

М 86740

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РС ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ

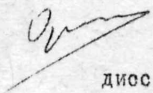
Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени Государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана

На правах рукописи

ОРЛОВ ИГОРЬ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА ТРУБЧАТЫХ СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ
МЕТОДОМ ТЕРМОРАСКЛАДЫВАНИЯ

05.03.07 - Оборудование и технология лазерной обработки



Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена
Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени
Государственном техническом университете им.Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: профессор, доктор технических наук
А.Г.ГРИГОРЬЯНЦ

Официальные оппоненты: профессор, д.т.н. Ямпольский В.М.
к.т.н. Кваша Ю.Н.

Ведущее предприятие НИИТЛ АН РС

Защита состоится "15" октября 1992 г. на заседа-
нии специализированного Совета К 053.15.03 в Московском ордена
Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного
Знамени Государственном техническом университете им.Н.Э.Баумана
по адресу: 107005

Ваш отзыв р
указанному ад
С диссерт

по
тета

Авторефер

Ученый се
специализирове
к.т.н., доцент

Подп. к печ.
Типография МГ

1186740

НИИТЛ АН РС им. Н.Э. Баумана



1086740

Орлов И.А. Лазерная резка

13.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

0474 28 IV

Актуальность проблемы. Лазеры для резки различных материалов в настоящее время широко используются в промышленности и доказали свои преимущества. В ряде случаев лазеры успешно применялись для резки стекла, как листового, так и в виде тел вращения. Как правило, для резки тел вращения из стекла используется их нагрев пламенем газовых горелок. Этот способ применяется уже около 70 лет и по своим экологическим характеристикам, а также рациональности использования природного газа для нагрева стеклоизделий морально устарел. Применение лазерного излучения в качестве источника тепла вместо газового пламени продемонстрировало улучшение качества резки и экологическую чистоту данного способа. При этом оказалось, что для резки тел вращения из стекла термораскалыванием с использованием отпаянных CO_2 -лазеров требуется мощность излучения в 5-10 раз меньшая, чем при резке в режиме испарения. Вместе с тем, возникают трудности в сопоставлении и интерпретации результатов различных работ, а также при необходимости резки стекла другой марки, связанные с неполнотой сведений о влиянии параметров режима термораскалывания на производительность и качество резки и отсутствием конкретного механизма термораскалывания трубчатых стеклоизделий. Применение для анализа процесса термораскалывания традиционных подходов оценки термостойкости стеклоизделий невозможно из-за специфических характеристик лазерного теплового источника и условий нагрева. Все вышесказанное затрудняет в ряде случаев осуществление лазерного термораскалывания с высокой производительностью и качеством в реальных производственных условиях.

Цель работы. Повышение производительности и качества лазерного термораскалывания трубчатых стеклоизделий.

Методы исследования включали аналитические методы теории тепловых процессов и методы численного интегрирования на ЭВМ для определения действия локального лазерного теплового источника вблизи поверхности стеклоизделия; метод конечных элементов для численного моделирования физических процессов нелинейной теплопроводности, развития в стеклоизделии термоупругих напряжений и перемещений, движения разделяющей трещины в квазистатическом поле термоупругих напряжений, описываемом линейной механикой разрушения. Расчеты проводились на ЭВМ ЕС-1055, ЕС-1033. Основные экспериментальные исследования велись с использованием CO_2 -лазера ИЛГН-709, в предварительных экспериментах использовались также CO_2 -лазеры ЛТ1-2,

ИЛГН-704, СО-лазер ИЛГН-706. Для оценки непараллельности плоскости реза и плоскости дна стеклоизделия (или плоскости, перпендикулярной оси стеклоизделия) применялась измерительная система с датчиком индуктивности.

Научная новизна. 1. Установлено, что при лазерном термораскалывании трубчатых стеклоизделий разделяющая окружная трещина развивается от естественных или искусственных дефектов на внешней поверхности в центре окружной полосы нагрева под действием осевых растягивающих напряжений, возникающих вследствие местного изгиба стенки стеклоизделия.

2. Показано, что в развитии осевых напряжений в плоскости разделения имеют место две противоположные тенденции. Первая заключается в развитии на внешней поверхности в центре окружной полосы нагрева напряжений сжатия, а на внутренней поверхности напряжений растяжения вследствие неравномерного распределения температуры по толщине стенки, вызванного перегревом поверхностных слоев. Действие первой тенденции препятствует термораскалыванию. Вторая тенденция заключается в развитии на внешней поверхности в центре окружной полосы нагрева напряжений растяжения, а на внутренней поверхности напряжений сжатия из-за неравномерного распределения температуры в осевом направлении, которое приводит к неравномерным радиальным смещениям стенки, т.е. к ее местному изгибу. Действие второй тенденции определяет возможность термораскалывания. Для осуществления термораскалывания необходимо обеспечить преобладание второй тенденции над первой.

Практическая ценность работы состоит в создании программного комплекса для моделирования процесса лазерного термораскалывания трубчатых стеклоизделий при заданных параметрах технологического процесса и свойствах стекла; создании экспериментальной методики подбора параметров технологического процесса лазерного термораскалывания; установлении экспериментальных зависимостей времени резки и непараллельности плоскости дна (или плоскости, перпендикулярной к оси стеклоизделия) от мощности лазерного теплового источника, размеров и формы пятна на поверхности стеклоизделия, скорости его вращения.

Апробация работы. Результаты работы докладывались:

1. На научном семинаре кафедры "Оборудование и технология лазерной обработки" МГТУ им. Н.Э.Баумана (1988, 1989 гг.).
2. На научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных

процессов" МГТУ им. Н.Э. Баумана (1989 г.).

3. На Всесоюзной конференции НТТМ "Актуальные проблемы информатики, управления, радиоэлектроники и лазерной техники" (1989 г.).

Публикации. Основное содержание работы отражено в трех опубликованных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе, списка использованной литературы и приложений. Она изложена на 235 страницах машинописного текста, содержит 75 рисунков и 5 таблиц. Список литературы включает 89 наименований. Работа выполнена при научном консультировании к.т.н. Соколова А.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Основное содержание работы.

Глава 1. Состояние вопроса.

В первой главе рассматриваются используемые в промышленности строительных материалов, электронной и электротехнической отраслях различные способы резки трубчатого стекла, а также способы, внедрение которых предполагается осуществить или осуществляется в настоящее время. К первой группе относятся способы механической резки методом отламывания и резки абразивными кругами, резки нагреваемой электрическим током проволокой, резки путем нагрева линии разделения пламенем газовых горелок. Последние два способа основаны на возникновении в стекле механических напряжений под действием градиента температур. Ко второй группе могут быть отнесены способы резки путем нагрева линии разделения излучением CO_2 -лазера (лазерное термораскалывание) и резка путем испарения стекла под действием излучения CO_2 -лазера. Анализ литературы показал, что применение лазерного термораскалывания наиболее перспективно, поскольку обеспечивает лучшее качество резки при той же или большей производительности по сравнению с резкой проволокой и газовым пламенем, требует почти на порядок меньшей мощности излучения по сравнению с резкой в режиме испарения и, кроме того, является наиболее экологически чистым способом по сравнению с остальными.

Исследованию процесса лазерного термораскалывания посвящены работы Г.А. Мачулки с сотрудниками, В.С. Кондратенко и ряда других авторов. Полученные ими результаты доказали преимущества лазерного термораскалывания и позволили рекомендовать ряд приемов, повышающих качество резки. Вместе с тем, в литературе отсутствуют достаточно полные экспериментальные исследования, вскрывающие связь параметров процесса с его производительностью и полностью отсутству-

ют результаты, демонстрирующие влияние параметров процесса на показатели его качества. Предложенные теоретические модели лазерного термораскалывания представляются не вполне корректными, т.к. в них не учитывается близкий к осесимметричному характер поля температур и напряжений, используется понятие предела термостойкости, определяемого в условиях испытаний, нехарактерных для лазерного термораскалывания. Неправомерным представляется и предложенный Г.А. Мачулкой способ вычисления разрушающего усилия путем суммирования действующих в малой области внутренних напряжений, которые, как известно, всегда взаимно уравновешены. В целом, имеющиеся модели не могут быть использованы для установления связи параметров термораскалывания с его производительностью и качеством.

В связи с изложенным в задачи работы входило:

1. Разработка физической модели процесса лазерного термораскалывания, учитывающей весь комплекс сложных термомеханических явлений, имеющих место при его осуществлении.

2. Разработка на основе физической модели программного комплекса для численного анализа процесса термораскалывания трубчатого стекла.

3. Теоретическое и экспериментальное исследование влияния параметров технологического процесса на производительность и качество резки термораскалыванием.

4. Разработка методики экспериментального выбора технологических параметров процесса, обеспечивающих требуемую производительность и качество.

5. Разработка технологических рекомендаций по резке колпачков выдувных стеклоизделий из кальций-натрий-силикатного стекла на основе теоретических и экспериментальных исследований.

Глава 2. Механизм лазерного термораскалывания трубчатых стеклоизделий.

Рассматриваются физические процессы, имеющие место при резке методом лазерного термораскалывания, и особенности физико-механических свойств силикатных стекол в этих условиях. Выделены четыре процесса: распространение тепла в твердом теле, развитие термоупругих напряжений, зарождение трещины и ее прорастание в сквозную по заданному контуру. Формулируется постановка задачи лазерного термораскалывания для стеклянной трубы: будет ли получена в трубе сквозная трещина, перпендикулярная к оси, при вращении трубы по заданному закону от сфокусированного на ее поверхности

лазерного луча с заданными пространственно-временными характеристиками, при заданных вне них силах, условиях на поверхности и способе закрепления

Для построения физико-математической модели процесса в цилиндрической системе координат записываются уравнения нестационарной теплопроводности при наличии теплоотдачи и действии тепловых источников, уравнения квазиэластической термоупругости и энергетические условия квазистатического роста магистральной трещины. Обсуждаются два механизма инициирования роста трещины. Первый связан с достижением растягивающими напряжениями предела прочности стекла на растяжение при температурах, меньших температуры стеклования T_g . Рассмотрение второго механизма проводится с использованием упрощенных подходов, применяемых при анализе кинетики напряжений при сварке. Показывается, что при локальном нагреве поверхности стекла выше температуры размягчения T_g при его быстром перемещении под лазерным лучом в точках, имевших температуру T_g напряжения на стадии охлаждения будут растягивающими и имеют максимальное значение по сравнению с другими точками. При этом после охлаждения этих точек до температур, меньших температуры стеклования T_g (т.е. при возвращении материала в упругое хрупкое состояние), напряжения могут достаточно быстро достигать предела прочности стекла на растяжение, что может привести к образованию продольных трещин в приповерхностной области. С использованием теории мощных быстро движущихся источников тепла путем численных расчетов изучены особенности теплового поля при лазерном термораскалывании. Показано, что в стеклянной трубе в этом случае распределение температур не зависит от окружной координаты, за исключением весьма малой области, непосредственно находящейся в текущий момент времени под сфокусированным лазерным лучом. Делается вывод о возможности рассмотрения задачи в осесимметричной постановке. Получены формулы для описания поля температур в области фокусировки лазерного луча для двух типов законов распределения плотности мощности в поперечном сечении луча: эллиптической формы с равномерным распределением плотности мощности и эллиптической формы с нормальным законом распределения плотности мощности. В обоих случаях считалось, что поглощение излучения в материале описывается законом Бугера-Ламберта. С учетом осесимметричности задачи записываются соответствующие уравнения для протекающих при термораскалывании процессов распространения тепла, развития термоупругих напряжений и роста

магистральной трещины, причем последнее записывается в виде:

$$\xi = W dA - d\phi \geq C dA \quad (1)$$

где ξ – трещинодвижущая сила, W – работа внешних поверхностных и объемных сил при виртуальном увеличении площади трещины на величину dA , $d\phi$ – изменение энергии упругой деформации, C – удельная энергия образования новой поверхности.

В качестве расчетного метода решения уравнений выбран метод конечных элементов, допускающий решение всех уравнений на одной математической основе. Решение задачи нестационарной теплопроводности записывается в виде:

$$([C] + \theta \Delta t [K]) \{T_2\} = ([C] - \Delta t (1 - \theta) [K]) \{T_1\} + \Delta t [(1 - \theta) \{F_1\} + \theta \{F_2\}] \quad (2)$$

где $[C]$ и $[K]$ – матрицы демпфирования и жесткости для осесимметричной тепловой задачи соответственно, $\{T_1\}$ и $\{T_2\}$ – вектора температур в узлах в текущий момент и через время Δt , $\{F_1\}$ и $\{F_2\}$ – векторы тепловой нагрузки в узлах в соответствующие моменты времени, θ – безразмерный параметр, принятый равным $2/3$, что позволяет реализовать метод Галеркина.

Решение термоупругой задачи в форме метода перемещений имеет вид:

$$[K]^* \{U\} + \{F\}^* = 0 \quad (3)$$

где $[K]^*$ и $\{F\}^*$ – соответственно матрица жесткости и вектор узловых сил (с учетом тепловой нагрузки), $\{U\}$ – вектор смещений узлов. Принято, что для решения задачи допустимо использование треугольных осесимметричных симплекс-элементов и записаны соответствующие выражения для матриц и векторов $[C]$, $[K]$, $\{F_1\}$, $\{F_2\}$, $[K]^*$, $\{F\}^*$. Вектор средних напряжений в элементе $\{\bar{\sigma}\}^{(e)} = [\bar{\sigma}_r \bar{\sigma}_\theta \bar{\sigma}_z \bar{\tau}_{rz}]^T$ вычисляется по формуле

$$\{\bar{\sigma}\}^{(e)} = [D]^{(e)*} [B]^{(e)*} \{U\}^{(e)} - [D]^{(e)*} \{\bar{\epsilon}_0\}^{(e)} \quad (4)$$

где $[D]^{(e)*}$ – матрица упругих характеристик элемента, $[B]^{(e)*}$ – матрица производных функций формы для элемента, $\{\bar{\epsilon}_0\}^{(e)}$ – вектор начальной (в том числе тепловой) деформации элемента. Для вычисления напряжений в узлах использовалась теория согласованных результатов элементов, согласно которой вектор соответствующей компоненты напряжений в узле получается из решения системы:

$$[C]^* \{\bar{\sigma}\} = \{R\}^* \quad (5)$$

где $[C]^*$ – объединенная матрица демпфирования осесимметричных треугольных симплекс-элементов, а $\{R\}^*$ – вектор, зависящий от средних значений напряжений в элементе.

Движение магистральной трещины моделируется путем поочередного освобождения связей в сечении стенки трубы плоскостью $z=0$ в предположении о симметрии поля температур относительно этой плоскости. Условием подрастания кольцевой трещины на величину $dr = r_1 - r_2$ является выполнение неравенства:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (F_{ij}^* - F_{ij}^*) (U_{2ij} - U_{1ij}) - \frac{1}{2} R_{i^*} U_{2i^*} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 [\bar{\sigma}_{ij} \bar{\epsilon}_{2ij} - (\bar{\sigma}_{ij} \bar{\epsilon}_{1ij} + \bar{\epsilon}_{2ij} (\bar{\sigma}_{ij} - \bar{\sigma}_{2ij}))] > 2\pi (r_1 - r_2) c \quad (6)$$

где m и n - число узлов и число элементов, i^* - номер узла, в котором освобождается связь, R_{i^*} и U_{2i^*} соответственно реакция в i -м узле до освобождения связи и его перемещение после освобождения связи. При этом реакция R_i находится из решения уравнения $\{K\}^*(U) + \{F\}^*(R) = 0$ (7)

Разработан программный комплекс для численного анализа процесса термораскалывания. С его помощью изучались распределение температур, перемещений и напряжений при лазерном термораскалывании. Полученное распределение напряжений σ_z в осевом направлении и по толщине стенки показано на рис. 1,2. Установлено, что неравномерное распределение температур в осевом направлении ведет к изгибу стенки трубы и развитию растягивающих напряжений в центре нагрева на внешней поверхности трубы, неравномерно распределение температур по толщине стенки оказывает противоположное воздействие на напряжения, т.е. имеют место две тенденции в развитии напряжений во времени. С течением времени тенденция, связанная с изгибом, начинает преобладать, что и инициирует рост разделяющей трещины. Поскольку полученное распределение напряжений противоречило имеющимся в литературе представлениям, проводился численный эксперимент, заключающийся в изучении распределения напряжений при действии поверхностного линейного по толщине стенки тепловых источников в условиях разрешения и запрета радиальных смещений стенки. Было выявлено, что для обоих типов тепловых источников при запрете радиальных смещений растягивающие напряжения на внешней поверхности не возникают, что подтверждает роль изгиба стенки в их развитии. При действии линейного по толщине стенки источника и ее свободном радиальном перемещении напряжения на внешней поверхности всегда были растягивающими, а на внутренней - сжимающими (рис. 3). Следовательно, неравномерность в распределении температур по толщине стенки, связанная с перегревом поверхностных слоев внешней

поверхности, играет отрицательную роль, задерживая начало развития на этой поверхности растягивающих напряжений. Данный факт подтверждается также результатами расчетов при действии поверхностного теплового источника в условиях запрета радиальных смещений стенки (рис. 4). Результаты расчетов подтверждаются также при изучении характера излома подвергнутых термораскалыванию образцов. Следы разрушения на поверхности стекла совпадают со следами на изломах образцов, полученных при разрушении в условиях чистого изгиба, а на внешней поверхности трубы наблюдаются многочисленные точки начала разрушения.

Глава 3. Расчетное исследование процесса лазерного термораскалывания трубчатых стеклоизделий.

Формулируются расчетные критерии для сопоставления между собой различных режимов лазерного термораскалывания. Производительность резки оценивается по времени, необходимому для зарождения кольцевой трещины и превращения ее в сквозную. Анализ литературных данных по разрушению стекла показал, что за показатель, характеризующий качество реза, может быть принята величина разности между изменением механической энергии в изделии при образовании сквозной трещины и затратами энергии на образование новой поверхности, причем минимальному значению этой разности соответствует наилучшее качество реза.

Выведены уравнения, описывающие лазерный кольцевой источник на поверхности трубы. Вывод основывался на принципе равенства энергии, вводимой сфокусированным лазерным лучом в быстровращающуюся трубу и эквивалентным ему осесимметричным тепловым источником через сечение стенки трубы плоскостью $z = \text{const}$. Получены математические выражения для лазерного луча с нормально-круговым распределением плотности мощности в поперечном сечении (8), с круговым равномерным распределением (9) и кольцевым распределением (10):

$$q_r(z) = \frac{P}{2\pi\sqrt{\pi}} R z_0 \exp \left\{ -z^2/z_0^2 \right\} \quad (8)$$

$$q_r(z) = (P/\pi^2 L R) \sin[\arccos(z/r)] \quad (9)$$

$$q_r(z) = (P/4\pi\sqrt{\pi} z_0^3 R) (2z^2 + z_0^2) \exp \left\{ -\frac{z^2}{z_0^2} \right\} \quad (10)$$

г, P - мощность излучения, z_0 - расстояние, на котором плотность мощности убывает в "е" раз, r - полный радиус кругового луча, R - внешний радиус трубы.

Приводятся результаты тестирования разработанного программного комплекса. В качестве тестовых использовались задачи о нагреве стержня с нулевой температурой тепловым потоком постоянной мощности без учета теплоотдачи в окружающую среду, о нагреве стержня без теплоотдачи внутренними тепловыми источниками, равномерно распределенными в области $0 < z < L$, задача о нагружении толстостенной трубы внутренним давлением (задача Ламе) и задача о напряжениях в равномерно нагретом стержне, находящемся в жесткой заделке. Во всех случаях различие численного и аналитического решений составило менее 5%.

В качестве параметров технологического процесса были выделены размеры и форма лазерного теплового источника на поверхности стеклоизделия, закон распределения плотности мощности в источнике, мощность лазерного излучения, скорость вращения стеклоизделия относительно источника. Расчеты проводились для изделий из кальций-натрий-силикатного стекла диаметром 70 мм и толщиной стенки 1,5 мм. В результате ряда численных экспериментов было установлено, что имеется размер пятна нагрева, обеспечивающий минимальное время резки. Для нормального закона распределения этот размер пятна больше, чем для равномерного закона распределения, однако минимальное время резки от закона распределения не зависит и составляет 3,0 с. Влияние размеров и закона распределения на величину высвобождаемой при развитии трещины энергии, которая характеризует качество реза, аналогично их влиянию на время резки, с той разницей, что размер пятна, обеспечивающий наилучшее качество реза, несколько больше, чем размер пятна, обеспечивающий минимальное время резки. При исследовании влияния мощности излучения подтверждено существование при термораскалывании нижней и верхней пороговых мощностей. Нижний порог связан с недостаточным изгибом стенки и невозможностью развития растягивающих напряжений на внешней поверхности. Верхний порог определяет начало расплавления поверхностных слоев стекла, что делает невозможным рост трещины из-за резкого повышения вязкости стекла. Установлено существование диапазона мощностей, в котором время резки минимально и не уменьшается с ростом мощности, а также практически не зависит от размеров пятна нагрева. Показано, что мощность, обеспечивающая наилучшее качество реза, совпадает с мощностью, начиная с которой время резки перестает уменьшаться. С увеличением размера пятна величина оптимальной мощности возрастает. Влияние скорости вращения на время

резки заключается в его увеличении, начиная с определенного значения скорости, которое тем меньше (а темп возрастания времени резки тем больше), чем меньше мощность излучения и чем больше диаметр пятна. Влияние скорости вращения на качество резки аналогично влиянию ее на время резки.

Расчеты показали, что с увеличением толщины стенки время резки возрастает по квадратичному закону. При этом величина высвобождаемой энергии в расчете на единицу толщины стенки имеет минимум, что свидетельствует о наличии оптимальной комбинации параметров обработки. Исследования влияния свойств стекла проводились на кальций-натрий-силикатном стекле, термостойком боросиликатном С52-1 и свинцовосодержащем С93-1. Из полученных результатов следует, что при близких коэффициентах линейного расширения и теплоемкости время резки стекол с большим коэффициентом теплопроводности будет меньше. При близких теплофизических коэффициентах время резки будет большим для стекол, имеющих меньший коэффициент термического расширения из-за недостатка накопленной энергии и недостаточности величины напряжений для роста разделяющей трещины. Большая теплоемкость материала и низкая теплопроводность вызывают задержку в развитии растягивающих напряжений на внешней поверхности и, тем самым, увеличивают время резки.

Глава 4. Экспериментальное исследование процесса лазерного термораскалывания выдувных стеклоизделий.

Выбраны экспериментальные критерии для сопоставления между собой режимов лазерного термораскалывания по производительности и качеству. Производительность оценивалась по измеряемому в ходе экспериментов времени разделения, а для оценки качества реза измерялась величина непараллельности плоскости реза к плоскости дна стеклоизделия (или плоскости, перпендикулярной оси стеклоизделия), которая нормируется ГОСТ 26 21 и, на наш взгляд, наиболее коррелирует с величиной высвобождаемой энергии при образовании сквозной трещины, т.е. с расчетным критерием оценки качества. Эксперименты проводились на заготовках выдувных стаканов Гусевского хрустального завода из кальций-натрий-силикатного стекла диаметром 70 мм и толщиной стенки 1,5 мм, а также на трубках из электровакуумного стекла С93-1 диаметром 25 мм и толщиной стенки 2 мм. В качестве источника излучения использовался серийный CO_2 -лазер ИЛГН-709.

Результаты экспериментов по изучению влияния диаметра пятна

нагрева на время резки заготовок выдувных стаканов качественно совпадают с расчетными. Полученная для трубок из С93-1 зависимость подтвердила существование оптимального диаметра пятна, обеспечивающего минимальное время резки, которое составило 6,7 с. Изучение влияния мощности на заготовках выдувных стаканов подтвердило наличие нижней пороговой мощности, которая для пятна диаметром 1,12 мм составила 25 Вт, а для диаметра 2,0 мм — 60 Вт. Сближение времени резки для указанных диаметров при $P > 80$ Вт также подтверждает существование мощности, при превышении которой время резки перестает уменьшаться для всех диаметров пятна. Результаты для труб из С93-1 показали наличие верхнего порога мощности величиной 70 Вт, при превышении которого наблюдалось оплавление поверхности и разделение не происходило. Эксперименты по влиянию скорости вращения на время резки на заготовках выдувных стаканов показали наличие оптимальных скоростей вращения, обеспечивающих одинаковое по величине минимальное время резки для пятен различной формы и размеров. Данные по резке трубок из С93-1 подтверждают наличие оптимальной скорости, обеспечивающей минимальное время резки.

Оценка непараллельности плоскости реза к плоскости дна стеклоизделия ("косина края") проводилась на специальном стенде. Регистрация высоты расположения плоскости реза осуществлялась с помощью индукционного датчика при вращении отрезанного стеклоизделия. Все измерения проводились на тех же образцах, на которых изучалось влияние параметров режима обработки на время резки. Исследование влияния диаметра пятна на "косину края" на заготовках выдувных стаканов и трубках из С93-1 подтвердило факт существования оптимального размера пятна, обеспечивающего минимальный размер этого показателя. Эксперименты по оценке влияния мощности на заготовках стаканов показали, что мощность, обеспечивающая наименьшую "косину края", равна мощности, обеспечивающей минимальное время резки. Результаты для трубок из С93-1 носят иной характер и не демонстрируют наличие оптимального уровня мощности. Изучение влияния скорости вращения на "косину края" как на заготовках выдувных стаканов, так и на трубках из С93-1 продемонстрировало существование оптимальной скорости, обеспечивающей наименьшую "косину края" реза.

Изучено влияние возмущающих факторов на время и качество лазерного термораскалывания. Показано для заготовок выдувных стаканов, что при их разнотолщинности, не превышающей 30% от номиналь-

ной толщины стенки, соблюдаются требования ГОСТ 26821 по непараллельности плоскости реза к плоскости дна стеклоизделия (не более 1 мм). Также показано, что с увеличением средней толщины стенки время резки возрастает по закону, близкому к квадратичному, причем время растет быстрее для хуже отожженных образцов.

Глава 5. Применение лазерного термораскалывания трубчатых стеклоизделий.

На основе проведенной работы разработана методика экспериментального определения технологических параметров лазерного термораскалывания для стеклоизделий заданного диаметра и толщины стенки, при заданных ограничениях на время резки и непараллельность реза к плоскости дна. Разработанная методика является двухэтапной. На первом этапе отыскиваются параметры процесса, обеспечивающие минимальное время резки. На втором этапе путем последовательного варьирования параметрами процесса достигается уменьшение непараллельности края реза к плоскости дна стеклоизделия при одновременном контроле за увеличением времени резки.

Внедрение результатов работы осуществлялось на Калининском стекольном заводе на двух технологических линиях механизированного изготовления сортовой стеклопосуды. Экспериментальный подбор параметров лазерного термораскалывания осуществлялся по разработанной методике. Резке подвергались изделия из кальций-натрий-силикатного бесцветного стекла: "банка" (диаметр 95 мм, толщина стенки 1 мм) и "истикан" (диаметр 50 мм, толщина стенки 1 мм). Для резки обоих изделий были выбраны пятна эллиптической формы. Для изделия "истикан" размеры полуосей составили 2 мм в направлении оси Z и 3 мм в окружном направлении, для изделия "банка" — 2,8 мм в направлении оси Z и 3,2 мм в окружном направлении. В результате внедрения лазерного термораскалывания удалось вдвое снизить расход абразивных материалов для шлифовки торца стеклоизделия при сохранении прежней производительности линий.

Общие выводы по работе.

Основные выводы и результаты настоящей работы следующие:

1. Анализ литературы показал, что среди существующих способов резки трубчатых стеклоизделий наилучшим по качеству реза, производительности, энергозатратам и экологическим характеристикам можно считать лазерное термораскалывание. Однако недостаточно изучено влияние параметров режима термораскалывания на производительность и качество, что не позволяет обеспечить их требуемый уровень в

производственных условиях.

2. Установлено, что при лазерном термораскалывании трубчатых стеклоизделий разделяющая окружная трещина развивается от естественных или искусственных дефектов на внешней поверхности в центре окружной полосы нагрева под действием осевых растягивающих напряжений, возникающих вследствие местного изгиба стенки стеклоизделия.

3. Показано, что в развитии осевых напряжений в плоскости разделения имеют место две противоположные тенденции. Первая заключается в развитии на внешней поверхности в центре окружной полосы нагрева напряжений сжатия, а на внутренней поверхности напряжений растяжения вследствие неравномерного распределения температуры по толщине стенки, вызванного перегревом поверхностных слоев. Действие первой тенденции препятствует термораскалыванию. Вторая тенденция заключается в развитии на внешней поверхности в центре окружной полосы нагрева напряжений растяжения, а на внутренней поверхности напряжений сжатия из-за неравномерного распределения температуры в осевом направлении, которое приводит к неравномерным радиальным смещениям стенки, т.е. к ее местному изгибу. Действие второй тенденции определяет возможность термораскалывания. Для осуществления термораскалывания необходимо обеспечить преобладание второй тенденции над первой.

4. Рост разделяющей трещины инициируется либо достижением растягивающими напряжениями предела прочности стекла на растяжение, либо образованием зародышевой трещины в приповерхностной области вследствие нагрева этой области выше температуры размягчения стекла и последующем ее охлаждении ниже температуры стеклования при быстром вращении, стеклоизделия под сфокусированным лазерным лучом, что может использоваться для уменьшения времени резки.

5. Существует оптимальный диаметр пятна нагрева, обеспечивающий минимальное время резки, при фиксированных мощности излучения и скорости вращения. При диаметрах, меньших оптимального, время резки возрастает из-за перегрева поверхностных слоев и усиления первой тенденции в развитии напряжений. При диаметрах, больших оптимального, время резки возрастает из-за задержки в образовании зародышевой трещины на внешней поверхности.

6. Максимальная производительность резки для двух видов закона распределения плотности мощности в лазерном луче: равномерном и нормальном — является одинаковой, что позволяет использовать для

термораскалывания отпаянные многомодовые CO_2 -лазеры.

7. Подтверждено существование верхней и нижней пороговых мощностей, выше и ниже которых соответственно термораскалывание невозможно. Верхний порог связан с нагревом поверхности на линии разделения до температуры, большей температуры стеклования и резким повышением вязкости стекла, делающим рост трещины невозможным. Нижний порог связан с нехваткой вводимой в изделие энергии для создания требуемой неравномерности температур в осевом направлении.

8. Для кальций-натрий-силикатного стекла, начиная с некоторой мощности, ее дальнейшее увеличение не приводит к снижению времени резки. При этом время резки для различных диаметров пятна становится практически одинаковым.

9. Существуют оптимальные скорости вращения стеклоизделий, обеспечивающие наименьшее время резки и наименьшую непараллельность к оси резки и плоскости дна стеклоизделия (или плоскости, нормальной к оси стеклоизделия). Скорость вращения, обеспечивающая наилучшее качество реза больше, чем обеспечивающая минимальное время резки.

10. Для изделий из кальций-натрий-силикатного стекла показано, что зависимость времени резки от толщины стенки близка к квадратичной.

11. На заготовках выдувных стаканов показано, что при лазерном термораскалывании при разнотолщинности стеклоизделий в пределах 30% от номинального диаметра непараллельность плоскости реза и плоскости дна стеклоизделия будет находиться в пределах требований ГОСТ 26821, что составляет менее 1 мм.

12. Для стеклоизделий "банка" и "истикан" Калининского стекольного завода при их термораскалывании с применением CO_2 -лазера ИЛГН-709 и установки МОС-1, размеры пятна нагрева, обеспечивающие минимальное время резки составляют соответственно 2,0х3,0 мм и 2,5х2,8 мм, а обеспечивающие минимальную непараллельность к плоскости дна стеклоизделия- 2,5х3,0 мм и 2,8х3,2 мм соответственно.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Григорьянц А.Г., Новик А.Е., Орлов И.А., Соколов А.А. Напряженное состояние при термораскалывании быстровращающихся стеклянных труб // Прогрессивные методы и средства производства опто-электронных приборов: Межвуз. сб. науч. тр. - Москва, 1989. - с.3-7.

2. Орлов И.А. Влияние параметров режима на производительность

резки труб из стекла С93-1 // Актуальные проблемы информатики, управления, радиоэлектроники и лазерной техники : Сб. тезисов докл. Всесоюзной конф. НТМ , ч.2 .- Москва, 1989 .- с.216-217.

3. Орлов И.А., Чадин В.С., Сирота А.С., Орлов А.С. Установка для лазерной обрезки трубчатых стеклоизделий // Респ. науч.-техн. конф. "Материалы и упрочняющие технологии -91" : Тез. докл. - Курск, 1991, - с.87.

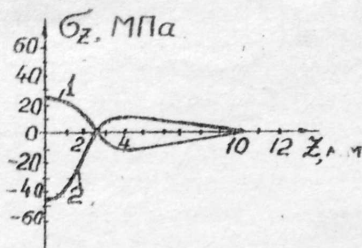


Рис.1. Распределение осевых напряжений σ_z вдоль образующей трубы из стекла С52-І: на внешней (1) и внутренней (2) поверхности трубы соответственно

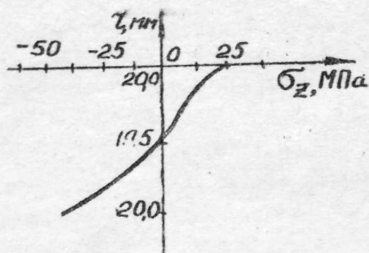


Рис.2 Распределение напряжений σ_z в сечении стенки трубы из стекла С52-І плоскостью $z=0$

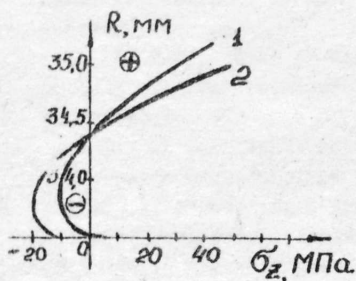


Рис.3. Распределение осевых напряжений σ_z в сечении стенки трубы плоскостью $z=0$ при действии равномерно распределенного по толщине стенки источника

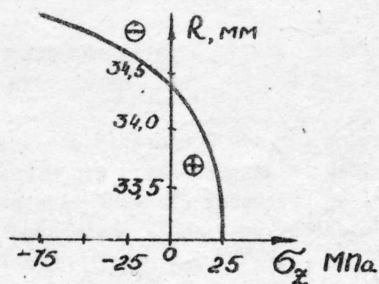


Рис.4. Распределение напряжений σ_z в сечении стенки трубы плоскостью $z=0$ для поверхностного источника при запрете радиальных смещений