

## **ПРОБЛЕМЫ ПРИ РЕЗКЕ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА**

к.х.н. Смирнов М.И. (ООО «Эй Джи Си Флэт Гласс Восток»), инж. Мотин В.И. (ОАО «ГИС-Промпереработка»), к.т.н. Чесноков А.Г. (ОАО «Институт Стекла»), Москва

### **Введение**

Как известно, качество реза стекла является важным показателем, как для переработчиков листового стекла, так и для потребителей их продукции (закаленных и многослойных стекол, стеклопакетов). Проблемы при резке приводят к увеличению отходов стекла (из-за разлома не по резу), повышению трудоемкости продукции (появляются дополнительные операции по удалению осколков стекла), увеличению опасности травматизма (больше вероятность разрушения стекла при его переноске, труднее переносить осколки стекла неправильной формы). Плохое качество реза снижает прочностные характеристики листов стекла конечного размера, что повышает риск самопроизвольного разрушения остекления по тем или иным причинам. В частности это касается термического шока окрашенных в массу стекол и появления трещин у вертикально стоящих стекол в местах их опирания на подкладки.

Вопрос этот очень сложный и комплексный. К сожалению, всеобъемлющих рекомендаций по резке листового стекла не существует. Многие определяются опытом технолога и резчика. В настоящей статье вопрос резки рассматривается, в основном, применительно к флоат-стеклу. Однако, основные факторы, влияющие на качество реза, а также большинство данных рекомендаций сохраняют свое значение и для остальных видов листового стекла.

### **Современные технологии резки листового стекла**

Наиболее распространенной современной технологией раскроя флоат-стекла является роликовая резка (см. фото 1). Ролики для резки стекла имеют клиновидное тупоугольное сечение и изготавливаются из твердых сплавов (главным образом, на основе карбида вольфрама). Угол заточки применяемого ролика зависит от толщины стекла. При этом раскрой протекает в два этапа: сначала делается надрез, то есть наносится царапина (желобок) с возникающей под ней цепочкой трещинок (обычно от края до края листа стекла при прямолинейном резе), а затем поперек линии реза прикладывается усилие на изгиб (производится разлом). Такая резка стекла является не резкой в обы-

денном понимании этого слова (такой, как резка хлеба), а созданием в стекле микротрещин под действием режущего ролика, вдоль которых затем происходит раскол стекла.



Фото 1. Режущая головка

Необходимо отметить, что от желобка отходят многочисленные микротрещины в самых разных направлениях (см. рис. 1). По направлению все микротрещины можно разделить на три группы [1]: поверхностные трещины, боковые трещины и срединная трещина (называемая также «основной», «нормальной» и «глубокой» трещиной). Для правильного раскроя необходимо, чтобы разлом листа в любой точке реза шел по срединной трещине (перпендикулярно поверхности листа стекла). Хорошее качество кромки обеспечивается при «мягком» и равномерном по длине реза разломе, то есть разломе при небольшом постоянном усилии по всей длине реза. Это достигается, если срединная трещина направлена строго нормально к поверхности стекла и не содержит боковых ответвлений. Число силикатных связей, которые нужно разорвать, в этом случае будет мало, в то время как при «жестком» разломе потребуется большее усилие, часто приводящее к нежелательному направлению трещины (особенно при фигурной резке). Это вызвано непредсказуемым развитием срединной трещины по боковым ответвлениям (поверхностным трещинам). Поэтому при разломе стекло будет ломаться не только по желаемой линии резки, но и в других направлениях. Рез получается волнообразным.

## Жидкости для резки

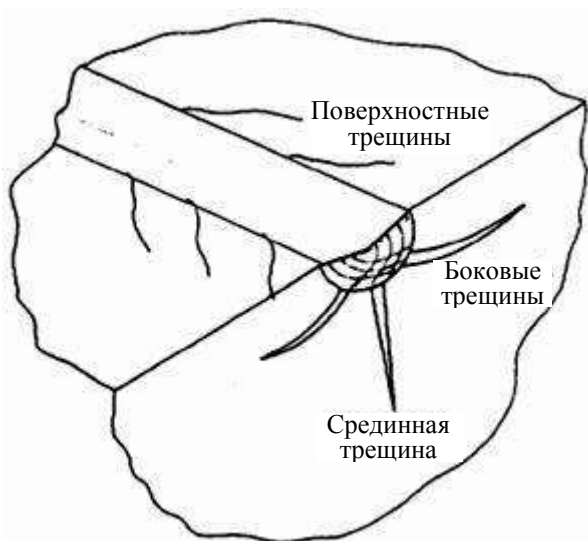


Рисунок 1. Схема образования трещин в стекле под действием режущего ролика

Под ролик подается жидкость для резки, которая смазывает ролик, очищает поверхность стекла от загрязнений (они всплывают на поверхность жидкости), улучшает равномерность его движения по поверхности стекла, стабилизируя усилие давления ролика на поверхность во время резки, и уменьшает поверхностную прочность стекла (за счет добавок поверхностно активных веществ (ПАВ) благодаря эффекту Ребиндера).

Все это приводит к более длительному

сроку службы ролика и появлению более равномерной срединной трещины в стекле, снижая число «вредных» поверхностных и боковых трещин.

Если имеется временной промежуток между резкой (формированием трещины) и разломом, трещина имеет тенденцию «залечиваться». С физико-химической точки зрения, стекло представляет собой очень вязкую жидкость, и основание трещины может «заплыть» за счет повторного соединения силикатных связей, разорванных при формировании микротрещин. С технической точки зрения это означает, что спустя некоторое время (в зависимости от температуры, влажности, состояния поверхности и толщины стекла), будет ухудшаться качество реза в момент разлома стекла.

Жидкости для резки проникают в трещину и предохраняют ее от «залечивания». Кроме того, используемые жидкости для резки обладают раскливающим эффектом и увеличивают размеры всех трещин, в особенности «полезных» срединных, поскольку их изначальный средний размер больше и условия для поступления жидкости (под действием капиллярных сил) в срединную трещину лучше. Таким образом, применение жидкости для резки облегчает разлом стекла и улучшает качество реза. Кроме того, стеклянная крошка, образующаяся при резе, прилипает к смоченной жидкостью кромке, и загрязнение стола резки стеклянной крошкой уменьшается.

В прошлом, в стекольной промышленности для роликовой резки стекла использовались технические углеводороды (главным образом керосин и смесь керосина с глицерином). Эти жидкости плохо удалялись при мойке стекла. В настоящее время используются более сложные составы жидкостей для резки стекла, в том числе два основных их типа: водорастворимые и испаряющиеся.

Водорастворимые жидкости демонстрируют лучшие свойства разлома по сравнению с испаряющимися и используются там, где требования к резке наиболее высоки (толстые номиналы, фигурная резка и т.д.).

Испаряющиеся жидкости (на основе легких углеводородов) в течение некоторого времени после резки полностью испаряются, не оставляя на поверхности стекла никаких веществ, могущих создать проблемы на последующих стадиях обработки. Они рекомендованы, в частности, для резки стекол с магнетронными покрытиями.

Выбор той или иной марки жидкости для резки зависит от типа стекла, его толщины, температуры поверхности, используемого оборудования и системы нанесения жидкости (здесь играет роль вязкость жидкости). Поэтому при выборе марки жидкости следует ориентироваться на рекомендации производителей столов для резки и производителей стекла.

### **Другие современные технологии резки листового стекла**

В случаях, когда невозможно совершить разлом стекла по резу, сделанному только с одной стороны изделия, например, при резке многослойного или армированного стекла, применяют двухстороннюю резку. В этом случае, режущие головки располагаются строго симметрично с разных сторон стекла. После нанесения с обеих сторон линии реза производят разлом обоих стекол, а затем разрезают или пережигают промежуточный полимерный слой (проволочную сетку). Для резки многослойных стекол с числом листов стекла более двух или стекол очень высокой толщины используют дисковые алмазные пилы или гидроабразивную резку.

В последнее время определенное распространение получила также технология лазерного термораскалывания стекла (в частности при резке флоат-ленты) [3]. За счет локального нагрева стекла лучом углекислого или полупроводникового лазера создаются термические напряжения, превышающие предел прочности материала и происходит формирование трещины. Перемещение источника нагрева (луча лазера) по поверхности

стекла позволяет управлять направлением распространения трещины и получать гладкую линию реза.

### **Оборудование для резки листового стекла**

Основным оборудованием для резки стекла в настоящее время являются автоматические и полуавтоматические резные столы, которые могут иметь одну или несколько режущих головок (как с одной стороны стекла, так и с двух), обеспечивать их движение как по прямым линиям параллельно осям координат, так и криволинейное движение. Кроме того, резные столы могут оснащаться дополнительными секциями: загрузочной и разгрузочной, автоматического разлома стекла и т.д. На сегодняшний день лидерство на мировом рынке оборудования для резки листового стекла принадлежит следующим производителям: швейцарская компания Bystronic; итало-финский концерн Glaston (торговая марка для оборудования обработки листового стекла – Bavelloni); немецкие концерны Grenzebach и HEGLA; австрийская компания LISEC; итальянские компании Bottero, Macotec, Maver Glass, Intermac (подразделение группы Biesse), Griggio, CAU S.R.L, китайская компания North Glass.

### **Основные факторы, влияющие на качество резки листового стекла**

На качество реза влияет много технологических факторов – тип и качество роликов, качество их закрепления в режущей головке, давление и скорость резки, марка жидкости для резки и равномерность ее поступления, вид и толщина стекла, качество (шероховатость, наличие царапин, посечек, поверхностных пузырей и камней) и температура его поверхности, типоразмер листов стекла, карта раскроя, распределение напряжений в стекле (кривая отжига) и т.д.

### **Влияние параметров резки на качество реза.**

Качество реза зависит от количества и глубины микротрещин (в особенности срединных). При уменьшении угла заточки ролика, увеличении давления и скорости реза средняя глубина срединных трещин увеличивается, что положительно влияет на качество реза [1]. Однако, при этом также увеличивается глубина поверхностных и боковых трещин. Кроме того, при этом увеличивается разброс по глубине срединных трещин. Эти факторы ухудшают качество реза и увеличивают вероятность разлома не по резу. Все это приводит к тому, что существуют оптимальные для качества реза значения угла заточки ролика, давления и скорости реза. Эти оптимальные значения зависят от толщи-

ны стекла и остаточных напряжений в стекле. Большинство производителей резного оборудования приводят свои рекомендации по параметрам резки различных видов стекол в документации к оборудованию. Очень важным также является правильное закрепление ролика в режущей головке: он должен свободно вращаться вокруг своей оси, при этом оставаясь перпендикулярным плоскости стекла. При проскальзывании ролика образуется большое число трещин, параллельных поверхности и происходит выкрашивание кромки стекла. При наклонном расположении ролика основная трещина проходит не перпендикулярно поверхности стекла и рез получается тоже неперпендикулярный. Если ролик качается на своей оси, то рез получается прерывистый и волнистый и, соответственно, разлом будет непрямолинейный.

На рисунке 2 проиллюстрировано влияние правильности подбора параметров резки на качество реза (рез выполнялся роликами с одинаковыми углами заточки и при одинаковом давлении, но при различной скорости резки).

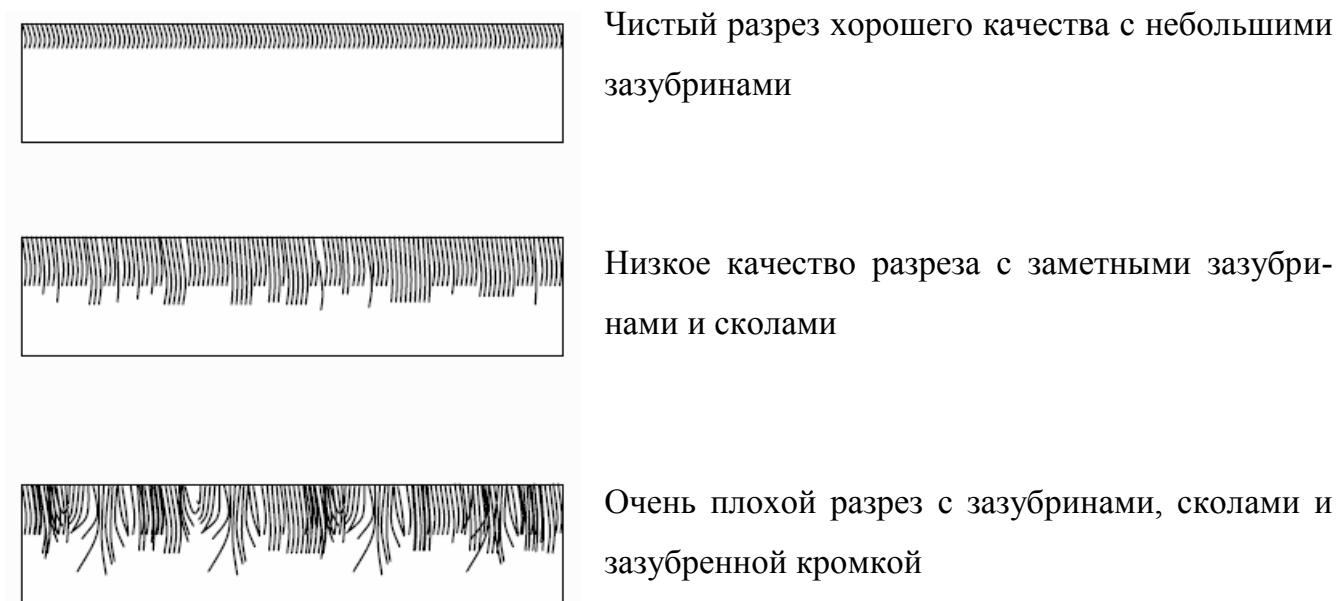


Рис. 2. Влияние параметров резки на качество реза

### **Подбор параметров резки в зависимости от толщины стекла.**

#### ***Влияние угла заточки ролика***

Критическая нагрузка развития микротрещины зависит от ее глубины. При разломе, в случае больших нагрузок на изгиб, прикладываемых к резу, необходимо обеспе-

чить большую разницу в размерах между срединными и прочими трещинами. Вместе с тем, глубина трещин здесь не слишком важна, поскольку при больших нагрузках на изгиб, приложенная нагрузка превышает критическую для большинства срединных трещин. В результате, например, для резки стекла большой толщины, необходимо подбирать параметры резки таким образом, чтобы уменьшить количество поверхностных и боковых трещин, пусть даже и за счет общего уменьшения размеров всех трещин, в том числе и «полезных» срединных. По этой причине для резки стекол большой толщины производителями оборудования рекомендуются ролики с большим углом заточки. В зависимости от толщины стекла и используемого оборудования применяются ролики с углом заточки от  $110^\circ$  (для тонкого стекла) до  $165^\circ$  (для толстого). Так, например, компания Bottero для своих столов резки рекомендует использовать следующие ролики в зависимости от толщины стекла: 4-6 мм -  $145^\circ$ , 8-19 мм –  $155^\circ$ , 25 мм –  $160^\circ$ . При увеличении толщины стекла также рекомендуется увеличивать давление резки и уменьшать ее скорость.

Рекомендации компании Vohle по выбору угла заточки ролика для прямоугольного раскроя флоат-стекла приведены в таблице 1.

Таблица 1. Рекомендуемые углы заточки ролика (диаметром 5 мм)

Толщина стекла	Угол заточки
0,8-1,0 мм	$110^\circ$
1,0-2,0 мм	$120^\circ$
2,0-3,0 мм	$130^\circ$
3,0-4,0 мм	$135^\circ$
4,0-10,0 мм	$140^\circ$
5,0-12,0 мм	$145^\circ$
8,0-15,0 мм	$150^\circ$
10,0-20,0 мм	$155^\circ$
20,0-25,0 мм	$160^\circ$

На рисунке 3 проиллюстрировано влияние угла заточки ролика на поверхность стекла. Ширина реза у ролика с тупым углом заточки больше, чем у ролика с острым углом заточки. Вместе с тем, угол заточки ролика влияет также на формирование средин-

ной трещины, поскольку распределение напряжений сжатия при резе, создаваемых усилием, приложенным к ролику, зависит от его угла заточки (рис.4 и 5).

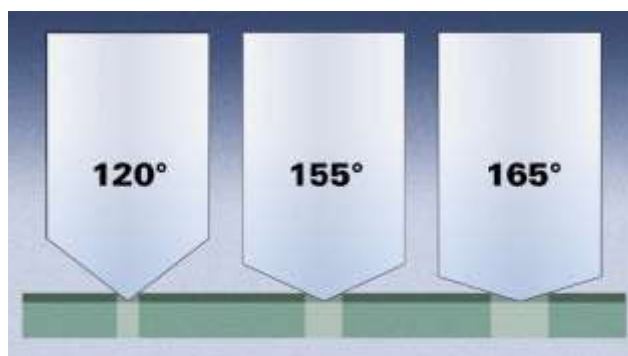


Рис. 3. Влияние угла заточки ролика на ширину реза

**Направление усилий при резке:**

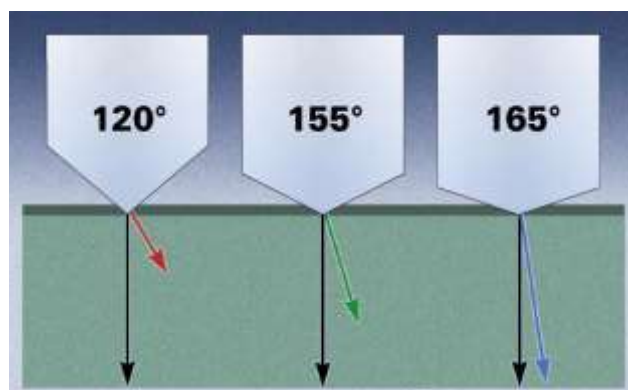


Рисунок 4. Распределение по толщине стекла напряжений, создаваемых роликом:

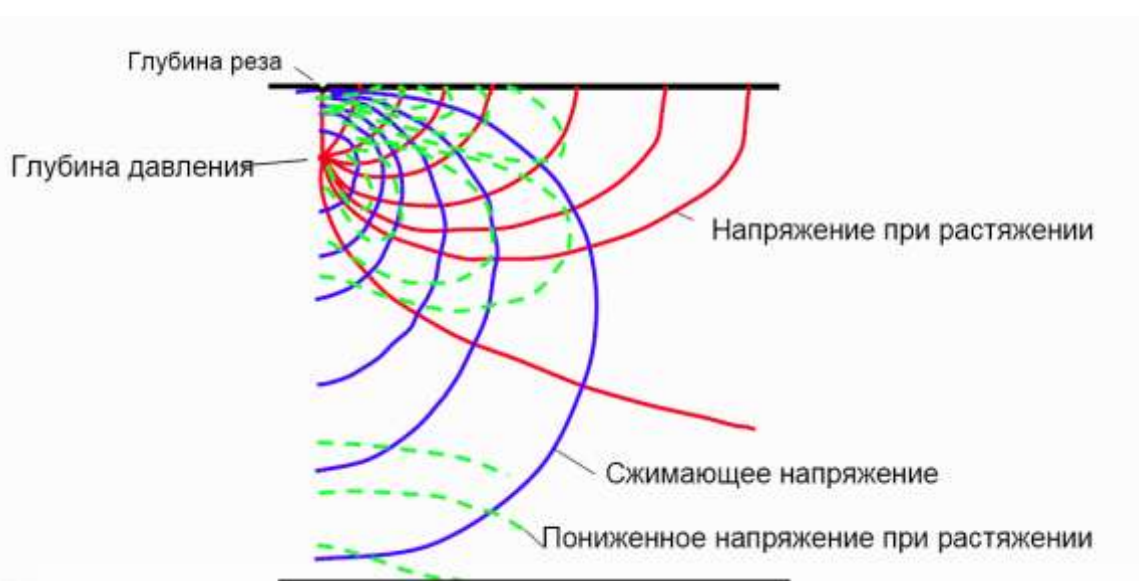


Рисунок 5. Распределение напряжений в стекле



### ***Влияние давления при резке***

Усилие ролика является важнейшим параметром резки (см. рис. 6). На рисунке представлены фотографии (в поляризованном свете) кромки стекла. Резка выполнялась роликами с одинаковым углом заточки ( $135^\circ$ ), но при различном давлении: 35 Н, 100 Н и 35 Н (фотография через 30 минут после резки).

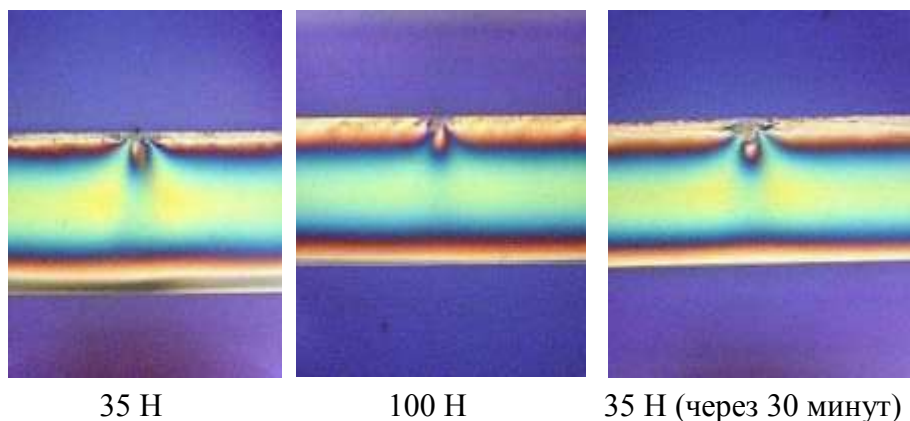
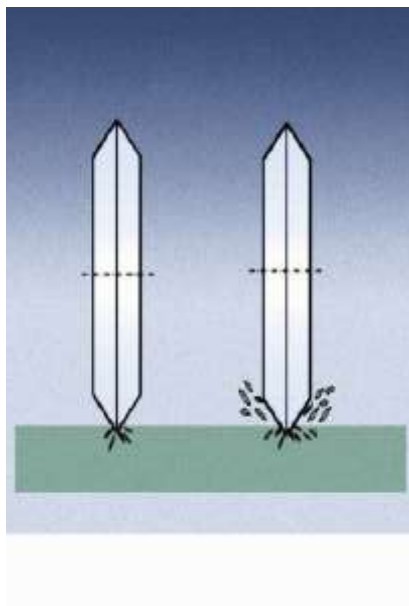


Рисунок 6. Распределение напряжений в стекле

На рисунке 7 проиллюстрированы причины ухудшения качества реза при слишком высоком давлении:



Подходящее давление      Слишком высокое давление

Рисунок 7. Влияние давления на качество реза

### ***Влияние скорости резки***

Скорость резки меньше влияет на качество реза, чем давление. На практике, как правило, при увеличении давления (например, при увеличении толщины стекла) необходимо снижать скорость резки. Кроме того, скорость резки необходимо снижать при резке стекла с неровной поверхностью, например, узорчатого или армированного.

### ***Влияние состояния поверхности стекла на качество реза***

В зависимости от вида и марки стекла, размеров его листов нормативные документы допускают определенное количество дефектов на поверхности стекла (царапин, посечек, поверхностных пузырей и камней и т.д.). Попадание таких дефектов на линию реза может приводить к прерываниям основной трещины, ее локальному повороту, образованию сколов в этих местах и боковых трещин, по которым в последствии может пойти разлом, что, соответственно, приведет к непрямолинейному резу. Поэтому такие дефекты должны быть выявлены до начала раскроя листа стекла, и карта его раскроя должна быть составлена таким образом, чтобы линия реза не проходила по дефектам.

В случае попадания в зону реза участков с высокой шероховатостью поверхности (потертости, выщелачивание стекла) ролик не может обеспечить равномерную глубину основной трещины из-за его вертикальных колебаний на неровностях рельефа поверхности стекла. Поэтому образуется большое число боковых трещин, что также приводит к непрямолинейному краю стекла. Эти зоны также желательно обойти при составлении карты раскроя.

Наиболее сложная ситуация возникает при резке узорчатого и армированного стекла, у которых вся поверхность имеет сложный рельеф. В этом случае резка стекла должна производиться с минимальной скоростью, чтобы обеспечить наилучшие условия для огибания роликом выступов и вогнутостей поверхности и исключения его ударов о выступы.

### **Напряжения в листовом стекле**

#### ***Причины образования напряжений во флоат-стекле***

Скорость остывания стекломассы в ленте флоат-стекла неодинакова в разных зонах. Поверхность флоат-ленты и торцы остывают, естественно, быстрее центра. Пока температура стекла превышает температуру размягчения (нижнюю температуру отжига) слои стекломассы, остывая с различной скоростью, сжимаются и скользят друг относи-

тельно друга. Однако, в определенный момент времени, температура обеих поверхностей ленты падает ниже температуры размягчения стекла, а центральная (по толщине) зона ленты еще находится в размягченном состоянии.

С этого момента температурное сжатие центра флоат-ленты приводит к механическому сжатию поверхностей. С того же момента, когда температура центральной зоны ленты падает ниже температуры размягчения, поверхности, находящиеся в сжатом состоянии, формируют напряжения растяжения в центральных слоях ленты. Графически, этапы формирования напряжений этого рода представлены на рисунке 8 [4].

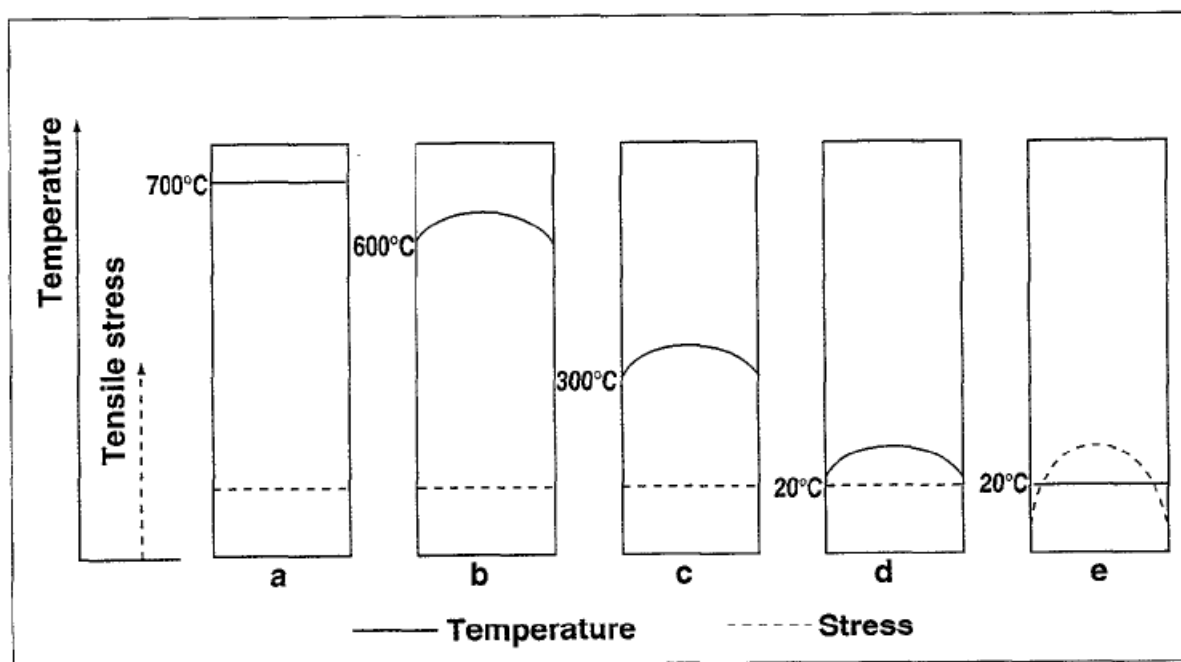


Рисунок 8. Формирование напряжений в стекле

Таким образом, в готовом флоат-стекле поверхности листа находятся всегда в сжатом состоянии, а центр – в растянутом. Графически, распределение напряжений по толщине стекла представлено на рисунке 9.

Необходимо отметить, что нанесение на верхнюю сторону флоат-ленты пиролитического покрытия приводит к неравномерности остывания поверхностей флоат-ленты друг относительно друга. Верхняя поверхность (сторона с покрытием) остывает существенно медленнее за счет снижения теплоотдачи путем излучения. Это приводит к несимметричности распределения напряжений сжатия и растяжения для таких стекол по

толщине листа. Особенно сильно эта неравномерность проявляется при нанесении низ-  
коэмиссионных покрытий.

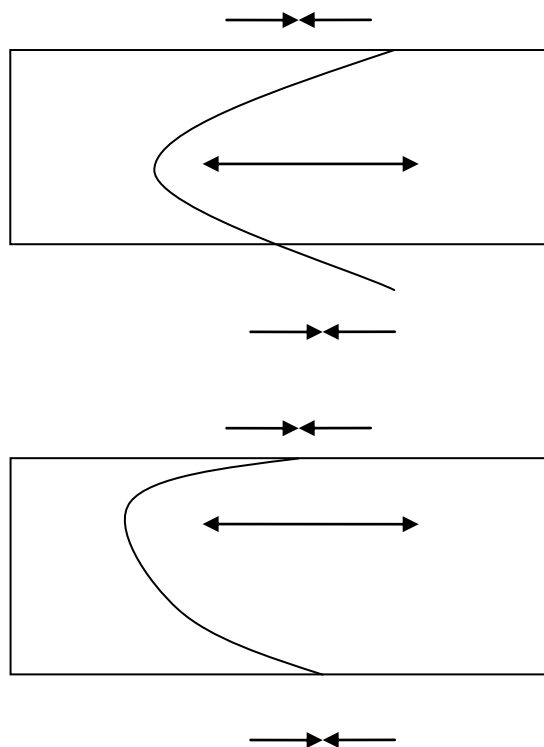


Рисунок 9. Распределение напряжений в листовом стекле и в стекле с пиролитическим покрытием.

Борта флоат-ленты, аналогичным образом, остывают быстрее ее середины. Это приводит к тому, что в остывшей флоат-ленте, ее борта находятся в сжатом состоянии, а середина – в растянутом. Это же относится к полноразмерным листам стекла (формат PLF) (см. рис. 10).

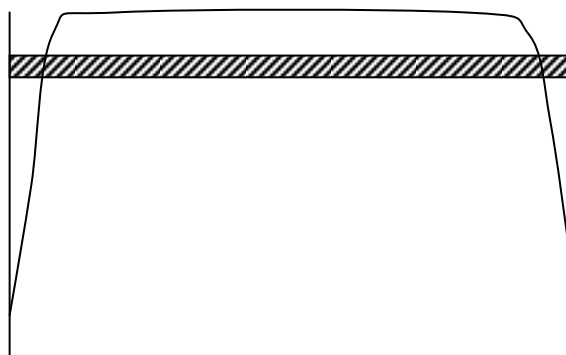


Рисунок 10. Распределение напряжений по листу стекла

### ***Методы контроля напряжений во флоат-стекле***

Основные методы инструментального контроля остаточных напряжений во флоат-стекле основаны на явлении двулучепреломления. Из-за наличия остаточных напряжений стекло приобретает анизотропию свойств, в том числе и оптических характеристик. В частности, показатель преломления света в стекле, зависит от его направления относительно существующих напряжений. В результате, при преломлении поляризованного света в стекле, преломленный луч разделяется на два – обыкновенный и необыкновенный. Показатель преломления в направлении обыкновенного луча отличается от соответствующего показателя для необыкновенного. Иначе говоря, скорость распространения света в стекле по направлению этих лучей отличается, что приводит к соответствующей разности хода, измеряемой в нанометрах на 1 см пути луча в стекле.

Напряжения в стекле связаны с показателем разности хода следующим соотношением:  $P = \frac{\Delta}{B}$

где:  $\Delta$  – разность хода лучей, мкм

$B$  – оптическая постоянная упругости стекла, значение которой зависит от состава стекла и для натрий-кальций силикатного стекла составляет  $2,6 \times 10^{-3}$  нм/(см·Па). Иначе говоря, увеличение остаточного напряжения в стекле на  $4 \times 10^2$  МПа приводит к увеличению наблюдаемой разницы хода лучей примерно на 1 нм/см.

Существуют два основных метода определения остаточных напряжений использующих эффект двулучепреломления, которые в литературе принято называть Senarmont и Babinet (по разработчикам принципов действия поляриметров). Эти способы отличаются лишь оптической схемой просвечивания стекла поляризованным светом.

В методе Senarmont поляризованный свет направляется от одной поверхности флоат-ленты к другой. Соответственно, измеряются напряжения, направленные вдоль линии вытягивания стекла (фиксируется кривая отжига).

В способе Babinet из ленты флоат-стекла вырезается образец небольших размеров и просвечивается поляризованным светом от одной кромки к другой. Соответственно, измеряются напряжения, обусловленные сжатием наружных поверхностей листа и растяжением центральной зоны. Подробно методики контроля напряжений в стекле описаны в [5].

### ***Влияние напряжений во флоат-стекле на качество резки***

Принято считать, что для обеспечения хорошего качества реза, величина остаточных внутренних напряжений стекла, не должна быть выше примерно 5 % от предела прочности стекла на изгиб (обычно находящегося в пределах 40-80 МПа). Исходя из этого критерия, разность хода лучей должна составлять не более 50-100 нм/см. Некоторые нормативные документы устанавливают требования к значениям остаточных внутренних напряжений. Так, в соответствии с п. 5.1.4 ГОСТ 111-2001 напряжения в бесцветном флоат-стекле, характеризуемые разностью хода лучей при двулучепреломлении, не должны превышать 70 нм/см [2]. Кроме этого, большое значение имеет распределение напряжений, как по толщине листа стекла, так и по ширине флоат-ленты (поперек линии вытягивания). При неравномерном распределении напряжений, трещина проходит по зонам с максимальными напряжениями, а не по прямой линии, что приводит к разлому, неперпендикулярному поверхности стекла, появлению сколов, щербин и боковых трещин вдоль линии разлома и в результате к разлому не по линии реза. На сегодняшний день, распределение напряжений по толщине листа стекла или по ширине флоат-ленты, пока не нормируется.

### **Требования нормативных документов по качеству реза листового стекла**

В нормативных документах на листовое стекло (например, [2]) требования к качеству реза обычно напрямую не нормируются и задаются в через следующие параметры, на которые влияет качество реза:

- допуски на размеры листов стекла;
- допуски на отклонение от прямоугольности листов стекла;
- допуски на отклонение от прямолинейности сторон листов стекла;
- допуски на количество и размеры пороков внешнего вида (в том числе сколов, щербин, трещин).

Кроме того, требования к качеству реза могут быть заданы через требования к качеству продукции, которая изготавливается из данных листов стекла. Например, через требования к состоянию кромки закаленных и многослойных стекол, стеклопакетов. Иногда потребители листов стекла закладывают в договорах (контрактах) поставки свои требования к качеству реза, например, требования к максимальному размеру сколов и щербин на кромке стекла.

### **Общие рекомендации при проблемах с резкой**

1. При обнаружении разлома стекла не по резу следует в первую очередь проверить оборудование для резки: ролик (его фиксацию в головке и заточку), поступление жидкости и пр., а также работу разломочного оборудования.

2. Внутренние напряжения в стекле всегда выше к краям, параллельным линии вытягивания (для размера PLF - сторона 6 м, для размера DLF - сторона 2,25 м). По этим сторонам следует обязательно делать отбортовку. При необходимости - увеличить стандартную ширину отбортовки.

3. Края листа могут быть повреждены при транспортировке. Заколы на кромках и посечки также могут служить причиной лома не по резу, если линия реза проходит близко от такого дефекта. Следует делать отбортовку.

4. Чаще всего, проблемы при резке могут быть решены подбором параметров резки. Если обнаружен разлом не по резу и причины его не ясны, проблему обычно удается частично или даже полностью устранить, подобрав оптимальные для данного стекла параметры: давление и скорость резки.

5. Многих проблем с резкой стекла удастся избежать при качественном проведении входного контроля поступающего стекла по всем показателям ГОСТ с целью учета его дефектов при разработке карты раскроя и настройке оборудования.

### **Литература**

1. M. V. Swain "Median crack initiation and propagation beneath a disc glass cutter" – Glass Technology Vol. 22 No.5 October 1981;
2. ГОСТ 111-2001 «Стекло листовое. Технические условия»;
3. W. FRIEDL "On-Line Laser Cutting of the Float Ribbon" – Glass processing days. 9th International Conference on Architectural and Automotive Glass. Tampere - 17-20 June 2005;
4. Y. Ruffel, F. Dehaye "How to analyse and solve annealing problems" Glass Production Technology International;
5. ГОСТ 3519-91 «Материалы оптические. Методы определения двулучепреломления».