1566784

На правах рукописи

УДК 621.9.048.7

МАЛОВ Илья Евгеньевич

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА ИЗЛУЧЕНИЕМ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА

Специальность 05.03.07 – Оборудование и технология лазерной обработки

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Малов

Москва – 2000

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, Шиганов И.Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Киселёв С.Н.,
кандидат технических наук Марущенко В.В.

Ведущее предприятие: Гос. унитарное предприятие ОКБ „Гранат".

Защита диссертации состоится 22 июня 2000 г. на заседании диссертационного Совета К 053.15.03 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, г. Москва, Б-5, 2-я Бауманская ул., д. 5.

[illegible] одном экземпляре, заверенный [illegible] адресу.

[illegible] в библиотеке МГТУ им. Н.Э.

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1566784
Малов И.Е. Разработка техн

1566784

Гирш В.И.

[illegible]л. Заказ № 84 Тираж 100 экз.
[illegible]Э. Баумана.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Устоявшиеся в современной промышленности методы обработки стекла давно известны и находят широкое применение, однако по сей день, оптимальная резка стекла остаётся крайне сложной задачей. Причиной этого является большое разнообразие форм и размеров вырезаемых заготовок, а также наличие на исходном материале распределённых по всей площади разнообразных дефектов, местоположение которых невозможно предугадать заранее. Вследствие этого получается большой процент бракованной продукции, а также возникают проблемы с автоматизацией процесса резки. Кроме того, края получаемых деталей содержат множество царапин, микротрещин, задиров и т.п., приводящих к снижению прочности изделий до значений, которые на два-три порядка меньше предполагаемого порога предельной прочности. Особенно актуальна эта проблема в случае, когда предъявляются повышенные требования к качеству обработки.

В 70-е годы был предложен способ раскроя стекла методом управляемого термораскалывания (УТР) с использованием CO_2-лазера. Этот способ обеспечивает удовлетворительную точность и высокое качество разделения. Однако из-за низкой производительности и ограничений по толщине разделяемого стекла (до 8 мм) он не получил широкого распространения.

Появление в последние годы современных высокомощных твердотельных лазеров ($\lambda = 1{,}06$ мкм), более дешёвых и простых в эксплуатации по сравнению с газовыми, сделало актуальным проведение систематических исследований и разработку метода УТР с использованием АИГ:Nd–лазера. Данный метод, в сравнении с упомянутым выше, является более эффективным и стабильным, а также имеет существенно более широкую область применения, т.к. позволяет в 3÷4 раза увеличить толщину разделяемого стекла. Он является перспективным для использования в электронике, авиа-

МГТУ
им. Н.Э. Баумана

ционной, автомобильной и судостроительной промышленности.

Цель настоящей работы заключается в определении механизма зарождения и развития трещины при УТР стеклянной пластины лучом АИГ:Nd-лазера и в последующей разработке технологии разделки листового стекла с помощью данного метода.

Задачи исследования:

определение термодеформационного состояния стеклянной пластины, подвергаемой воздействию непрерывного лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм;

определение силовых полей, возникающих в стеклянной пластине при её нагреве лазерным излучением (λ = 1,06 мкм) на различных стадиях процесса термораскалывания, начиная с момента попадания лазерного луча на поверхность стеклянной пластины и заканчивая выходом луча за её пределы;

выбор критерия разрушения материала;

решение задачи теории разрушения с последующим анализом (на основе критерия разрушения) поведения трещины на стадии зарождения, стабильного роста и выхода на край пластины.

разработка оптимальных приёмов термораскалывания листового стекла на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Методы исследования базируются на основных теоремах теории теплопроводности, классической теории упругости и теории разрушения. При расчёте полей перераспределения напряжений в вершине трещины, следующей за лазерным лучом, применялось численное интегрирование методом Симпсона. Расчёты проводились при помощи ПК на базе процессора Pentium-200 с использованием математической системы MathCAD и программ, составленных на языке Borland Pascal 7.0. Практические исследования велись на экспериментальном стенде, созданном на базе опытного образца

АИГ:Nd-лазера мощностью 400 Вт. Оценка величины отклонения трещины от заданной траектории, а также контроль за наличием дефектов в обрабатываемом стекле осуществлялись с помощью микроскопов МБС-2 и МБИ-1.

Научную новизну и ценность составляет:

— расчётным путём установлен механизм УТР флоат-стекла излучением АИГ:Nd-лазера, заключающийся в следующем Лазерный луч обеспечивает локальный нагрев стеклянной пластины сразу по всей её толщине, приводящий к возникновению вне области нагрева растягивающих поперечных напряжений, под действием которых происходит зарождение и развитие разделяющей трещины;

— на основе силового критерия разрушения установлено, что по мере приближения трещины к лазерному лучу, уровень растягивающих напряжений в её вершине снижается до значений, не превышающих порог хрупкой прочности стекла, что обуславливает контролируемое развитие трещины и позволяет изменять её направление;

— установлено, что при подходе лазерного луча к границе пластины, перед ним возникает область повышенных сжимающих напряжений, в результате чего наблюдается устойчивое отклонение трещины от заданного направления, что существенно снижает точность процесса УТР. Уменьшение мощности лазерного луча на этом этапе процесса термораскалывания позволяет устранить данное явление.

Практическая ценность и реализация результатов работы:

— использование при УТР лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм позволило в 3÷4 раза увеличить толщину разделяемого стекла в сравнении с методом, использующим CO_2-лазер;

— на основе проведённых исследований получены эмпирические

зависимости скорости перемещения лазерного луча от мощности излучения, наименьшего размера образца и толщины образца;

использование разработанных приемов управления трещиной на различных этапах процесса термораскалывания позволило получать детали с отклонением кромок от прямолинейности не более ±0,5 мм;

разработанную технологию УТР планируется практически использовать на предприятии АО „Галактика".

Апробация работы. Основные разделы работы доложены:

на X Международной конференции „Лазеры в науке, технике и медицине" (20-24.09.1999);

на научных семинарах кафедры „Лазерные технологии в машиностроении" МГТУ им. Н.Э. Баумана (1999 и 2000г.г.).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована научная и практическая актуальность работы, её цель, научная новизна, указаны методы, с помощью которых проводились исследования, практическая ценность от реализации работы.

В первой главе рассмотрены основные свойства силикатных стёкол, методы их обработки и применение. Анализ механических свойств показал, что прочность и долговечность стеклоизделий главным образом зависят от состояния их поверхности. В случае появления поверхностных дефектов (царапин, сколов, микротрещин и т д.), прочностные характеристики стекла снижаются на 2÷3 порядка. Также наличие дефектов затрудняет разделку листового стекла, снижая точность получаемых деталей и повышая процент брака. Особенно заметно это проявляется при разделке стекла такими методами, как скрайбирование и термораскалывание. При рассмотрении существующих дефектов листового стекла и требова-

ний качества, ограничивающих содержание этих дефектов выяснилось, что наиболее предпочтительными (с точки зрения минимального количества механических повреждений поверхности) для разделения методом термораскалывания являются флоат-стёкла.

Свойства стёкол и их дефектов изложены в работах Н.М Павлушкина, В.П. Пуха, Г.М. Бартенева, М.В. Стрельциной, Р.З. Фридкина, Г. Либовица, О.В. Мазурина, Ю.А. Бродского, Г.А. Мачулки и др.

Методы разделки стекла рассмотрены в работах Г.А. Мачулки, А.Н. Лапина, Е.К. Белоусова, В.М. Гурьянова, В.Е. Махевича, В.С. Кондратенко, В.И. Бороды, В.Ф. Жиркова, О.А. Краевского, Б.А. Порфёнова, И.А. Орлова, В.С. Чадина и др.

Исходя из рассмотренных свойств стекла и условий современного производства, к методам разделки данного материала предъявляются следующие требования: точное и быстрое разделение, минимальное количество дефектов на поверхности раздела, минимальное количество отходов, гибкость в условиях большой номенклатуры выпускаемых изделий, возможность автоматизации процесса, безопасность с точки зрения экологии, низкая себестоимость выпускаемых изделий. Анализ существующих методов разделки листового стекла показал, что традиционные методы (резка пилами, скрайбирование), не обеспечивают должного качества поверхностей разделения, и требуют дополнительной обработки (шлифовки и полировки), которая, в свою очередь, также не гарантирует устранения всех краевых дефектов. Среди лазерных методов разделки стекла наиболее приемлемым, с точки зрения предъявляемых требований, оказался метод управляемого термораскалывания (УТР), поскольку он не требует использования высокомощных лазеров, как метод лазерной резки, и в то же время обеспечивает получение деталей с бездефектными краями в отличие от метода лазерного скрайбирования. Метод УТР является менее произво-

дительным по сравнению с механическим скрайбированием, однако при рассмотрении всего технологического процесса получения стеклоизделия, может оказаться не менее эффективным за счёт исключения операций шлифовки и полировки и уменьшения количества отходов. Кроме того, данный метод имеет следующий ряд преимуществ: позволяет получать детали с уникальными механическими свойствами по границам разделения, гибкость в условиях большой номенклатуры выпускаемых изделий, возможность полной автоматизации процесса, отсутствие механического воздействия на материал и его загрязнения продуктами разделения, более экономичное использование стекла и уменьшение отходов, разделение сразу по всей толщине листа, высокая экологичность.

Термораскалывание стекла может осуществляться с помощью как CO_2-лазера, так и АИГ:Nd-лазера. Метод УТР с использованием CO_2-лазера имеет ряд принципиальных ограничений по толщине разделяемого стекла и скорости его разделения, обусловленных свойствами стекла. Причём, с увеличением толщины скорость разделения стремительно падает. Менее известный метод УТР с использованием АИГ:Nd-лазера лишён подобных ограничений. В связи с этим, он может быть весьма перспективным для раскроя толстого стекла. Необходимо также отметить, что АИГ:Nd-лазер является более дешёвым и простым в эксплуатации по сравнению с газовым.

При анализе литературы не удалось обнаружить информации о каких-либо систематических исследованиях метода УТР с использованием твердотельного лазера. Возможно, это связано с тем, что мощные АИГ:Nd-лазеры появились сравнительно недавно. Их появление сделало актуальным проведение систематических исследований и разработку технологии разделки листового стекла с использованием данного метода.

Вторая глава содержит описание экспериментальных и расчёт-

ных методик исследования, использованных при выполнении данной работы. Основу опытных исследований составили эксперименты, направленные на определение зависимости процесса УТР от технологических параметров (скорость и мощность лазерного луча, диаметр пятна нагрева и положение плоскости перетяжки). А также эксперименты по апробации методов, позволяющих повысить точность и эффективность обработки, таких как: использование отражающей подложки, применение поддува воздуха, снижение (по определённому закону) мощности излучения на завершающем этапе развития трещины. Для проведения этих исследований был создан экспериментальный стенд, на базе опытного образца АИГ:Nd-лазера максимальной мощностью 400 Вт. Перемещение стеклянной пластины относительно лазерного луча осуществлялось с помощью двухкоординатного стола, оснащённого двумя шаговыми двигателями, управляемыми блоком ЧПУ. Скорость перемещения данного стола по координатам лежала в пределах 50÷1000 мм/мин.

Контроль за отклонением трещины осуществлялся с помощью стереоскопического микроскопа МБС-2 при увеличении в 88 раз.

Для проведения расчётов, связанных с нагревом Борского стекла при помощи АИГ:Nd-лазера, расчётно-опытным путём были найдены коэффициент отражения R и линейный коэффициент поглощения ν этого стекла на длине волны 1,06 мкм. Для этого луч АИГ:Nd-лазера пропускался сквозь пластины Борского стекла различной толщины (δ_1 = 1,4 и δ_2 = 6,7 мм), после чего с помощью ИМО-2Н измерялась его мощность. На основе полученных данных были найдены значения R и ν по следующим формулам:

$$\nu = \frac{1}{\delta_2 - \delta_1} \cdot \ln\left(\frac{i_1}{i_2}\right), \quad R = 1 - \sqrt{\frac{i_1 \cdot e^{\nu \cdot \delta_1}}{i_0}}. \qquad (1)$$

Их значения составили $R = 4{,}30 \pm 0{,}67\%$ и $\nu = 32{,}62 \pm 2{,}75$ м$^{-1}$.

Опытные исследования позволили проверить теоретически обос-

нованный механизм зарождения и распространения трещины при УТР стеклянной пластины, а также выявить закономерности поведения трещины в пластине конечных размеров и разработать эффективную технологию УТР.

Математические методы, использованные в теоретических исследованиях, рассмотрены в работах А.А. Самарского, А.В. Гулина, М.Я. Выгодского и др. Одним из них является метод численного интегрирования по формуле Симпсона. С помощью него рассчитывались поперечные растягивающие напряжения σ_{yy}, действующие в вершине трещины.

Третья глава посвящена исследованию механизма образования и развития трещины в объёме стеклянной пластины при воздействии на неё излучением твердотельного лазера.

С целью математического описания термонапряжённого состояния, возникающего в нагретой пластине, лазерный луч был представлен в виде линейного источника нагрева.

Вначале было исследовано термонапряжённое состояние стеклянной пластины без трещин, нагреваемой линейным источником тепла. При определении напряжений, создаваемых лазерным лучом вблизи от края пластины, использовался метод зеркального источника тепла. В результате были получены математические уравнения, описывающие это термонапряжённое состояние. Данные уравнения являются решением задачи классической теории упругости. Методы решения подобных задач описываются в работах С.П. Тимошенко, Л.Д. Ландау, Г. Либовица, Г. Паркуса, Е.М. Лифшица, Ю.М. Коляно, В.Г. Карнаухова и др.

С помощью полученных уравнений было установлено, что при локальном нагреве лазерным лучом в стеклянной пластине возникают продольные σ_{xx} и поперечные σ_{yy} термонапряжения, причём, в области нагрева σ_{yy} являются сжимающими, а вне её – растягивающими (см. рис.1). Посредством именно поперечных напряжений

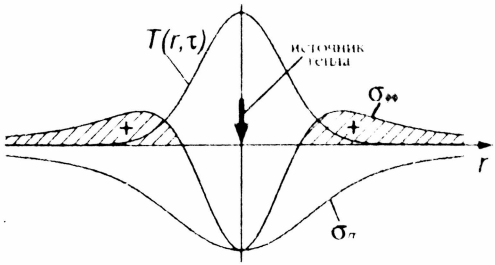


рис.1. Схема распределения температуры и напряжений в пластине, нагреваемой неподвижным лазерным лучом.

и осуществляется процесс управляемого термораскалывания. При воздействии на стекло неподвижным лучом постоянной мощности с течением времени происходит расширение зоны действия как сжимающих, так и растягивающих напряжений, при этом, в случае квазистационарного нагрева, их максимальные значения остаются постоянными и определяются мощностью лазерного излучения.

После определения термонапряжённого состояния стеклянной пластины были проведены исследования процесса зарождения и распространения трещины. При этом решалась задача теории разрушения. Методы решения подобных задач рассмотрены в работах В.В. Панасюка, А.М. Махутова, Г. Либовица, М.П. Саврука, А.П. Дацышина, В.С. Зарубина и др.

С использованием метода $\delta_к$ – модели, определялось напряжённое состояние в вершине трещины, находящейся в поле действия поперечных растягивающих напряжений σ_{yy} лазерного луча, и оценивался их уровень, приводящий к распространению трещины. В качестве критерия разрушения был выбран критический уровень растягивающих напряжений в вершине трещины, при сколь угодно малом превышении которого происходит её распространение:

$$\lim_{x^*\to 0}\left[\sqrt{x^*}\cdot\sigma\left(x^*, q_{кр}\right)\right]=\frac{K}{\pi}, \qquad (2)$$

где $\sigma(x^*, q_{кр})$ – поперечные растягивающие напряжения в окрестности вершины трещины [Па], вычисленные на основе классической теории упругости при нагрузке, не превышающей критическую

($q_{кр}$), x^* – расстояние от вершины трещины до точек, лежащих в её плоскости [м], $K=\sqrt{\pi \cdot E \cdot S}$ – модуль сцепления, E – модуль Юнга [Па], S – поверхностная энергия разрушения [Дж/м^2].

С помощью критерия (2) было исследовано поведение трещины на стадиях зарождения, стабильного роста и завершения (при выходе луча на край пластины), а также установлено влияние технологических параметров на процесс термораскалывания.

Эти исследования показали, что при мощности лазерного луча 400 Вт трещина в стекле может возникнуть только при наличии в нём дефекта, размер которого j превышает критический. Этот размер для начального дефекта, расположенного на краю пластины в несколько раз меньше, чем в глубине. В случае пластины из Борского стекла j краевого дефекта можно определить по следующей эмпирической формуле:

$$j = 1300 \cdot \left[\frac{\delta}{P \cdot 0{,}957 \cdot (1 - \exp(-32{,}6 \cdot \delta)) \cdot (1 + 0{,}824 \cdot \exp(-32{,}6 \cdot \delta))} \right]^2, \qquad (3)$$

где δ – толщина пластины [м], P – мощность лазерного луча [Вт]. Если дефект расположен в стороне от заданной линии разделения, то критический размер увеличивается. Зависимость j от расстояния n до линии разделения (рис.2) является своего рода границей, которой достигают дефекты, позволяющие зародить трещину. Из трёх вариантов дефектов, показанных на

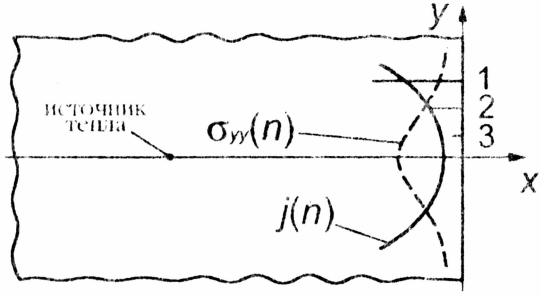


рис.2. Схема возможного расположения начального краевого дефекта.

1 – размер дефекта больше критического,

2 – дефект критического размера,

3 – размер дефекта меньше критического.

этом рисунке, трещина будет зарождаться на первых двух.

Чтобы проанализировать поведение трещины на стадии стабильного роста, была решена задача теории разрушения для случая, когда трещина находится в поле поперечных напряжений σ_{yy}, создаваемых движущимся лазерным лучом (рис.3 кривая 1). Полученные результаты показали, что управляемое развитие трещины происходит благодаря балансу сил, стимулирующих это развитие („давление", раздвигающее берега трещины) и сил, сдерживающих его (силы сжатия, действующие в области вершины трещины) (рис.3 кривая 2).

На завершающем этапе термораскалывания, когда лазерный луч приближается к краю пластины, происходит существенное увеличение „давления" на берега трещины за счёт наличия свободной поверхности, от которой происходит отражение тепловой энергии, что приводит к дополнительному нагреву материала. Это приводит к более активному росту трещины и приближению её вершины к источнику нагрева. В определённый момент давление, может увеличиться до уровня, при котором трещина обгонит источник и скачком выйдет на край пластины. В зависимости от скорости и мощности лазерного луча, а также размеров пластины, на её границе может возникнуть область повышенных сжимающих напряжений, что приведёт к отклонению трещины от заданной траектории после обгона ею лазерного луча.

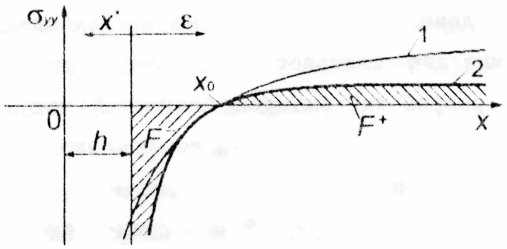


Рис.3. Напряжения в пластине, позади движущегося лазерного луча.

Таким образом, проведённые в данной главе исследования позволяют понять суть процесса термораскалывания излучением АИГ:Nd–лазера, и дают объяснение следующим явлениям: искривле-

ние трещины при её зарождении на краю стеклянной пластины, невозможность зарождения трещины на бездефектном крае пластины, управляемое развитие трещины, отставание трещины от лазерного луча на стадии стабильного роста, остановка трещины, появление неуправляемой трещины на стадии стабильного роста, обгон трещиной лазерного луча при приближении его к краю пластины и искривление трещины при её выходе на край пластины на заключительном этапе процесса термораскалывания.

Четвёртая глава посвящена разработке технологии управляемого термораскалывания листового стекла излучением твердотельного лазера.

В данной главе были проведены экспериментальные исследования, направленные на оптимизацию технологических параметров процесса термораскалывания, разработку методов повышения точности получаемых деталей и создание на их основе технологии УТР, обеспечивающей максимально эффективный раскрой стекла.

В результате проведённых экспериментов было установлено, что использование отражающей подложки из дюралюминиевого сплава Д16Т с чистотой поверхности не ниже $R_a = 0,32$ мкм позволяет примерно в 2 раза повысить скорость разделения стекла, в то время как стальная подложка не пригодна для этих целей, поскольку при нагреве происходит интенсивное окисление её поверхности. При максимальной мощности лазерного излучения (400 Вт) и диаметре пятна нагрева 2,7÷3 мм была получена наибольшая точность и скорость разделения.

Опыты по зарождению трещины подтвердили результаты расчётов, проведённых в третьей главе, показав невозможность зарождения трещины на бездефектном крае пластины, нагреваемой лучом мощностью 400 Вт. В связи с этим был разработан метод, обеспечивающий 100%-ную зарождаемость трещины и позволяющий предотвратить её искривление на начальном этапе процесса термораска-

лывания, суть которого заключается в предварительном создании искусственного дефекта необходимого размера на краю пластины в том месте, откуда предполагается начинать процесс разделения. Предложен способ нанесения краевого дефекта размером 200÷300 мкм путём вжигания частиц подложки в стекло лазерным импульсом длительностью 0,4÷1,5 мс с энергией 2 Дж.

При проведении экспериментов по термораскалыванию пластин на части различной ширины были обнаружены некоторые особенности поведения трещины, заключающиеся в её отклонении от заданной траектории в сторону более узкой части. Установлено, что величина этого отклонения Δ_m имеет минимальные значения, в случае разделения образца пополам (Δ_m = 0,2÷0,4 мм) и при отделении квадрата, сторона которого меньше ширины остальной части ($\Delta_m \approx 0$) (см. рис.4).

Для устранения этого явления был разработан специальный метод, заключающийся в охлаждении более узкой из разделяемых частей вертикальным потоком воздуха с отставанием от луча на 20÷40 мм и смещением от линии разделения на 5÷20 мм. Воздух подаётся через сопло диаметром 2 мм под давлением 0,7÷0,8 атм.

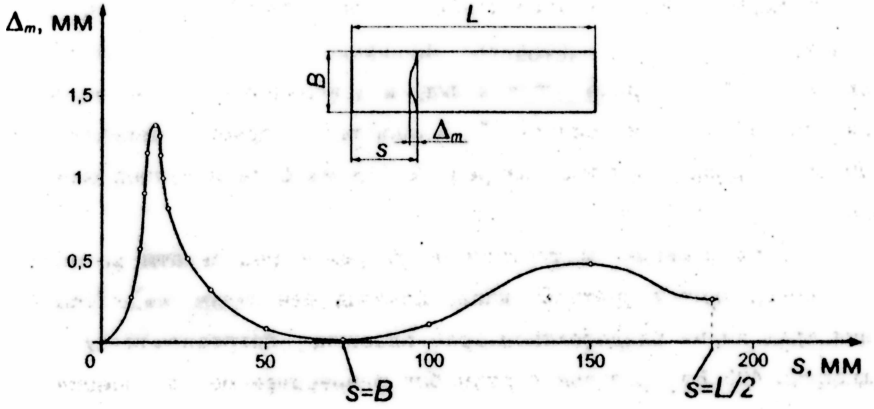


Рис.4. Зависимость величины отклонения Δ_m от ширины отделяемой части S.

Данный метод позволяет осуществлять более эффективное управление трещиной и снижает Δ_m до значений, не превышающих ±0,5 мм.

Основываясь на данных, полученных в третьей главе, был разработан способ, позволяющий уменьшить отклонение трещины при выходе её на край пластины, заключающийся в снижении мощности лазерного луча на завершающем этапе процесса УТР путём его перекрытия клиновидной диафрагмой. Для случая разделения пластин размером 230×230 мм со скоростью 600 мм/мин лучом мощностью 400 Вт, диаметр которого в плоскости диафрагмы составлял 5 мм, найдены оптимальные размеры диафрагмы: расстояние от вершины до границы пластины $c = 5$ мм и угол раскрытия $\beta = 15°$. Обработка 12-ти образцов показала, что у семи из них искривление полностью отсутствует, а у пяти остальных - не превышает 0,3 мм.

Также в данной главе были проведены эксперименты, раскрывающие возможности метода УТР для его разностороннего применения, такие как: раскалывание образца по криволинейной траектории, разделение толстого стекла и пакетов стеклянных пластин.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Расчётным путём установлен механизм управляемого термораскалывания (УТР) листового силикатного стекла излучением АИГ:Nd-лазера, связанный с созданием в стеклянном листе термонапряжённого состояния, при котором происходит зарождение и контролируемое развитие трещины, разделяющей его по заданному контуру.

2. Установлено, что при нагреве стеклянной пластины лучом АИГ:Nd–лазера по всей её толщине возникают продольные σ_{xx} и поперечные σ_{yy} термонапряжения, причём в области нагрева σ_{yy} являются сжимающими, а вне её – растягивающими. Посредством именно поперечных напряжений и осуществляется процесс УТР.

3. Показано, что при воздействии лучом постоянной мощности

происходит расширение зоны действия как сжимающих, так и растягивающих напряжений, при этом их максимальные значения остаются постоянными.

4. Установлено, что зарождение разделяющей трещины происходит на краевом дефекте стеклянной пластины, который находится в поле действия поперечных растягивающих термонапряжений в тот момент, когда растягивающие напряжения в его вершине превысят критическое значение.

5. Показано, что развитие трещины происходит по линии максимальных поперечных растягивающих напряжений σ_{yy}, создаваемых движущимся лазерным лучом, в случае, когда уровень растягивающих напряжений в её вершине превышает критическое значение. При этом, приближаясь к лазерному лучу трещина попадает в область сжимающих σ_{yy}, что приводит к снижению напряжений в её вершине и не позволяет ей обогнать лазерный луч. Таким образом, осуществляется управляемое развитие трещины.

6. Расчётным путём и экспериментально установлено, что при максимально возможной мощности лазерного луча (400 Вт) и оптимальном диаметре пятна нагрева (2,7÷3 мм) имеют место наилучшие показатели производительности процесса и точности разделения флоат-стекла.

7. Установлено, что использование отражающей подложки из дюралюминиевого сплава Д16Т с чистотой поверхности не ниже R_a = 0,32 мкм позволяет примерно в 2 раза повысить скорость разделения стекла.

8. Разработан метод, обеспечивающий 100%-ную зарождаемость трещины и позволяющий предотвратить её искривление на начальном этапе процесса термораскалывания, суть которого заключается в предварительном создании искусственного дефекта необходимого размера на краю пластины в том месте, откуда предполагается начинать процесс разделения. Предложен способ нанесения

краевого дефекта размером 200÷300 мкм путём выжигания частиц подложки в стекло лазерным импульсом длительностью 0,4÷1,5 мс с энергией 2 Дж.

9. Экспериментально определена связь между величиной отклонения трещины от заданной линии разделения Δ_m и шириной отделяемой части образца. Установлено, что Δ_m имеет минимальные значения в случае разделения образца пополам (Δ_m = 0,2÷0,4 мм) и при отделении квадрата, сторона которого меньше ширины остальной части ($\Delta_m \approx 0$). Разработан метод компенсации Δ_m, заключающийся в охлаждении более узкой из разделяемых частей вертикальным потоком воздуха, подаваемого через сопло диаметром 2 мм под давлением 0,7÷0,8 атм с отставанием от луча на 20÷40 мм и смещением от линии разделения на 5÷20 мм. Данный метод позволяет получать детали с точностью не хуже ±0,5 мм.

10. Разработана технология управляемого термораскалывания листового стекла излучением АИГ:Nd-лазера, рекомендуемая для внедрения на стеклообрабатывающих предприятиях при необходимости разделения флоат-стекла толщиной до 25 мм.

Результаты исследований проведённых в данной работе отражены в публикациях:

1. Шепелев Г.В., Малов И.Е., Шиганов И.Н. Технологические особенности разделения листового стекла излучением твердотельного лазера.// Лазеры в науке, технике и медицине.: Тезисы докладов X Междунар. конф. – Сочи, 1999. – С.36.
2. Шепелев Г.В., Малов И.Е. Лазерные технологии обработки стекла // Лазер информ: Науч-информ. сб. / НТИУЦ ЛАС. – М., 1999. – №1. – С.30-34.
3. Шепелев Г.В., Шиганов И.Н., Малов И.Е. Раскрой листового стекла лучом твердотельного лазера. // Сварочное производство. – 2000. – №6. – С.12-17.