

На правах рукописи

Карапетян Артур Рафикович

**Влияние остаточных напряжений на
качество механической резки флоат-
стекла**

Специальность 05.17.11 – Технология силикатных и тугоплавких
неметаллических материалов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре химической технологии стекла и ситаллов
Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева

Научный руководитель:
академик РАН, доктор технических наук Саркисов Павел Джibraелович
президент РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Научный консультант:
кандидат технических наук, доцент Спиридонов Юрий Алексеевич,
РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Маневич Вадим Ефимович
руководитель Московского бюро
ЗАО «Стеклоизмеритель»

кандидат технических наук
Колосов Алексей Михайлович,
генеральный директор
ООО «Стекольная компания ЭТКОС»

Ведущая организация: ОАО «НИТС», г. Москва

Защита состоится «11» ноября 2013 г. на заседании диссертационного совета
Д 212.204.12 при РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047 г. Москва, Миусская пл.,
д. 9) в 12.00 в конференц зале.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре
РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Автореферат диссертации разослан _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.204.12



Макаров Н.А.

Актуальность темы: На сегодняшний день механическая роликовая резка стекла является практически безальтернативной технологией в своей области. Механическая резка осуществляется в два этапа: сначала с помощью ролика делается надрез, то есть наносится царапина (желобок) с возникающей под ней микротрещиной (обычно от края до края листа стекла при прямолинейном резе), а затем перпендикулярно плоскости листа прикладывается усилие на изгиб (производится разлом). Данный способ основан на свойстве хрупких тел под растяжением при изгибе ломаться по самому слабому сечению. Однако в некоторых случаях разлом идет в произвольном направлении либо уже в момент нанесения реза начинается самопроизвольное распространение трещины, что приводит к отбраковке стекла.

Как правило, данные проблемы характерны для всех листов в партии и количество брака составляет от 50 % до 80 %, что фактически означает остановку работы перерабатывающего предприятия.

Другой существенной проблемой является плохое качество реза. Сколы и зазубрины на получаемой кромке значительно снижают прочность стекла и приводят к его преждевременному разрушению во время дальнейшей переработки, транспортировки и эксплуатации.

Причины, приводящие к осложнениям при резке флоат-стекла, могут заключаться как в резном оборудовании, так и в остаточных напряжениях.

Что касается оборудования, здесь главное – строго соблюдать рекомендуемые производителем параметры резки (давление, угол заточки и диаметр ролика, скорость резки и т.д.) для соответствующей толщины стекла, а также вовремя делать техническое обслуживание и ремонт.

Влияние же остаточных напряжений до сих пор не изучено в полной мере. В стандартах ведущих стран-производителей листового стекла нормы по допустимым остаточным напряжениям отсутствуют. В Российском ГОСТ Р 54170-2010 «Стекло листовое бесцветное. Технические условия» оговариваются только торцевые напряжения (помимо них во флоат-стекле присутствуют мембранные напряжения, оказывающие на резку более существенное влияние).

Как показывает практика соблюдение указанной нормы не гарантирует отсутствие проблем при резке.

Стоит сказать, что само представление о негативном влиянии остаточных напряжений носит скорее интуитивный характер, так как механизм разрушения в случае разлома не по резу и бое при нанесении реза не определен, без чего точное определение допустимых значений не представляется возможным.

Работа выполнялась по заказу компании ООО «Эй Джи Си Флэт Гласс Клип» - крупнейшего в России производителя листового стекла.

Целью работы является определение особенностей формирования остаточных напряжений, характерных для флоат-стекла. Выявление причин основных проблем, возникающих в процессе резки стекла у переработчиков: разлома не по резу, боя при резке и плохого качества кромки. Определение допустимого уровня остаточных напряжений, в пределах которого обеспечивается хорошее качество резки.

Научная новизна: На основании проведённых исследований установлено, что причиной разлома не по резу и боя при резке являются мембранные напряжения, характерные для флоат-стекла в силу больших поперечных размеров.

Определены основные особенности формирования и распределения мембранных напряжений во флоат-стекле. Установлены следующие закономерности:

- мембранные напряжения преимущественно направлены вдоль линии вытягивания флоат-ленты, вследствие бортового эффекта и продольного расположения теплообменников в зонах «ответственного» охлаждения в лере;
- существует значительный градиент мембранных напряжений по ширине флоат-ленты;
- в краевой зоне стекла (размером порядка 200 мм) создаётся особое напряжённое состояние, характеризующееся отсутствием мембранных напряжений, направленных поперёк фронта разлома, на торцевой поверхности и их плавным возрастанием до номинальных значений в зоне удалённой от края, в силу чего опасность разлома не по резу в краевой зоне значительно уменьшается.

Определено, что разлом не по резу вызван преимущественной ориентацией суммарных (изгибных и остаточных) напряжений отличной от фронта разлома за счёт компенсации остаточными мембранными напряжениями сжатия изгибных напряжений. Бой при резке вызван достижением остаточными напряжениями предела прочности стекла с резом до изгиба за счёт высоких мембранных напряжений растяжения.

Выведен математический критерий для определения допустимого уровня мембранных напряжений сжатия:

$$\sigma_{rm} \leq (\mu - 1)\sigma_{xb},$$

где σ_{xb} – прочность стекла с резом на изгиб, σ_{rm} – разница главных остаточных мембранных напряжений, измеряемая напрямую с помощью поляризационно-оптического метода.

Определено, что высокие торцевые напряжения, за счёт напряжений сжатия на поверхности, упрочняют стекло, что приводит к увеличению упругой энергии деформации при разломе и как следствие образованию рельефной кромки (кромки плохого качества).

Практическая значимость: Установлено, что разным толщинам стекла соответствуют различные значения допустимых напряжений.

Определены допустимые значения мембранных и торцевых напряжений для толщин стекла, имеющих широкое практическое применение.

В качестве эксперимента полученные значения использовались службой качества ООО «Эй Джи Си Флэт Гласс Клин» для контроля остаточных напряжений флоат-стекла в период с 10.2011 по 12.2012 (подтверждено актом внедрения), что позволило сократить общий объём претензий, связанных с резкой стекла на 4,3 % (при исчислении в квадратных метрах).

На основании закономерностей распределения напряжений во флоат-стекле, разработаны и успешно опробованы практические рекомендации по резке стекла с высокими остаточными напряжениями, позволяющие переработчикам значительно сократить потери в процессе резки стекла.

Положения, выносимые на защиту:

- Результаты исследований по особенностям формирования остаточных напряжений, характерных для флоат-стекла.
- Научно-техническое обоснование причин, приводящих к разлому не по резу и бою при резке.
- Выведенный математический критерий разлома не по резу.
- Рассчитанные значения допустимых остаточных мембранных и торцевых напряжений, в пределах которых обеспечивается хорошее качество резки.
- Практические рекомендации по резке стекла с высокими остаточными напряжениями, позволяющие снизить процент отбраковки.

Достоверность и обоснованность полученных результатов исследований, выводов и рекомендаций подтверждается использованием в ходе экспериментов аттестованной аппаратуры и программного обеспечения, корректной статистической обработкой экспериментальных данных, совпадением результатов, полученных аналитическими и экспериментальными методами.

Апробация Работы: Основные положения и результаты диссертационной работы доложены на: IV Всероссийской конференций по химической технологии с международным участием ХТ'12 (Москва, 2012); VI Всероссийской конференции молодых учёных, с международным участием «Менделеев-2012» (Санкт-Петербург, 2012); Всероссийской научно-технической конференций «Новые материалы и технологии – НМТ-2012» (Москва 2012).

Публикации: Основные положения диссертационной работы изложены в 9 печатных изданиях, в том числе 3 публикации в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, методической и экспериментальной части, выводов, списка литературы (104 отечественных и зарубежных источника) и двух приложений. Работа изложена на 173 страницах машинописного текста, содержит 87 рисунков и 33 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, указаны цели исследования, сформулирована научная новизна и практическая ценность работы.

В обзоре литературы рассмотрены существующие методы резки листового стекла: механический (роликовый), лазерный и гидроабразивный. Рассматривается их механизм, указываются достоинства и недостатки каждой технологии. Основное внимание уделяется механической роликовой резке, как практически безальтернативной технологии для массового переработчика на сегодняшний момент. Подробно рассмотрены параметры механической резки: толщина, диаметр и угол заточки режущего ролика, давление, скорость резки. Разобраны основные проблемы при резке, связанные с оборудованием.

Приведена информация из механики разрушения по условиям зарождения и распространения трещин. Указываются два эквивалентных критерия разрушения (энергетический и силовой). Рассматривается траектория распространения трещины, определяемая балансом энергии разрушения и упругой энергией деформации, реализуемой с ростом трещины.

Указаны положения теории тонких пластин, применимых для случая разлома листового стекла. Наиболее важным из них является гипотеза об отсутствии давления между слоями пластинки, параллельными срединной плоскости, согласно которой изгиб листа не вызывает напряжений направленных по толщине листа.

Описываются принципы формирования остаточных торцевых напряжений в стекле. Величина остаточных напряжений пропорциональна градиенту температур при переходе из вязко-пластичного в твёрдое состояние. Распределение напряжений по толщине стекла при медленном охлаждении с постоянной скоростью подчиняется параболическому закону. Рассмотрен процесс отжига на современных линиях производства флоат-стекла.

В первой главе экспериментальной части описывается методология эксперимента.

Временные напряжения создавались путём нагрева локальной зоны стекла до температур порядка 100 - 150 °С. Нагрев производился с помощью гибкого нагревательного элемента ЭНГЛ-1 (характеристики: максимальная температура нагревательного элемента - 180 °С, длина - 2,5 м, ширина 3,5 мм, номинальная мощность 30 Вт) или с помощью более мощного керамического инфракрасного

нагревателя SHTS (характеристики: постоянная рабочая температура 900 °С, длина 40 см, ширина 10 см, номинальная мощность 800 Вт, диапазон волн 2-10 мкм).

Постоянные торцевые напряжения создавались в муфельной печи путём нагрева стекла до температур выше T_g и последующего резкого охлаждения. Чтобы избежать образования мембранных напряжений использовались образцы небольшого размера.

Постоянные мембранные напряжения создавались путём специальной термообработки в печи фьюзинга Mille M-400. Использовались образцы стекла размером 40x80 см. Поперёк образца укладывалась одна или несколько полос теплоизолирующего материала (например, стекловаты марки ISOVER KL 37), под которыми в процессе охлаждения образовывались напряжения растяжения, а в прилегающих областях - напряжения сжатия.

Измерение напряжений проводилось с помощью поляризационно-оптических методов. Торцевые напряжения измерялись на полярископе-поляриметре ПКС-250 (метод Babinet). Мембранные напряжения - на приборе SCA-1500 Stress Scanner, тип: Мерни 0,5 (метод Senarmont).

Предел прочности стекла определялся по методу трёхточечного изгиба на разрывной машине РМ-500.

Вторая глава экспериментальной части посвящена исследованию особенностей формирования остаточных напряжений во флоат-стекле.

Торцевые напряжения, вызванные неравномерностью охлаждения поверхностных и внутренних слоёв стекла, достаточно хорошо изучены и описаны в литературе. Из литературных источников известно, что они имеют квадратичное распределение по толщине стекла (от растяжения в центре до сжатия на поверхности), а их величина пропорциональна градиенту температур при переходе стекла из вязко-пластичного в твёрдое состояние, то есть фактически толщине стекла и скорости линии (вытягивания).

В ходе эксперимента также определено:

- торцевые напряжения практически постоянны по плоскости листа;
- в данной точке листа их величина и распределение одинаковы в любом направлении (это объясняется тем, что торцевые напряжения задаются неравномерностью охлаждения слоёв параллельных плоскости листа стекла; поскольку скорость охлаждения в любой точке каждого подобного слоя постоянна как и площадь их поверхности, усадка каждого слоя идёт равномерно во всех направлениях).

Мембранные напряжения, вызванные неравномерностью охлаждения по плоскости флоат-ленты, изучены очень мало. В литературных источниках информация практически отсутствует. В связи с чем значительная часть работы была посвящена их изучению.

При формировании мембранных напряжений действуют те же принципы, что и для торцевых: краевая область охлаждается быстрее, поэтому там образуются напряжения сжатия, в соседней области соответственно образуются напряжения растяжения.

Существуют следующие особенности, характерные для флоат-стекла:

Бортовой эффект. Область стекла в районе бортоформирующих роликов отличается по толщине, от основной части листа:

- при производстве стёкол большой толщины стекломасса нагоняется из краевой области в центр ленты, в результате края имеют меньшую толщину и охлаждаются намного быстрее, что приводит к образованию значительных напряжений сжатия;
- при производстве стёкол малой толщины ситуация обратная, стекломасса оттягивается из центральной области в краевую, края имеют большую толщину, в итоге образуются незначительные напряжения сжатия.

Продольное расположение теплообменников в лере, обуславливающее неравномерное охлаждение по ширине флоат-ленты. Во флоат-стекле образуется несколько продольных полос, охлаждающихся с различной скоростью, которые препятствуют свободной усадке соседних полос в продольном направлении.

В результате двух вышеперечисленных эффектов мембранные напряжения направлены главным образом вдоль линии вытягивания флоат-ленты (рисунок 1).

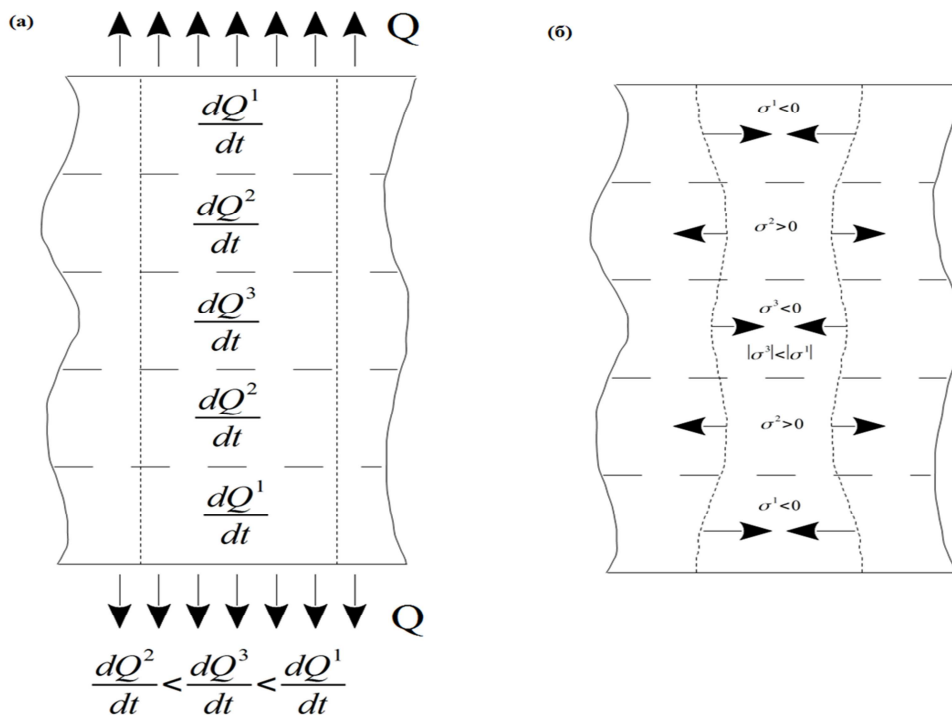


Рис. 1. Направление мембранных напряжений

В силу малой поперечной усадки в зонах «ответственного охлаждения» в лере мембранные напряжения, направленные поперёк флоат-ленты, очень малы. Усадки по толщине флоат-ленты практически не происходит, и соответствующие напряжения считаются равными нулю.

Типичная картина распределения мембранных напряжений выглядит следующим образом:

- значительная неравномерность по ширине флоат-ленты;
- практически постоянные напряжения вдоль флоат-ленты, в силу стабильности и инерционности процесса отжига.

В процессе производства обрезается непригодная для использования бортовая область флоат-ленты. В результате удаляется часть листа имеющая максимальные напряжения (сжатия). За счёт релаксации общий уровень напряжений в листе стекла значительно снижается.

В третьей главе экспериментальной части описано экспериментальное определение причин основных проблем при резке.

С помощью нагревателей в стекле создавались временные мембранные напряжения, затем проводилась их резка.

В процессе резки образца в областях напряжений сжатия (нагрева) при разломе происходил уход трещины с линии реза.

При более мощном нагреве с помощью инфракрасного нагревателя, напряжения сжатия увеличивались, а в соседней области появлялись значительные напряжения растяжения.

Во время нанесения реза происходило разрушение стекла при пересечении области напряжений растяжения.

Таким образом, было определено, что разлом не по резу вызван мембранными напряжениями сжатия, а бой при резке мембранными напряжениями растяжения.

В четвёртой главе экспериментальной части описано определение величины допустимых мембранных напряжений.

В первую очередь путём моделирования с помощью ПО ANSYS Structural версии 14.0 определялось напряжённое состояние в стекле в момент разлома (при подъёме разломочной планки).

ANSYS является универсальным расчётным программным комплексом, основанном на методе конечных элементов, предназначенным для инженерных расчётов. Программа содержит обширную верификационную матрицу. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору выдан аттестационный паспорт №257.

Лист имеет размеры 3,21 x 6 метров. Как правило, разлом листа начинается по центру вдоль короткой стороны. Подобный вариант был использован в нашей модели. В нашей модели ось x сонаправлена с длинной стороной листа, ось y – с короткой.

По результатам моделирования сделаны следующие заключения:

- подъём листа практически не вызывает напряжений, ориентированных по вертикальной оси, что находится в соответствии с гипотезой тонких пластин;
- величины напряжений в точке, находящейся не вблизи свободного края, в перпендикулярных направлениях, пропорциональны. Коэффициентом пропорциональности является коэффициент Пуассона, что отвечает условию реализации плоского деформированного состояния.
- профиль напряжений вдоль оси разлома содержит ярко выраженный краевой эффект;

Вывод математического критерия разлома не по резу и определение допустимой границы напряжений сжатия

Номинальные напряжения в центральном сечении, определяющие процесс разлома, являются суперпозицией остаточных и изгибных компонент. В тех областях, где остаточные напряжения сонаправлены с изгибными, разрушение начинается раньше, ещё до достижения общими изгибными напряжениями значения разрушающих.

Направление распространения трещины, в процессе продвижения, задаётся таким образом, что фронт её перпендикулярен максимальным напряжениям растяжения. Если трещина при распространении достигает областей, в которых напряжения изгиба скомпенсированы остаточными напряжениями сжатия, или же области с высокими локальными остаточными напряжениями, ориентированными под углом относительно напряжений изгиба, может произойти её остановка, или поворот фронта в произвольном направлении.

Математически условие разлома не порезу при поперечном резе (разломе) записывается следующим образом:

$$\sigma_{xb} + \sigma_{xm} + \sigma_{xl} \leq \sigma_{yb} + \sigma_{ym} + \sigma_{yl}, \quad (1)$$

где σ_{xl} σ_{xb} σ_{xm} - торцевые, изгибные и мембранные напряжения поперёк оси разлома соответственно; σ_{yb} σ_{ym} σ_{yl} - торцевые, изгибные и мембранные напряжения поперёк вдоль разлома.

Как правило, такой вариант реализуется в центральной области листа в случае больших напряжений сжатия по оси x (рисунок 2).

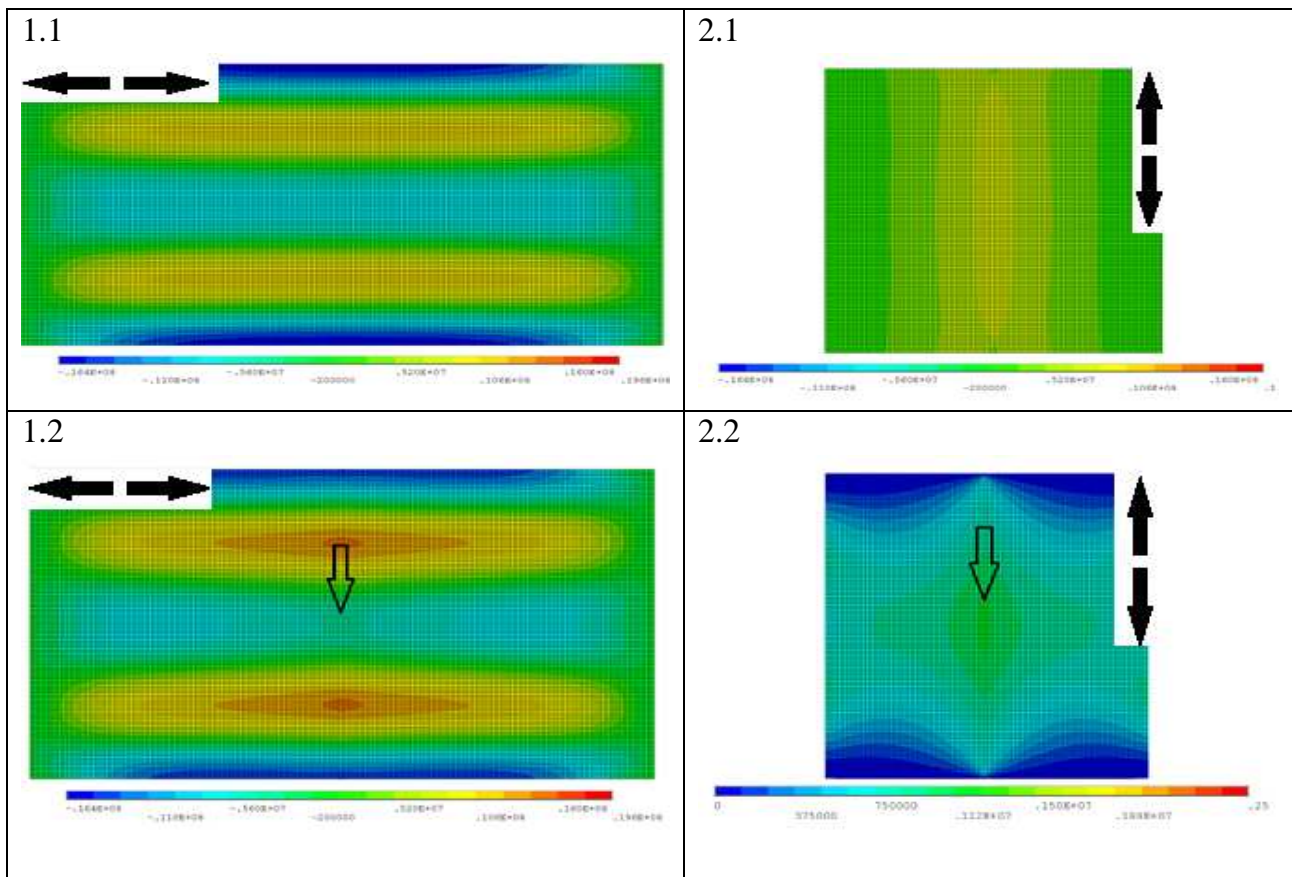


Рис. 2. Разлом не по резу. 1.1 – остаточные напряжения по x; 2.1 – остаточные напряжения по y; 1.2 – суммарные (изгибные плюс остаточные) напряжения по x; 2.2 – суммарные напряжения по y. Стрелкой показана область, в которой напряжения по y превышают напряжения по x

Вышеуказанный критерий разлома не по резу можно преобразовать. Учитывая, что торцевые напряжения одинаковы во всех направлениях (сокращаются), а изгибные пропорциональны (по закону Пуассона), получаем следующее выражение:

$$\sigma_{tm} \leq (\mu - 1)\sigma_{xb}, \quad (2)$$

где σ_{xb} – прочность стекла с резом на изгиб, σ_{tm} – разница главных остаточных мембранных напряжений, измеряемая напрямую с помощью поляризационно-оптического метода.

Следует отметить, что критерий распространяется только на область удалённую от свободного края листа, так как в области, прилегающей к свободному краю, не соблюдается пропорциональность напряжений σ_x и σ_y . На самой свободной поверхности напряжения σ_y равны нулю в силу граничных условий. Таким образом, даже при

значительных напряжениях сжатия вдоль продольной оси, поворот трещины вблизи свободной поверхности маловероятен из-за отсутствия преимущественного направления распространения. Однако, поскольку большие бортовые напряжения сжатия приводят к большим напряжениям растяжения в соседней области, их величина также должна ограничиваться. Проанализировав кривые отжига за 2009-2012 года, было обнаружено, что в худшем случае напряжение сжатие превышает в четыре раза напряжение растяжения в соседней области.

Экспериментально определив предел прочности стекла с резом на изгиб для каждой толщины, по формуле (2) были рассчитаны границы допустимых напряжений сжатия в центральной части листа (табл. 1).

Таблица 1.

Границы допустимых напряжений сжатия

Толщина, мм	3	4	5	6	8	10
$\sigma_{с\ сж}$, МПа	-1,6	-2	-2,4	-2,8	-3,6	-4.2

Определение допустимой границы напряжений растяжения

Как было определено в третьей главе экспериментальной части, бой при резке вызван высокими напряжениями растяжения. Причём трещина начинает своё неконтролируемое распространение спустя едва уловимое время после прохождения ролика. Таким образом, задача сводится к определению критического напряжения растяжения для стекла с нанесённым резом.

Причём предел прочности стекла с резом на растяжений можно рассчитать через уже определённый предел прочности стекла с резом на изгиб.

Как известно, разрушение начинается в том случае, когда коэффициент интенсивности напряжений K_I достигает критического значения K_{Ic} , не зависимо путём растяжения или изгиба. Таким образом мы можем приравнять данные величины:

$$K_{Ic} = \sigma_{cb} \sqrt{\pi l} Y_b = \sigma_{ct} \sqrt{\pi l} Y_t \tag{3}$$

Откуда:

$$\sigma_{ct} = \sigma_{cb} \frac{Y_b}{Y_t}, \tag{4}$$

где σ_{ct} - предел прочности на растяжение, Y_t и Y_b геометрический фактор для растяжения и изгиба соответственно.

Остаётся определить соотношение геометрических факторов для случаев изгиба и растяжения, что проводилось с помощью ПО ANSYS Structural 14.0. Были получены следующие результаты:

Затем по формуле (4) были рассчитаны допустимые границы напряжений растяжения. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Граница допустимых напряжений растяжения

Толщина,	σ_{cb} , МПа	Y_b/Y_t	σ_{ct} , МПа
3	-1,6	0,92	1,5
4	-2		1,8
5	-2,4		2,2
6	-2,8		2,6
8	-3,6		3,3
10	-4,2		3,9

В итоге получены следующие допустимые границы мембр.напряжений (табл. 3):

Таблица 3.

Границы допустимых мембранных напряжений

Толщина	$\sigma_{с сж}$	$\sigma_{с раст}$	$\sigma_{с край}=4 \sigma_{с раст}$
3	-1,6	1,5	-6
4	-2	1,8	-7,2
5	-2,4	2,2	-8,8
6	-2,8	2,6	-10,4
8	-3,6	3,3	-13,2
10	-4,2	3,9	-15,6

Проверка полученных значений проводилась путём резки образцов стекла с заданным уровнем остаточных мембранных напряжений.

Для примера приводим результаты эксперимента для стекла толщиной 4 мм по проверке допустимого уровня напряжений растяжения (рис. 6).

Резка образцов с уровнем напряжений растяжения ниже допустимого (1,8 МПа) происходила без замечаний. Однако, можно было почувствовать, что с ростом напряжений растяжения разлом становится легче.

Для образца с уровнем напряжений 1,98 МПа, после нанесения реза (до разлома) начался самопроизвольный рост трещины в области напряжений растяжения (рис. 6,1.3), что на большом формате привело бы к отбраковке стекла.

При уровне напряжений 3,47 МПа самопроизвольный рост трещины происходил более стремительно (с разветвлением) (рис. 6,.2.3).

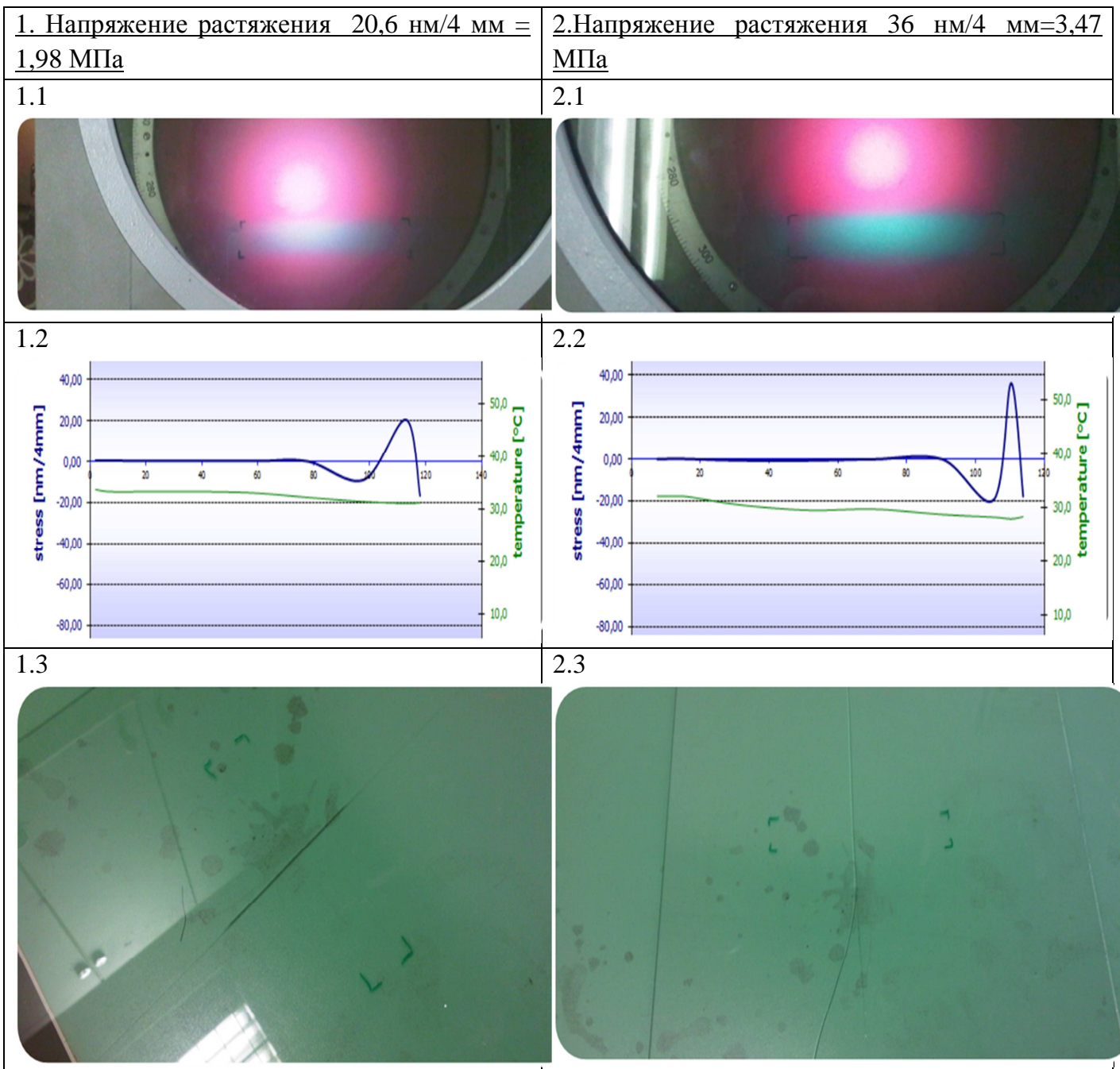


Рис. 6. Результаты экспериментального определения допустимой границы напряжений растяжения для стекла толщиной 4 мм. 1.1, 2.1 - вид термообработанных образцов на полярископе; 2.1, 2.2 – кривая напряжений; 3.1, 3.2 – резка образцов

Подобным образом были проверены допустимы границы мембранных напряжений для каждой толщины стекла. В целом экспериментальные результаты совпали с расчётными с точностью до 92%, что подтверждает их достоверность.

В пятой главе экспериментальной части описано определение величины допустимых торцевых напряжений.

Торцевые напряжения одинаковы во всех направлениях, поэтому не приводят к разлому не по резу.

Также торцевые напряжения не приводят к бою при резке, поскольку высокие торцевые напряжения означают высокие напряжения сжатия на поверхности, которые упрочняют стекло.

Однако, с точки зрения механики разрушения, увеличение прочности приводит к увеличению величины упругой энергии деформации, накопленной к моменту разрушения, а значит, к увеличению рельефа поверхности – ухудшению качества резки. Поэтому их также следует ограничивать.

Для качества кромки стекла в готовых изделиях существуют аналогичные нормы в ГОСТах на различные виды стёкол и стеклопакеты, а именно п 5.1.2 «Стеклопакеты должны иметь ровные кромки и целые углы. Щербление края стекла в стеклопакете, сколы, выступы края стекла, повреждение углов стекла не допускаются». Эта норма является довольно субъективной, учитывая то, что при резке толстых стёкол, на кромке практически всегда имеются небольшие раковины или выступы. В среде переработчиков широкое распространение получило следующее правило: сколы и выступы не должны проникать на глубину равную половине толщины стекла. Данное правило и прописывается в договорах между переработчиками (производителями стеклопакетов) и их заказчиками, поэтому оно было взято за основу при определении границ допустимых торцевых напряжений.

Допустимые границы определялись путём резки образцов стекла с заданным уровнем торцевых напряжений. Величина неровностей поверхности определялась с помощью штангель-глубиномера.

В ходе экспериментов определено, что с ростом уровня напряжений рельефность поверхности увеличивается, и достигает допустимой границы при определённом уровне, различном для каждой толщины.

Получены следующие значения критических торцевых напряжений (табл. 4).

Таблица 4.

Границы допустимых торцевых напряжений

Толщина, мм	3	4	5	6	8	10
$\sigma_{с\ тор}$, МПа	1	1,2	1,4	1,7	2,2	2,5

В шестой главе экспериментальной части приведены практические рекомендации по резке стекла с высокими остаточными напряжениями.

Для случая разлома не по резу, рекомендации основаны на принципе релаксации напряжений в процессе резки. Максимальные напряжения (сжатия) сосредоточены в краевой области. Поэтому разлом листа необходимо начинать с так называемой подрезки (поскольку для листа формата 3,21х6 м. согласно ГОСТ имеются сравнительно большие допуски по размерам, переработчики отрезают небольшую часть по краям листа для получения листа точного размера). После отлома подрезки и удаления части листа с наибольшими напряжениями, общий уровень напряжений значительно снижается и дальнейший разлом листа становится проще. При необходимости следует увеличить ширину подрезки.

Как показывает практика, сама подрезка отламывается без проблем, вследствие краевого эффекта, заключающегося в том, что на свободной поверхности тела нормальные напряжения равны нулю и они не возрастают мгновенно, в результате получается определённая с безопасным уровнем напряжений.

На основании закономерностей распределения напряжений во флоат-стекле разработаны следующие рекомендации: разлом в центральной части листа нужно начинать с продольных резов, продолжать с поперечных резов ближе к краю и заканчивать поперечным резом в центре.

В случае боя при резке достаточно проблема заключается в низкой прочности стекла, поэтому достаточно снизить давление ролика.

При высоких торцевых напряжениях стекло с одной стороны более прочное за счёт напряжений сжатия в поверхностных слоях, с другой - более хрупкое за счёт напряжений растяжения в центре. Разлом стекла получается более жестким, а качество кромки плохим (зазубрины, раковины, выступы). Для решения этой проблемы необходимо увеличить давление резки, что приведёт к образованию более глубокой трещины и релаксации напряжений по толщине стекла.

Указанные рекомендации многократно опробовались на практике во время моих визитов к переработчикам в связи с проблемами при резке. С их помощью практически во всех случаях удавалось значительно снизить процент отбракованного стекла (составлены двухсторонние акты).

Выводы:

1. Установлено, что торцевые напряжения, возникающие вследствие неравномерности охлаждения поверхностных и внутренних слоёв стекла, одинаковы по всем направлениям и практически постоянны для данной толщины стекла и скорости охлаждения.
2. Вследствие бортового эффекта и продольного расположения теплообменников, существует неравномерность охлаждения по ширине флоат-ленты, приводящая к появлению мембранных напряжений, направленных вдоль линии вытягивания стекла. Мембранные напряжения, направленные поперёк линии вытягивания, при стабильном процессе отжига практически отсутствуют.
3. Экспериментальным образом определено, что разлом не по резу вызван высокими мембранными напряжениями сжатия в центральной части листа. Причём угол, под которым трещина поворачивает с реза, пропорционален величине остаточных напряжений. Бой при резке связан с высокими мембранными напряжениями растяжения.
4. Путём моделирования с помощью ПО ANSYS Structural версии 14.0 было определено напряжённое состояние в стекле при разломе. В сечениях, находящихся на удалении от свободного края (порядка 200 мм), реализуется плоское деформированное состояние. На торцевой поверхности реализуется плоское напряжённое состояние. Оси главных изгибных и мембранных напряжений совпадают.
5. Определены границы допустимых мембранных и торцевых напряжений. Полученные значения подтверждены путём резки образцов стекла с соответствующими значениями постоянных напряжений.
6. Разработаны практические рекомендации для резки стекла с высокими остаточными напряжениями. В случае разлома не по резу следует увеличить ширину стандартной подрезки и изменить порядок разлома. В случае боя при резке необходимо уменьшить давление ролика, а в случае высоких торцевых напряжений – увеличить.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Смирнов М. И., Спиридонов Ю. А., Карапетян А. Р. Современные технологии резки листового стекла // Стекло и керамика. 2011. №1. С. 23-27.
2. Саркисов П. Д., Смирнов М. И., Спиридонов Ю. А., Карапетян А. Р. Влияние остаточных напряжений флоат-стекла на качество резки // Стекло и керамика. 2012. №5. С. 11-15.
3. Смирнов М. И., Спиридонов Ю. А., Плотников А.С., Карапетян А. Р. Расчётные методы определения влияния напряжений на качество резки // Стекло и керамика. 2013. №1. С. 15-19.
4. Саркисов П. Д., Смирнов М. И., Спиридонов Ю. А., Карапетян А. Р. Возможные проблемы и их причины при механической резке листового стекла // IV Всероссийская конференция по химической технологии с международным участием ХТ'12. Москва, 18-23 марта 2012. Тезисы докладов. С.76-78.
5. Карапетян А.Р. Исследование причин боя в процессе резки стекла // VI Всероссийская конференции молодых учёных, аспирантов и студентов с международным участием «Менделеев-2012». Санкт-Петербург, 3-6 апреля 2012. Тезисы докладов. С. 217-219.
6. Саркисов П. Д., Смирнов М. И., Спиридонов Ю. А., Карапетян А. Р. Исследование причин боя в процессе резки стекла // Стекло и бизнес. 2012. №2. С. 56-59.
7. Карапетян А.Р. Механическая роликовая резка стекла. Основные характеристики и проблемы // IV Международная заочная научно-практическая конференция «Научная дискуссия: вопросы технических наук». Москва, 12 ноября 2012 г. Сборник тезисов. С. 68-73.
8. Карапетян А.Р. Спиридонов Ю.А. Влияние остаточных напряжений на качество резки флоат-стекла // Всероссийская научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии – НМТ-2012». Москва, 20-22 ноября 2012 года. Тезисы докладов. С. 69.
9. Саркисов П. Д., Смирнов М. И., Спиридонов Ю. А., Карапетян А. Р. Механическая роликовая резка. Основные характеристики и проблемы // Стекло и бизнес. 2013. №1. С. 60-65.

Заказ №

Объем 1,0 п.л.

Тираж 100 экз.

Издательский центр РХТУ им. Д.И. Менделеева