh materialov). Moscow: MGUPI Publ., 2007, 191 p. (in Russ.).

[11] Solinov E.F., Solinov V.F., Buchanov V.V., Kustov M.E., Murav'ev E.N., Revenko V.I. Application of laser technology for cutting glass articles. *Glass and Ceramics*, 2015; 71(9–10):306–308.

[12] Buchanov V.V., Murav'ev E.N., Revenko V.I., Kazaryan M.A. Light-induced glass cutting. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2017; 44(9):263–265.

[13] Belkin A.M. Laser cutting refractory glasses by a laser beam (Lazernaya rezka tugoplavkikh stekol luchom OKG). *Elektronnaya tekhnika. Ser. 3. Gazorazryadnye pribory*, 1969; 4:37 (in Russ.).

[14] Belkin A.M. Pruning of quartz articles by a laser beam (Obrezka kvartsevykh izdelii luchom lazera). *Elektronnaya tekhnika. Ser. 4. Elektrovakuumnye i gazorazryadnye pribory*, 1977; 5:103 (in Russ.).

[15] Machulka G.A., Gur'yanov V.M., Muratova L.P. Glass cutting with laser beam (Rezka stekla lazernym luchom). *Steklo i keramika*, 1972; 10:10 (in Russ.).

[16] Webster J.M. Laser in the glass industry. *Glass*, 1974; 51(10):337.

[17] A Guide to the Laser, ed. D. Fishlock. McDonald, London, 1967; 163 p.

[18] Babenko V.P. Gas-Jet laser cutting (review). *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1973; 2(5):399.

[19] Rykalin N.N., Uglov A.A., Kokora A.N. Laser processing of materials (Lazernaya obrabotka materialov). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1975; 295 p. (in Russ.).

[20] Redi D. The action of high-power laser radiation (Deistvie moshchnogo lazernogo izlucheniya). Moscow: Mir Publ., 1974; 468 p. (in Russ.).

[21] Boroda V.I., Vartan'yants A.Ts., Karpov H.H. Thermal splitting of glass tubes with laser radiation (Termoraskalyvanie steklyannykh trubok lazernym izlucheniem). *Elektronnaya promyshlennost*, 1976; 1:59–63 (in Russ.).

[22] Bol'shov V.F., Gur'yanov V.M., Machulka G.A., Muratova L.P. Laser unit for cutting a glass beam. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1972; 1(6):625.

[23] Parfenov B.A., Vydrina V.S., Zakharov V.G. et al. "Kvant-20" laser cutting machine for glass cutting (Lazernaya ustanovka "Kvant-20" dlya rezki stekla). *Elektronnaya tekhnika. Ser. 11. Lazernaya tekhnika i optoelektronika*, 1979; 1(7):11 (in Russ.).

[24] Belousov E.K., Kondratenko V.S., Machulka G.A., Chuiko V.V. Controllable thermal splitting of glass by means of laser radiation (Upravlyаемое termoraskalyvanie stekla s pomoshch'yu lazernogo izlucheniya). *Elektronnaya promyshlennost*, 1978; 9:65 (in Russ.).



[25] Higuchi T., Miyazama T., Joshida H. Application of laser to drilling and cutting. *Mitsubishi Denki*, 1971;45(10):1298.

[26] Solinov V.F., Kondratenko V.S., Braude V.M. Cutting of silicate sheet glass by thermal cracking (Raskroi listovogo silikatnogo stekla metodom termoraskalyvaniya). *Tekhnika, ekonomika, informatsiya. Ser. Tekhnika*, 1982;(6-7):47 (in Russ.).

[27] Kondratenko V.S. Research and development of the process of cutting glass by the method of laser controlled thermal splitting (Issledovanie i razrabotka protsessa rezki stekla metodom lazernogo upravlyaemogo termoraskalyvaniya: Avtoref. kand. dis. tekhnauk). Moscow, 1983 (in Russ.).

[28] Kovalenko A.D. Basics of thermoelasticity (Osnovy termouprugosti). Kiev: Naukova dumka Publ., 1970, 306 p. (in Russ.).

[29] Malov I.E. Development of the technology of controllable thermal splitting of sheet glass by solid-state laser radiation: Ph.D. thesis (Razrabotka tekhnologii upravlyaemogo termoraskalyvniya listovogo stekla izlucheniem tverdotel'nogo lazera: Dis. kand. tekhnauk). Moscow, 2000 (in Russ.).

[30] Samarskii A.A. Economical difference schemes for a hyperbolic system of equations with mixed derivatives and their application to the equations of the theory of elasticity (Ekonomichnye raznostnye skhemy dlya giperbolicheskoi sistemy uravnenii so smeshannymi proizvodnymi i ikh primenenie dlya uravnenii teorii uprugosti). *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki*, 1965;5(1):34 (in Russ.).



The 2018 OSA Laser Congress

Boston, Massachusetts, USA

4–8 November 2018

The 2018 OSA Laser Congress will offer a comprehensive view of the latest technological advances in solid state lasers as well as the applications of laser technologies for industrial products and markets.

The conference will feature an extensive exhibition comprised of a global audience of laser leaders and a comprehensive, peer-reviewed technical program.

Market-focused sessions and presentations describe needed technological and engineering advances required to translate these laser technologies into commercial products.

The Congress is comprised of two topical meetings.

Advanced Solid State Lasers Conference (ASSL) highlights new sources, advanced technologies, components and system design to improve the operation and application of solid state lasers. The meeting focuses on materials and sources.

Laser Applications Conference (LAC) focuses on materials processing and applications for high power lasers.

The 2018 program will include sessions on:

- Additive Manufacturing
- Brittle Materials
- Directed Energy Defense
- Extreme UV, X-Ray Generation and Particle Acceleration
- Lasers Applications for Mobility
- Lasers in Space Applications
- Laser Induced Damage Threshold of Optical Coatings for Applications with High Intensity Lasers
- Laser Shock Peening
- Laser-Based Additive Manufacturing
- Microelectronics
- 16Kw+ Laser Materials Processing
- Surface Modulation and Preparation

<https://assl.osa.org/home/about-assl/>