

ПРОЧНОСТЬ ПЛАСТИН ИЗ СТЕКЛА*

Толкачев В.М.

Московский государственный технический университет (МАМИ)

1. Введение. Разрушение стекла начинается с поверхности за исключением случаев, когда внутри стекла имеются дефекты типа трещин. Наиболее слабой частью пластины из стекла является ее контур, называемый краем или краевой зоной.

Стекло разрушается только от растягивающих напряжений и не боится сжимающих. Что касается сдвиговых или касательных напряжений, их всегда можно исключить, рассматривая площадки главных напряжений. Остановимся на этом подробнее.

Можно считать, что в большинстве случаев напряженное состояние пластины является двумерным, так как нормальными напряжениями σ_z на площадках, параллельных плоскости пластины, обычно пренебрегают так же, как напряжениями поперечного сдвига τ_{xz}, τ_{yz} , которые учитываются лишь в некоторых специальных задачах. Существенными будем считать нормальные σ_x, σ_y и касательные τ_{xy} напряжения на площадках, перпендикулярных плоскости пластины.

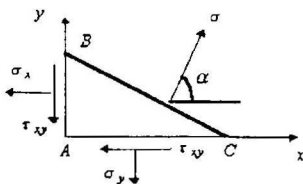


Рис. 1

Если известны напряжения σ_x, σ_y на площадках АВ и АС, а также касательные напряжения τ_{xy} (Рис. 1), то направление площадки ВС, на которой приложены только нормальные напряжения σ , определяется углом α из уравнения

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_y - \sigma_x}. \quad (1)$$

Если какой либо угол α удовлетворяет уравнению (1), ему же удовлетворяет и угол $\alpha + \pi/2$, что позволяет определить две взаимно перпен-

* Рукопись лекции подготовили к печати проф. Н.Г.Гурьянов и асп. О.Н.Гурьянова (прим. ред.).

дикулярные площадки, напряжения на которых называются главными и определяются [10] по формуле

$$\sigma = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha. \quad (2)$$

Напряжение на второй площадке определяется по той же формуле, если вместо α подставить $\alpha + \pi/2$.

Если одно из главных напряжений будет растягивающим и превысит прочность стекла, с этой точки оно начнет разрушаться.

На контуре пластины из стекла касательные напряжения отсутствуют, следовательно, площадки, изображенные на рисунке 2 пунктиром с нормальными n и t , являются площадками главных напряжений. Одно из этих главных напряжений σ_n , направление которого совпадает с направлением n нормали к контуру, обычно равно нулю, так как стекло за исключением паяных или паяных илпоминаторов не крепится по контуру. Тогда прочность пластины определяется другим главным напряжением σ_t вдоль касательной t к контуру. Такое напряжение σ_t испытывает балка, вырезанная из стекла и подвергающаяся испытанию на поперечный изгиб. Следовательно, при испытании балки на поперечный изгиб определяются главные нормальные напряжения, разрушающие стекло, то есть истинный предел прочности стекла.

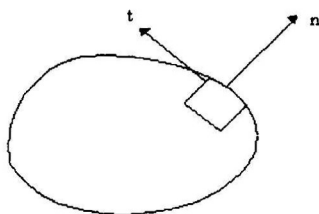


Рис. 2

Рассмотрим триплекс при охлаждении. В этом случае между скле-

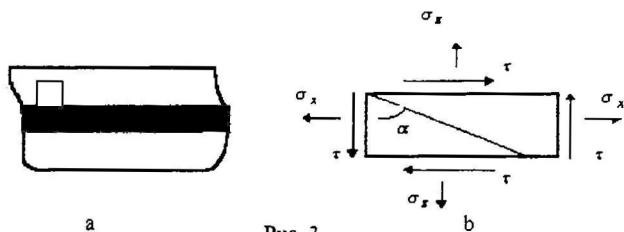


Рис. 3

вающим слоем и поверхностью стекла действуют значительные касатель-

ные напряжения τ . Пренебрежем пока нормальными напряжениями σ_z , отрывающими стекло от склеивающего слоя. Вырежем бесконечно малый элемент стекла, прилегающий к склеивающему слою и показанный пунктиром на рисунке 3а. Действующие на него напряжения приведены на рисунке 3б. Угол α , определяющий площадку главных напряжений, находится по формуле $\operatorname{tg}2\alpha = -2\tau/\sigma_x$. Если считать σ_x равным нулю, то есть пренебречь им, то $\alpha = \pi/4$, и площадка главных напряжений будет расположена под углом 45° к оси x .

Разрушению стекла посвящена большая литература. Соответствующие ссылки и краткое обсуждение вопроса будет дано в последующих разделах. Условно в обобщающем смысле причину разрушения обычно трактуют как "дефекты" поверхности стекла. Дефекты могут нарастать со временем при воздействии внешней среды на поверхность стекла. Это влажный воздух, морская вода, агрессивные среды разного вида и т. д. Поэтому находящееся под нагрузкой стекло может через некоторое время разрушиться без увеличения нагрузки. Возникает понятие длительной прочности стекла. Длительная прочность по своей природе отличается от усталости металлов. Металл "устает" от циклического воздействия переменных напряжений. Природа усталости заложена в пластических деформациях металла. Стекло при умеренных температурах не имеет макропластических деформаций, оно разрушается в упругой области. Опыты показывают, что если стекло находится в инертной среде (например, в азоте), оно разрушается при одних и тех же напряжениях независимо от времени воздействия этих напряжений [13], [14]. Цикличность нагружения практически не играет роли. Например, образец, вырезанный из стеклянной пластины, подвергается испытанию на поперечный изгиб и выдерживает 200 часов при постоянном нагружении 20 МПа. Если же его нагружать той же нагрузкой циклами по два часа каждый без "отдыха" между циклами, он выдерживает 100 циклов. То есть важно общее время воздействия среды под нагрузкой.

2. Испытания. Образцы пластин из стекла испытывают на изгиб. Схемы испытаний показаны на рисунке 4. На рис. 4а изображена прямо-

угольная пластина длины $2a$ и ширины Δ (или балка той же длины). Она нагружается поперечной силой P .

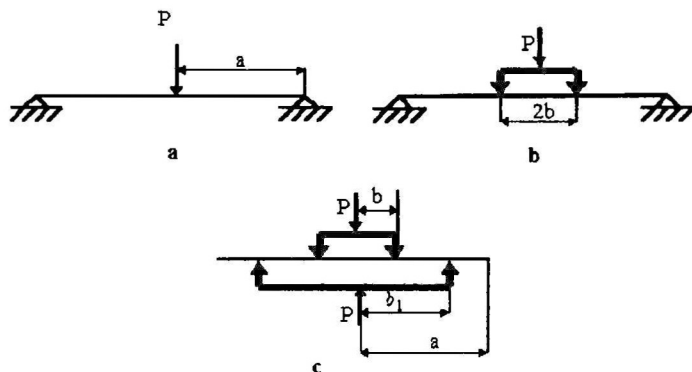


Рис. 4

Усилия, приходящиеся на единицу ширины пластины, называемые погонными усилиями, обозначим через q , тогда

$$q = P / \Delta. \quad (3)$$

На нижнем волокне пластины создаются растягивающие напряжения, на верхнем – такие же по величине сжимающие. Максимальная величина растягивающих напряжений в середине балки

$$\sigma = \frac{6M}{h^2}, \quad (4)$$

где h – толщина пластины, а M – погонный изгибающий момент, приходящийся на единицу ширины пластины

$$M = \frac{qa}{2}. \quad (5)$$

На рисунке 4b показана схема нагружения той же балки двумя сосредоточенными силами по $P/2$ каждая, приложенными на расстоянии b от ее середины. В средней зоне балки между силами реализуется чистый изгиб: изгибающий момент постоянен, а, следовательно, в силу (4) и напряжения не меняются. Погонный момент определяется по формуле

$$M = \frac{q}{2} (a - b) \quad (6)$$

при том же q .

Схема на рисунке 4б изображает также и поперечный осесимметричный изгиб круглой пластины радиуса a , нагруженной кольцевыми погонными усилиями q по окружности радиуса b . Если P – результирующая сила, то

$$q = \frac{P}{2\pi b}. \quad (7)$$

Центральная зона пластины $r < b$ изгибается по сферической поверхности, изгибающие моменты, а, значит, и напряжения в ней постоянные. Напряжения определяются по формуле (4), а изгибающие моменты соотношением [10]

$$M = \frac{P}{4\pi} \left(\frac{1 - \nu(a^2 - b^2)}{2a^2} (1 + \nu) \ln \frac{b}{a} \right). \quad (8)$$

Зависимость (8) обобщается на случай осесимметричного изгиба круглой пластины, нагруженной по схеме 4с. К моменту (8) нужно прибавить посчитанный по этой же формуле момент от силы $(-P)$, распределенной по окружности радиуса b_1 и действующей снизу. В итоге для области $r < b$ получим

$$M = \frac{P}{4\pi} \left(\frac{1 - \nu(b_1^2 - b^2)}{2a^2} + (1 + \nu) \ln \frac{b_1}{b} \right). \quad (9)$$

В случае, когда радиус пластины бесконечно увеличивается, формула (9) сильно упрощается:

$$M = \frac{P}{4\pi} (1 + \nu) \ln \frac{b_1}{b}. \quad (10)$$

Если по схеме 4с нагружать балку, то задача будет эквивалентна задаче для балки 4б, длина которой $2b_1$. Погонный момент для такой балки подсчитывается по формуле (6), где вместо a нужно подставить b_1 :

$$M_6 = \frac{q}{2} (b_1 - b). \quad (11)$$

Интересно сравнить изгибающие моменты при осесимметричном изгибе круглой пластины (10) и балки при той же погонной нагрузке q . Подставляя в (11) погонную нагрузку (7), получаем

$$\frac{M}{M_0} = (1 + \nu) \frac{\ln(b_1/b)}{b_1/b - 1}. \quad (12)$$

Если b_1 приближается к b , то это отношение стремится к $(1 + \nu)$, то есть напряжения получаются практически одинаковыми при симметричном изгибе круглой пластины и изгибе балки.

В практике осесимметричный изгиб круглых пластин называют симметричным изгибом, а изгиб балок из стекла поперечным. Классификация чисто условная, так как оба способа испытания – это изгиб пластин при поперечных нагрузках. Придерживаясь данной классификации, остановимся на "поперечном" и "симметричном" изгибе подробнее.

Симметричный изгиб в испытаниях применяют, когда хотят исключить работу края и, например, исследовать, как влияет состояние поверхности стекла на прочность. Поверхность можно "портить" абразивными порошками, надрезами, воздействовать агрессивными средами. Проверять степень упрочнения ионным обменом, травлением и т.д. Но симметричный изгиб, по нашему мнению, имеет существенные недостатки. Остановимся на них.

Для того, чтобы изгиб пластины был в самом деле симметричным, нужно по крайней мере иметь круглые стекла в качестве образцов. Такие образцы изготавливать в массовом количестве дорого. Поэтому используют квадратные пластины со стороной, равной $2a$. Чтобы края не влияли на результат, стараются отношение a/b_1 выбрать побольше (2 и более). Чистый осесимметричный изгиб, конечно, не получается. Кроме того, нагружающие кольцевые опоры радиусов b и b_1 (рис. 4с) имеют неплоскостность опорных кромок. За счет этого, а также вследствие начальных несовершенств поверхности образца и т.п. весьма сложно обеспечить равномерность распределения кольцевой реакции q по окружности. Можно даже сказать, что q – нагрузка, сосредоточенная в трех точках. По крайней мере, неравномерность может быть сильной, и предвидеть ее заранее нельзя. Формула (9) для расчетов становится негодной, и, пользуясь ею, можно получить, что угодно. Это ведет к большому разбросу в величине предела прочности стекла, что не является объективной харак-

теристикой материала, а целиком объясняется несовершенством испытаний.

Поперечный изгиб указанными недостатками не страдает. Неравномерность распределения приложенной нагрузки по ширине образца практически не влияет на величину местных напряжений – они целиком определяются суммарной силой.

Если исходить из практических соображений, очевиден вывод: за прочность большинства изделий из стекла отвечает край. В самом деле, при деформации опорного контура изделий максимальные напряжения возникают на краю. Да и без деформации опорного контура, лишь за счет упругости опор, затяжки болтов, воздействия температуры на краю могут появиться значительные напряжения. Даже если они меньше напряжений в центральной зоне, все равно разрушение может начаться с края, так как из-за дефектов предел прочности стекла на краю обычно ниже предела прочности во внутренней области.

Напрашивается вывод, что основным видом испытаний пластины из стекла является испытание на поперечный изгиб. При таких испытаниях одновременно проверяется и край, и поверхность образца. Испытания на поперечный изгиб проводить проще. Проще изготовить образец, меньше нужно материала для его изготовления, меньше усилия нагружения, не нужно особого контроля качества контактирующих поверхностей образца и нагружающего устройства.

3. Прочность сырого стекла. Вопросам прочности сырого стекла посвящено множество исследований. Сошлемся на работы [1], [8], [13], [14]. В данном разделе затронуты лишь некоторые известные аспекты, нужные при выполнении расчетов на прочность, и даны некоторые представления о стекле с позиции его прочности неспециалистам в этой области.

Под пределом прочности принято понимать напряжение в материале, при котором наступает его разрушение. В стекле, как в хрупком материале, предел прочности характеризуется величиной главных растягивающих напряжений на поверхности, ибо разрушение начинается с поверхности. На величину предела прочности влияет много факторов: состояние поверхности, длительность нагружения, масштабный фактор

(величина образца), окружающая среда, температура и т. д. Часть этих факторов предопределяет случайный или статистический характер предела прочности, величина которого колеблется в широком диапазоне. В практических расчетах наибольший интерес представляет минимальное значение предела прочности, гарантирующее надежную работу изделий.

Теоретическое значение предела прочности стекла может быть весьма высоким. Его предельное значение равно $E/5$, где E – модуль Юнга. В работе [12], в частности, сказано: "... даже при отсутствии экспериментальных данных и на основе одной теории можно сделать вывод, что стекла как класс твердых тел должны обладать исключительной прочностью. Однако эти предположения находятся в резком противоречии с принимаемой при инженерных расчетах безопасной прочностью стекла $0,35 - 0,7$ кг/мм², что составляет около $1/2000$ от ожидаемого значения его предельной прочности". В приведенной цитате не совсем ясно понятие "безопасной прочности", – если автор понимает под этим величину допускаемых в расчете напряжений, то для получения предела прочности нужно "безопасную прочность" умножить на коэффициент безопасности n . При $n = 2$ получим, что предел прочности стекла в худшем случае должен быть $0,7 - 1,4$ кг/мм².

На практике часто применяют термин "кратковременная прочность". Под этим обычно понимают предел прочности стекла при испытании на разрывной машине, когда нагрузка постепенно возрастает, и время до разрушения может быть разным, например, от 20 до 40 секунд. Понятие кратковременной прочности весьма условно. Есть понятие "мгновенная прочность" [14]. Это прочность, полученная при мгновенном разрушении образца. Но на практике мгновенно разрушить образец нельзя, наименьшее время разрушения, достигнутое в эксперименте, составляет 0,001 секунды [14]. Мгновенную прочность стекла получают путем эксперимента в жидком азоте, так как в этой среде длительность испытаний не влияет на величину предела прочности. Влияние среды на длительную прочность стекла изучается в работах [8], [13]; влияние обработки поверхности на эту величину исследовано в работе [14]. В ней же приведена так называемая универсальная кривая длительной прочности или статической усталости. Эта кривая воспроизводится в работе [12],

она в упрощенном виде (без нанесения экспериментальных точек) представлена на рисунке 5. Результаты получены для семи видов абразивной обработки стекла. По оси абсцисс отложен десятичный логарифм безразмерного времени $t/t_{0,5}$, причем t – фактическое время от начала эксперимента до разрушения образца, $t_{0,5}$ – время испытания, при котором предел прочности равен половине мгновенного предела прочности. По оси ординат отложено отношение предела прочности σ , соответствующего времени разрушения t , к пределу мгновенной прочности σ_N , полученному при испытании стекла в жидком азоте. Величина $t_{0,5}$ может колебаться в широких пределах. В работе [13] указывается, что для приведенной там марки стекла $t_{0,5}=8$ секунд при испытании в дистиллированной воде и $t_{0,5}=200$ секунд при испытании в азоте с влажностью 0,5%.

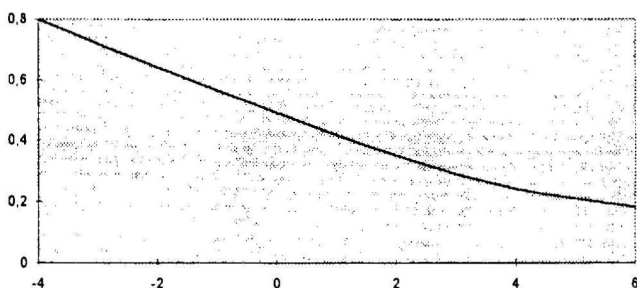


Рис. 5

В ряде работ, включая [11] и [14], показано, что существует наименьшая величина предела прочности стекла σ_0 . Если фактические напряжения в стекле равны или ниже этого предела, оно не разрушится при сколь угодно длительном нагружении. Эту наименьшую величину предела прочности σ_0 называют пределом статической усталости стекла. В работе [14] показано, что предел статической усталости $\sigma_0 = (0,17 \pm 0,02)\sigma_N$. Этот вывод весьма важен практически, так как позволяет оценить предел усталости стекла без экспериментов на длительную прочность. Нужно лишь испытать образцы в жидком азоте и взять $0,15+0,20$ от полученной

величины предела мгновенной прочности σ_N . Еще более грубую оценку можно сделать по результатам кратковременной прочности следующим образом. Можно предположить, что условия испытания в обычном атмосферном воздухе не сильно отличаются от испытаний в дистиллированной воде. По крайней мере, воздух – более агрессивная среда по сравнению с дистиллированной водой с точки зрения трещин. Тогда $t_{0,5} < 8$ секунд. Поэтому в результате эксперимента мы получаем, вообще говоря, точку на рис. 5 справа от середины $t/t_{0,5} = 1$ абсциссы. Следовательно, можно считать в запас, что мы получаем в эксперименте $\sigma/\sigma_N = 0,5$. Предел усталости можно было бы приближенно получить, разделив на 2,5 значение предела кратковременной прочности, что следует из рисунка 5, где нижний предел усталости составляет примерно $0,2\sigma_N$. Практически нецелесообразно делать такую перестраховку, поэтому можно рекомендовать определять предел усталости σ_0 путем деления на 2 минимального предела кратковременной прочности. Изложенное выше позволяет сделать следующие рекомендации.

1. Фактическим минимальным пределом длительной прочности сырого стекла является предел усталости, который и должен закладываться в расчет изделий из стекла. Эта рекомендация основана на следующих соображениях: а) все изделия из стекла работают при длительном нагружении; б) кривая усталости стекла наиболее близка к экспоненте (рис. 5), согласно чему большая часть разрушений происходит в первые часы работы образца, если напряжения в нем находятся в диапазоне предела статической усталости и предела мгновенной прочности.
2. В качестве предела усталости можно принять половину минимального предела кратковременной прочности. На основании проведенных экспериментов можно в первом приближении взять следующие значения предела усталости. Для кварца и ВВ $\sigma_0 = 20$ МПа. Для всех остальных марок стекла $\sigma_0 = 15$ МПа.

Эти рекомендации основаны на многотысячных испытаниях образцов сырого (и закаленного) стекла в лаборатории прочности Инсти-

туда технического стекла Министерства авиационной промышленности, начальником которой автор данной статьи являлся более 15 лет.

4. Закалка. Закалкой принято называть упрочнение стекла путем термической обработки – нагрева до температуры размягчения и последующего охлаждения воздухом или жидкостью. Изучению процесса закалки стекла посвящены, в частности, работы [4], [7], [11], [15]. В некоторых из них исследуется непосредственно закалка, например, в [7], в остальных – технологические процессы закалки: релаксация материала, отжиг, нагрев. Ниже мы изложим свою точку зрения на процесс закалки, ее достоинства и недостатки.

При нагреве и последующем охлаждении пластины из стекла образуются остаточные напряжения сжатия на поверхности пластины и в прилегающих к ней зонах. В средней зоне появляются напряжения растяжения. Примерная эпюра распределения напряжений изображена на рисунке 6.

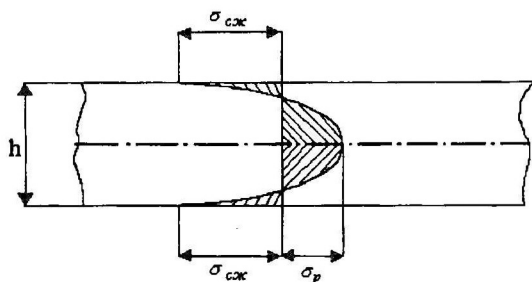


Рис. 6

Здесь $\sigma_{сж}$ – максимальная величина сжимающих напряжений, σ_p – растягивающих. Эпюра напряжений должна быть самоуравновешенной. Это условие может нарушиться, если закалка неравномерная по площади пластины. Предположим, что σ_0 – предел прочности сырого стекла. Тогда предел прочности закаленного стекла

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_{сж} \quad (13)$$

В самом деле, приложим к закаленной пластине растягивающие или изгибающие усилия, как показано на рисунке 7а, б. При растяжении силой N

закалочные напряжения сжатия $\sigma_{сж}$ начнут уменьшаться и достигнут нулевого значения, когда приложенные к элементу внешние напряжения $\sigma = N/h$ будут равны $\sigma_{сж}$. После этого стекло станет работать как незакаленное и для его разрушения нужно добавить напряжения, равные пределу прочности сырого стекла σ_0 .

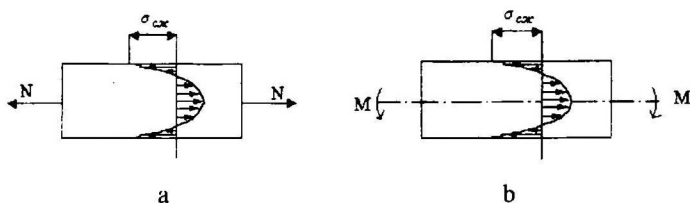


Рис. 7

При изгибе в верхнем волокне (рис. 7б) происходит то же явление – сжимающие напряжения сначала уменьшаются до нуля, затем появляются растягивающие напряжения σ_0 . В нижнем волокне возникают сжимающие напряжения, равные по величине пределу прочности закаленного стекла $\sigma = \sigma_0 + \sigma_{сж}$ и плюс $\sigma_{сж}$, то есть $\sigma = \sigma_0 + 2\sigma_{сж}$. Они не страшны, так как на практике не замечено, чтобы стекло разрушалось от сжимающих напряжений. Увеличение в процессе нагружения растягивающих закалочных напряжений σ_p в центре пластины также не страшно, так как стекло практически никогда не разрушается изнутри, если внутри его нет явных дефектов типа трещин.

Слово "закалка", по-видимому, перенесено на стекло из способа закалки стали, которая формально производится таким же способом – сталь нагревается "до красна" и затем быстро охлаждается в жидкости. Однако, по своей сути это совершенно разные процессы. Сталь меняет свою структуру, и никаких остаточных напряжений у поверхности практически нет (небольшие могут быть, но не они играют главную роль), в стекле, наоборот, не меняется структура, а происходят чисто механические процессы ползучести. У стали возрастает твердость, а прочность может даже уменьшиться, так как может исчезнуть возможность появления пластических деформаций. Известно, как легко ломается сильно за-

каленный нож. После закалки стекла его твердость практически не изменяется, как и модуль упругости, но предел прочности на растяжение существенно возрастает. Поэтому закалка стекла – это способ его упрочнения. Можно утверждать, что возможности этого основного способа упрочнения стекла еще не исчерпаны. Об этом разговор ниже.

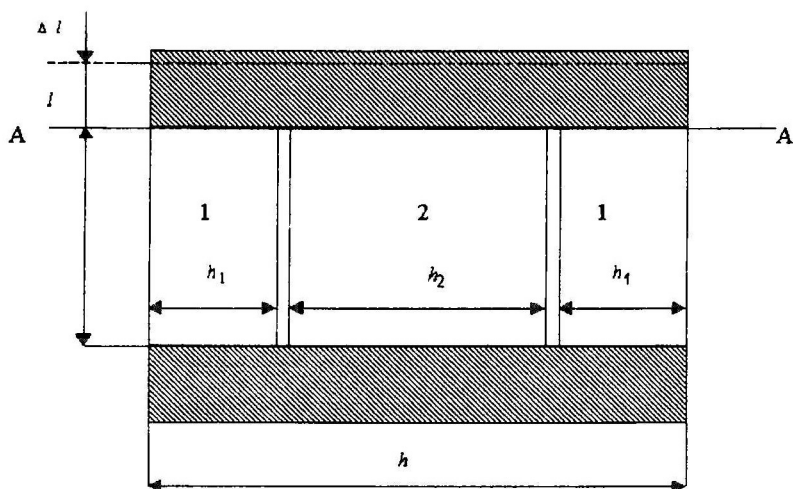


Рис. 8

Закалка стекла основана на ползучести материала, которая проявляется, начиная с некоторой температуры нагрева. Для силикатного стекла это температура $500\text{--}550^\circ\text{C}$. По мере последующего повышения температуры ползучесть резко возрастает, стекло сильно размягчается или разжижается. Чтобы объяснить сущность процесса закалки, поперечное сечение пластины толщиной h мысленно разделим на три слоя (рис. 8). Крайние слои 1 имитируют зоны сечения, прилегающие к поверхностям, слой 2 – середину. Сумма толщин слоев равна толщине пластины. Торцы слоев скреплены жесткими крышками, чтобы подчеркнуть, что слои должны деформироваться одинаково. Это следствие кинематической гипотезы плоских сечений в теории пластин. Каждая точка поперечного сечения пластины в процессе деформации перемещается на одно и то же расстояние, например, Δl . Поэтому сечение после деформации

остается плоским. Будем также считать, что слои 1 и 2 теплоизолированы друг от друга. Это допущение не повлияет на суть рассуждений, лишь их упростит. Упрощает схему закалки также допущение, что температура не меняется по толщине каждого слоя. При этих допущениях пластины 1 и 2 удобно рассматривать как изолированные друг от друга и скрепленные по торцам абсолютно жесткими крышками.

Нагреем все три пластины до температуры размягчения T . Они удлинятся на некоторую величину Δl (рис. 8). Затем охладим крайние пластины до исходной комнатной температуры. Среднюю пластину не охлаждаем. Все три пластины снова укоротятся до исходного состояния, так как размягченная средняя пластина не сможет препятствовать процессу укорочения крайних и будет укорачиваться вместе с ними. Напряжений в пластинках не будет, так как их нет в средней пластине – она размягчена, следовательно, нет и в крайних, иначе не будет равновесия системы. Процесс происходит в идеале, как будто средней пластины нет. Теперь охладим до исходного состояния среднюю пластину. Она сожмет крайние до напряжений σ_1 , а в ней самой появятся растягивающие напряжения σ_2 . Как обычно, положительными считаем растягивающие напряжения, поэтому напряжения σ_1 будут отрицательными. Все три пластины укоротятся на одну и ту же величину. Определим напряжения σ_1 , σ_2 . Условия совместности деформаций пластины имеет вид
$$+\frac{\sigma_1}{E} = \frac{\sigma_2}{E} - \alpha T,$$
 здесь E – модуль упругости материала пластины, α – коэффициент термического расширения, T – температура размягчения, точнее, разница между температурой размягчения и исходной комнатной.

Теперь мысленно отсоединим верхнюю крышку от пластины по сечению AA (рис. 8), заменив ее действие на нижнюю часть реакциями. На крайние пластины 1 будут действовать реакции в виде сжимающих усилий $\sigma_1 h_1$, на среднюю пластину – растягивающие усилия $\sigma_2 h_2$, причем $h = 2h_1 + h_2$. Условие равновесия нижней части будет $2\sigma_1 h_1 + \sigma_2 h_2 = 0$. Из этого уравнения и предыдущего условия совместности деформаций находим

$$\sigma_1 = \frac{h_2}{2h_1 + h_2} E\alpha T, \quad \sigma_2 = \frac{2h_1}{2h_1 + h_2} E\alpha T. \quad (14)$$

Из первой формулы видно, что максимально возможные сжимающие напряжения, которые можно создать в стекле при закалке, будут

$$\sigma_{1 \max} = -E\alpha T. \quad (15)$$

Это имеет место в пределе, когда $h_1 = 0$ – "закалка" с нулевой толщиной сжатого слоя. Для силикатного стекла $E = 0,7 \cdot 10^5$ МПа, $\alpha = 80 \cdot 10^{-7}$ 1/град. При температуре размягчения $T = 500^\circ\text{C}$ будем иметь $\sigma_{1 \max} = 285$ МПа. Таким образом, максимальные сжимающие напряжения в пластине из стекла при ее закалке не могут превышать 285 МПа. Это очень высокие напряжения, которые, конечно, получить нельзя, но приблизиться к ним можно. Этот предел показывает, что в процессе закалки заложены огромные возможности повышения прочности стекла. В настоящее время удается получить напряжения, не превышающие 50 МПа. Повышение возможно пятикратное.

Из рассмотренной модели трех пластин следует, что величина нагрева пластин 1 не влияет на величину остаточных напряжений. Можно вообще не греть пластины 1, а размягчать только пластину 2 (середицу стекла), если, конечно, при этом не разрушаются пластины 1.

Опишем кратко технологию закалки стекла и "подводные камни", которые здесь встречаются.

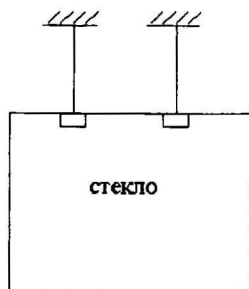


Рис. 9

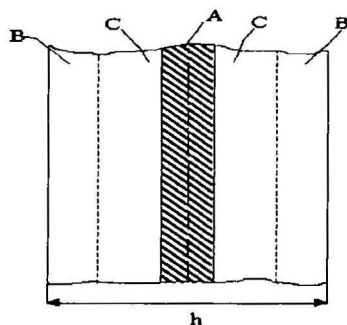


Рис. 10

Нагрев стекла осуществляется в электронагревательных печах. В основном это конвективный нагрев, доля лучистой энергии невелика. Стекло подвешивается вертикально с помощью металлических нитей, которые крепятся к краю прижимами (рис. 9). После нагрева до температуры размягчения стекло выводится из печи и обдувается воздухом. Процесс нагрева идет с поверхности пластины, поэтому температура поверхности выше температуры центральной зоны пластины. Если при этом нагреть центральную зону до температуры размягчения, то поверхностные зоны, имея более высокую температуру, тем более будут размягчены. Стало быть, вся пластина будет размягчена и вследствие ползучести потеряет свою форму и окажется в браке. Брака не будет, если несколько недогреть стекло, чтобы хоть малая полоска в центральной зоне оставалась жесткой и не давала пластине терять форму. Но это противоречит описанному выше основному принципу закалки стекла, согласно которому центральная зона должна быть размягчена. Конечно, описанная схема – это принцип. В действительности возможны некоторые отклонения. Можно, например, допустить наличие тонкой неразмягченной зоны А в центре пластины, как это показано на рисунке 10, где h – толщина пластины. Если такую пластинку охладить с поверхностей, то станут появляться упругие зоны вблизи поверхности. Оставшиеся размягченные зоны С все-таки позволят как-то упрочнить стекло. Можно не вводить зону А, а попробовать нагреть центр пластины до начала размягчения и сразу начать охлаждение, пока она еще не деформировалась. Но эти приемы неизбежно приведут к заниженным закалочным напряжениям, и закалка будет неэффективной. Самое же главное в том, что в настоящее время весьма затруднительно определять температуру в центре пластины, да еще в печи. И сам момент, когда стекло начинает менять форму, то есть пластина переходит в брак, установить в печи практически невозможно. Таким образом, процесс нагрева стекла становится неуправляемым, нужно быть ювелиром, чтобы точно зафиксировать процесс начала деформации пластины и сразу начать ее охлаждение. Небольшое отклонение от этой точки в сторону увеличения приводит к браку, а уменьшение – это недозакалка. Никакая модернизация закалочных печей и регистрирующей аппаратуры не может привести к существенному увеличе-

нию степени закалки, максимум которой дается формулой (15). Система существующей закалки имеет врожденный порок.

Чтобы избавиться от этого порока, необходимо переходить к новому способу нагрева – лучистому. Это, на наш взгляд, единственный путь. При лучистом нагреве возможно тепловыделение именно внутри стекла. В процессе нагрева можно одновременно охлаждать стекло с поверхностей путем его обдува воздухом и таким образом создавать благоприятную ситуацию для хорошей закалки с устойчивым процессом – ситуацию, когда в процессе нагрева прилежащие к поверхности слои 1 (рис. 8) все время остаются упругими и не дают деформироваться пластине. Средняя зона 2 будет иметь более высокую температуру и будет размягчена. Толщину этой зоны можно менять по желанию, варьируя мощность лучистых источников, то есть менять степень закалки по своему усмотрению, не боясь деформации пластины. Процесс становится устойчивым, не требующим высокой квалификации операторов, его можно автоматизировать. Принципиальная схема такого процесса изображена на рис. 11.

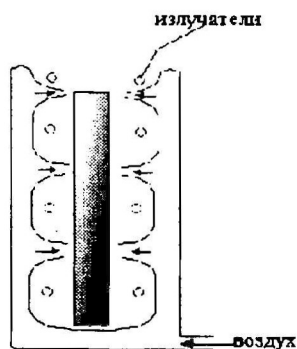


Рис. 11

Здесь одновременно идет нагрев стекла излучателями и охлаждение воздухом, при этом нет необходимости в перемещении стекла. Грубо говоря, при нагреве нужно включить напряжение и частично прикрыть подачу воздуха, на второй стадии выключить напряжение, усилив обдув. Первый шаг в этом направлении – подбор нагревателей с подходящим спектром излучения.

Выше была изложена основная схема закалки пластин из стекла, показан "потолок", то есть максимально возможные сжимающие напряжения на поверхности пластины, которые можно получить в процессе закалки. Изложены принципиальные недостатки существующего способа закалки – его "врожденный порок". Целесообразно остановиться и на реальных особенностях технологического процесса, которые препятствуют достижению максимума закалочных напряжений на поверхности пластин из

стекла. В основе реального технологического процесса закалки лежат два главных фактора:

1. Процесс идет во времени.
2. Нет четкой температуры размягчения стекла. С ростом температуры явления ползучести нарастают постепенно, хотя и довольно быстро.

Эти два фактора взаимосвязаны и могут привести к некоторым негативным явлениям. Остановимся на них подробнее.

В процессе нагрева стекла особых неприятностей не появляется. Если увеличивать скорость нагрева, будет увеличиваться и неравномерность изменения температуры по толщине пластины. В центральной зоне будут растягивающие напряжения, в прилегающих к поверхностям – сжимающие. Они не могут привести к разрушению стекла, о чем говорилось выше. Поэтому в начальной стадии нагрева его скорость может быть увеличена. При приближении к температуре размягчения можно поступить двояко. Первый путь – скорость нагрева снизить, чтобы не перегреть поверхность стекла и в то же время прогреть внутренние слои. В момент начала размягчения начинает играть свою роль второй из упомянутых выше факторов. При конвективном теплообмене нагрев должен быть остановлен в самом начале процесса размягчения, когда стекло еще не проявляет свойств ползучести и является упругим. В противном случае стекло может потерять свою форму. Но недогретое стекло не позволит получить значительные сжимающие напряжения в процессе закалки. Второй путь – можно продолжать интенсивно греть стекло на всем этапе нагрева и добиться такого состояния, когда поверхностные слои уже сильно перегреты, а центральная зона еще не нагрета до температуры размягчения, то есть имеется зона А (рис. 10), которую по возможности желательно сделать тоньше. При этом основной массив стекла будет размягчен, и в то же время стекло сохранит свою форму. В этот момент начать охлаждение. Но, как уже говорилось, такую схему реализовать на практике почти невозможно. Кроме того, она имеет еще один недостаток: при охлаждении поверхностей могут возникнуть значительные растягивающие напряжения на поверхности пластины, и она может разрушиться. Об этом будет сказано ниже при рассмотрении второго этапа закалки – охлаждения стекла.

Идеальным с точки зрения получения максимальных сжимающих напряжений на поверхности стекла является случай мгновенного охлаждения. Если бы в процессе "мгновенного" охлаждения поверхностей не потребовалось усилий для сжатия всей внутренней зоны стекла, то после ее охлаждения удалось бы сжать поверхность пластины до максимально возможных напряжений $\sigma = -E\alpha T$ в соответствии с формулой (15). Этот процесс был бы возможен, если бы стекло стало "жидким". Обжатие внутренней части было бы возможно за счет ее расширения по толщине пластины. В действительности, к такому идеалу можно лишь приближаться, но предел не достижим. Главное препятствие для быстрого охлаждения состоит в том, что в поверхностных слоях возникнут большие растягивающие напряжения, которые приведут к разрушению стекла, так как внутренние слои, не являясь жидкими, сопротивляются обжатию. Сопротивление тем больше, чем меньше размягчена внутренность стекла. Создается противоречивая ситуация – чтобы достичь больших закалочных напряжений сжатия на поверхности нужно увеличивать скорость охлаждения стекла, но увеличение скорости способствует разрушению стекла. Противоречие приводит к закону изменения скорости охлаждения стекла, требующему, чтобы растягивающие напряжения на поверхности стекла были близки к разрушающим, но не превосходили их. Подобный закон можно назвать оптимальным режимом охлаждения, при нем достигаются максимально возможные в реальном процессе сжимающие напряжения на поверхности пластины при ее закалке. На пути реализации оптимального режима встречаются две трудности. Во-первых, нелегко найти закон оптимального охлаждения, во-вторых, даже если этот закон обнаружен, его трудно реализовать. Причины ясны. Чтобы найти закон, нужно хорошо знать релаксационные свойства материала в зависимости от температуры. Их можно узнать с помощью больших по объему и тонких экспериментов, которых пока нет. Вторая трудность – теоретическая. Если допустить, что упомянутые эксперименты проведены, нужно решать существенно нелинейную задачу закалки. Поэтому избран другой подход. Поскольку путь получения оптимального режима ясен, делались попытки реализовать этот процесс экспериментально. Одним из таких приемов является так называемая двухстадийная закалка. Разогретое до температуры размягчения стекло нельзя охлаждать резко, иначе оно раз-

рушится. Поэтому его охлаждают в воздухе. По истечении некоторого времени скорость воздушного охлаждения становится недостаточной и для получения больших сжимающих напряжений ее нужно увеличивать. Получаются две стадии охлаждения – сначала в воздухе, затем в жидкости. Двухстадийная закалка, естественно, способствует усилению закалочных напряжений, но сразу напрашивается вопрос, почему двух, а не трех или многостадийная? Ответ в том, что двухстадийную в настоящее время реализовать проще, чем многостадийную. Опыт применения двухстадийной закалки показал, что и ее реализовать непросто. Поэтому проблема остается, а возможности заложены большие. Тем более, что преимущество закаленного стекла перед упрочненным с помощью ионного обмена или травления значительное и заключается в большей толщине сжатого слоя по всей поверхности у закаленного стекла. Поэтому оно слабее реагирует на дефекты поверхности типа абразивного повреждения и неглубоких сколов на краю.

5. Упрочнение ионным обменом и травлением. Проблемы упрочнения стекла ионным обменом и травлением обсуждаются в работах [3], [5], [6].

Стекло упрочняется, если его поместить в ванну со специальным раствором (расплав) и выдержать при температуре 430–500⁰С несколько часов. Время упрочнения уменьшается, если на расплав со стеклом воздействует электронно-динамическое поле. Суть упрочнения, как и при закалке, сводится к созданию сжатого слоя у поверхностей пластины из стекла. Однако причина появления сжатого слоя объясняется тем, что ионы натрия, присутствующие в прилегающих к поверхности стекла слоях, заменяются большими по объему ионами калия, находящимися в расплаве. При ионном обмене упрочняется очень тонкий поверхностный слой стекла. Для обычного силикатного стекла толщина сжатого слоя не превышает, как правило, 30–40 микрон. Эта толщина может быть увеличена до 100 и более микрон лишь для стекол специального состава. Что касается максимальной величины сжимающих напряжений, то она может достигать 500 – 1000 МПа. Но, к сожалению, эти цифры не вызывают оптимизма у разработчиков изделий из стекла. Во-первых, мала толщина сжатого слоя. Возникающие в этом слое напряжения распределяются по толщине неравномерно. Максимум может быть на поверхности, а затем

они резко падают. Видоизменяя режим упрочнения с учетом явлений ползучести, можно сдвинуть максимум напряжений с поверхности на некоторую глубину. Но все это не устраняет главного порока – малой глубины сжатого слоя. Небольшие царапины вследствие абразивного воздействия и другие дефекты поверхности резко снижают предел прочности, доводят его порой до прочности сырого стекла. Самым слабым местом является край, где неизбежно возникают сколы. Самые микроскопические царапины и сколы края разрушают тонкий упрочненный слой. Именно малость глубины сжатого слоя препятствует широкому применению ионного упрочнения в промышленности. Стекло, упрочненное ионным обменом, успешно используется лишь в экзотических изделиях, в которых поверхность стекла защищена от внешнего абразивного воздействия, а эксплуатационные напряжения в краевой зоне незначительны. Примером подобных изделий могут быть многослойные блоки, предназначенные для защиты от локальных динамических воздействий, при условии, что локальные нагрузки не приложены в краевой зоне.

Из сказанного следует, что проблема повышения эффективности ионно-обменного упрочнения в первую очередь связана с проблемой края стекла. Наиболее рациональным здесь является скругление острых кромок на краю, резко снижающее вероятность разрушения.

Травление пластин из стекла осуществляется в плавиковой кислоте. Повышение прочности листового стекла в результате травления связано с удалением поверхностного дефектного слоя и уменьшением концентрации напряжений за счет растравливания острых вершин опасных трещин. Поверхность травленых стекол нужно защищать от внешних абразивных воздействий. По этой причине травленые пластины используются в тех же типах изделий, что и упрочненные ионным обменом.

6. Выбор пределов прочности стекла и коэффициентов запаса прочности.

Пределы прочности. В разделе "Прочность сырого стекла" даны следующие рекомендации по выбору предела прочности сырого стекла:

- а) Минимальным пределом прочности сырого стекла следует считать предел статической усталости σ_0 .
- б) Предел статической усталости σ_0 определять как половину минимального предела кратковременной прочности.

Эти рекомендации позволяют принять $\sigma_0=20$ МПа для кварца и стекла ВВ, для всех остальных марок стекла $\sigma_0=15$ МПа.

Предел прочности закаленного стекла вычисляется по формуле

$$\sigma_e = \sigma_c + \sigma_0, \quad (16)$$

где σ_c – величина сжимающих напряжений на поверхности листового стекла, возникающих после закалки. Формула (16) общая, она годится и для стекол, упрочненных ионным обменом. Выбору σ_c в формуле (16) посвящены специальные исследования [4], [7], в которых при выборе σ_c предлагается учитывать возможную глубину дефектов – трещин, снижающих σ_c , что следует из вида эпюры распределения напряжений сжатого слоя (рис. 12). В формулу (16) вместо σ_c ставится σ'_c , то есть напряжения сжатого слоя на глубине δ от поверхности стекла. Глубина повреждения δ выбирается интуитивно, волевым порядком.

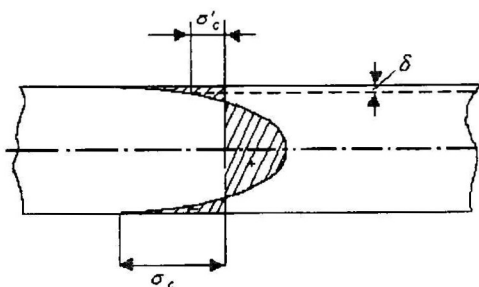


Рис. 12

При упрочнении

стекла химическим способом – травлением поверхностного слоя в плавиковой кислоте – предел прочности определяется испытанием образцов.

Коэффициенты запаса прочности. Выбор коэффициента запаса прочности, вводимого в прочностные расчеты стекол, – пожалуй, самая трудная задача и решается она, в конечном счете, путем выпуска специальных документов – норм прочности. Коэффициенты запаса прочности учитывают факторы незнания работы конструкции. Совершенствование методов расчетов, испытаний, уточнение сведений о воздействии окружающей среды увеличивают знания о работе конструкции и приводят к снижению коэффициентов запаса. В идеале они равны единице.

Традиционно в отечественной специальной литературе введены два коэффициента: коэффициент безопасности и коэффициент запаса прочности. Коэффициент безопасности определяется формулой

$$n = P_g / P_3, \quad (17)$$

где P_g – внешняя нагрузка, при которой конструкция разрушается, P_3 – нагрузка, при которой конструкция эксплуатируется.

Коэффициент запаса прочности определяют по формуле

$$n = \sigma_g / [\sigma], \quad (18)$$

где σ_g – напряжение, при котором разрушается какой-то элемент конструкции: пластина, оболочка, балка и т. д. Иными словами, σ_g – предел прочности материала, $[\sigma]$ – величина допускаемых напряжений, которые разрешается иметь в изделии, рассчитываемом теоретически или проверяемом экспериментально при испытаниях на стенде.

Коэффициент безопасности (17) характеризует надежность или безопасность работы объекта целиком или отдельных его частей при внешних силовых воздействиях, причем оценка надежности может быть получена сравнительно нетрудоемким путем без детального анализа напряжений в многочисленных элементах конструкции. Отсюда и главный недостаток этого коэффициента. Формула (17) не гарантирует равнопрочности отдельных элементов, что ведет обычно к утяжелению конструкции, а в ряде случаев и к ухудшению ее работы. В самом деле, мы не можем определить эксплуатационные нагрузки P_3 на все интересующие нас элементы конструкции опытным путем в процессе эксплуатации, их можно определить только путем прочностного расчета. Неудобство коэффициента безопасности (17) еще и в том, что он определен только для силовых воздействий. Если, например, напряжения появляются от нагрева, его использовать просто нельзя, так как в этом случае нет понятия эксплуатационной P_3 и разрушающей P_g нагрузки.

Применительно к изделиям из стекла коэффициент безопасности (17) можно применить, пожалуй, только к случаю воздействия на стекло перепадов давления и перегрузок. Но в этом случае формулы (17) и (18) переходят одна в другую, если предположить, что допускаемое напряжение $[\sigma]$ соответствует эксплуатационной нагрузке P_3 . В самом деле, обозначим через σ_1 максимальное растягивающее напряжение в пластине из стекла при воздействии единичной нагрузки $P=1$. Тогда $\sigma_g = P_g \sigma_1$, $[\sigma] = P_3 \sigma_1$. Подставив эти значения в формулу (18), получаем (17). Конечно,

сделав допущение, что $[\sigma]$ соответствует P_3 , мы сузили смысл допускаемого напряжения, которое не связано с эксплуатационной нагрузкой, с ней связаны фактические напряжения σ , которые получаются в расчетах или стендовых испытаниях при воздействии на изделие нагрузки P_3 . Максимальное из этих напряжений не должно превышать $[\sigma]$, то есть

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma], \quad (19)$$

или, с учетом формулы (18),

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_g/n. \quad (20)$$

В силу вышесказанного при оценке прочности и надежности изделий из стекла пользуются понятием коэффициента запаса прочности (18). Преимущество коэффициента (18) по сравнению с (17) состоит в том, что он не привязан к причинам появления напряжений. Это могут быть напряжения от перепада давления, от динамических перегрузок, температурные напряжения, напряжения монтажные, напряжения при деформации контура, передающиеся на стекло от объекта, для которого оно предназначено, и т. д.

В практике расчета большая часть названных источников напряжений не участвует. Обычно рассчитывают напряжения от перепада давления, перегрузок, температуры. Напряжения от деформации корпуса рассчитать не удастся, так как величина этих деформаций заранее не известна. Чтобы ее найти, нужно либо рассчитать весь объект или его часть вместе со стеклом, либо измерить эти деформации в процессе эксплуатации. В последнем случае получается замкнутый круг – с одной стороны, для замера деформаций нужно иметь готовое изделие, с другой стороны, чтобы изготовить качественное изделие, нужно при его расчете и испытаниях знать деформацию контура. Итак, об одной из главных причин возникновения напряжений в стекле – деформации контура – фактически заранее ничего не известно. Здесь до некоторой степени выручает опыт эксплуатации готовых изделий – аналогов вновь проектируемых или изготавливаемых. Другие источники напряжений в принципе оценить можно. Это зависит от технических возможностей конструкторов и т. д.

До недавнего времени расчеты изделий из стекла проводились в следующей последовательности. Коэффициент запаса прочности в формуле (18) брался из соответствующих документов. Обычно $n=2$, а для от-

ответственных изделий $n=3$. В качестве σ_g брался минимальный предел кратковременной прочности стекла $\sigma_g=4$ для кварца и между двумя и тремя для сырого силикатного стекла. Так как изделия из силикатного стекла обычно подвергаются закалке, то σ_g для закаленных стекол брался в соответствии с формулой (16). С учетом дефектности поверхностного слоя (рис. 12) σ_g брался из графиков технологической инструкции. Он зависит от толщины пластины и степени закалки стекла. По формуле (18) определялись допустимые напряжения $[\sigma]$. Затем делался расчет напряжений от эксплуатационных нагрузок σ_p и от температуры σ_T . В каждой точке пластины компоненты σ_x , σ_y , τ_{xy} этих напряжений складываются, получаются суммарные напряжения, затем по ним находятся главные напряжения σ , и они уже сравниваются с допускаемыми. Если максимальные значения главных напряжений σ_{\max} удовлетворяют условию (19), изделие считается годным. В этом случае определяется фактический коэффициент запаса прочности по формуле

$$n = \sigma_g / \sigma_{\max} \quad (21)$$

Описанный способ расчета не является самым рациональным, так как может привести к перегрузке конструкции. Поясним это на примере. При расчете пластины получили напряжения от давления $\sigma_p = 10$ МПа. При этом не учли деформацию контура и технологические напряжения. Расчетные температурные напряжения пусть $\sigma_T = 25$ МПа. Пластина закалена так, что $\sigma_g = 70$ МПа. Суммируя расчетные напряжения и сравнивая их с σ_g по формуле (21) получим запас прочности $n=2$. Изделие оказалось годным, как говорят, на пределе, так как допустимый коэффициент запаса прочности равен 2. Теперь решаем этот пример иначе. Поскольку $\sigma_p = 10$ МПа получено без учета деформации контура и некоторых других факторов, будем считать, что их учет может увеличить напряжение σ_p не более чем в 2 раза, не анализируя, как это заключение получено. Предположим также, что реальные температурные напряжения не превышают расчетные. Тогда напряжения, возникающие в стекле, не могут быть больше, чем $2\sigma_p + \sigma_T = 45$ МПа. Эти напряжения ниже предела прочности $\sigma_g = 70$ МПа. Мы фактически имеем запас $n=70/45=1,55$,

который нам не нужен, так как реальные напряжения никогда не достигнут 70 МПа. Изделие оказалось перетяжеленным.

Отсюда напрашивается новый подход к оценке прочности изделия, состоящий в том, что целесообразно оценивать отдельно достоверность каждой составляющей напряжения, соответствующей своему виду нагружения. Изложим его в виде краткой формулировки основных положений.

Эксплуатация. Изделие считается годным к эксплуатации, если максимальные главные напряжения растяжения σ_D при эксплуатации на всех рабочих режимах не превышают минимального предела длительной прочности стекла σ_g , то есть $\sigma_D < \sigma_g$.

Расчет. Изделие считается годным по расчету, если максимальные расчетные напряжения σ не превышают минимального предела длительной прочности стекла – предела статической усталости – σ_g , или

$$\sigma < \sigma_g. \quad (22)$$

Но σ_g , согласно формуле (16), имеет два слагаемых: сжимающие напряжения σ_c , появляющиеся при закалке, и предел статической усталости σ_0 сырого стекла. Для сырого стекла $\sigma_c = 0$, значит, $\sigma_g = \sigma_0$. Для упрочненного воздушной закалкой стекла, если неизвестны напряжения σ_c , их в первом приближении можно считать равными пределу кратковременной прочности закаленного стекла. Это допущение станет правомерным, если не происходит релаксации сжимающих напряжений σ_c во времени.

Для определения σ формулы (22) сначала рассчитываются компоненты напряжений σ_{xj} , σ_{yj} , τ_{xyj} от отдельных нагрузок, занумерованных индексом j (давления, температуры, деформации контура и т.д.), затем по формулам

$$\sigma_x = \sum_{j=1}^m n_j \sigma_{xj}, \quad \sigma_y = \sum_{j=1}^m n_j \sigma_{yj}, \quad \tau_{xy} = \sum_{j=1}^m n_j \tau_{xyj},$$

где m – число нагрузок, n_j – соответствующие коэффициенты (веса), имеющие смысл коэффициентов запаса прочности для j -ой нагрузки, определяют суммарные напряжения. После этого определяются главные напряжения σ и используется формула (22).

Введение весовых коэффициентов n_j считаю весьма полезным, так как это дает прочнику некоторую свободу, рассчитанную в том числе и на интуицию инженера.

Литература

1. Амелянович К.К. Влияние длительного пребывания в натуральных морских условиях на физико-механические свойства стекла // Прочность элементов конструкций из стекла и металла. – Киев: Наукова думка, 1983. – С. 23–35.
2. Бартнев Г.М., Сандитов Д.С. Релаксационные процессы в стеклообразных системах. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1986. – 235 с.
3. Богуславский И.А. Об интенсификации процесса ионообменного упрочнения натрийсодержащих стекол с помощью малых химических добавок к расплаву KNO_3 // Докл. АН СССР. – 1975. – Т. 225. – № 6. – С. 1373–1376.
4. Богуславский И.А. Высокопрочные закаленные стекла. – М.: Стройиздат, 1969. – 208 с.
5. Бутаев А.М. Упрочнение промышленного натриевокальциевосиликатного стекла ионным обменом // Физика и химия стекла. – 1983. – Т. 9. – № 2. – С. 223–232.
6. Денисенко О.Н. Современные методы упрочнения стекла в СССР и за рубежом. Обзор. – М., 1971. – 37 с.
7. Мазурин О.В., Белоусов Ю.Л. Отжиг и закалка стекла. – М.: МИСИ, 1984. – 114 с.
8. Солянов В.Г., Венгжен В.В. Временная зависимость прочности технических стекол на воздухе // Проблемы прочности. – 1970. – № 4. – С. 79–82.
9. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. – М.: Физматгиз, 1963. – 635 с.
10. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 575 с.
11. Gardon R. Review of radiant heat transfer in glass // J. American Chem. Soc. – 1961. – V. 44. – N 7. – P. 303–312.
12. Hillig W.B. Modern Aspects of the Vitreous State. – Washington, 1962. – V. 2. – P. 152–194. (Хиллиг У.Б. Причины низкой прочности и предельная прочность аморфных хрупких тел // Прочность стекла. – М.: Мир, 1969. – С. 68–120.)
13. Mould R.E. Strength and Static Fatigue of Abraded Glass under Controlled Amount conditions. IV. Effect of Surroundings Medium // J. American Chem. Soc. – 1961. – V. 44. – N 10. – P. 481–491.
14. Mould R.E., Sonthwick R.D. Strength and Static Fatigue of Abraded Glass under Controlled Amount conditions. II. Effect of Various Abrasions and the Universal Fatigue Curve // J. American Chem. Soc. – 1959. – V. 42. – N 12. – P. 582–592.
15. Scherer G.W. Relaxation in glass and composites. – New York etc., Wiley, 1986. – 12. – 331 p.