

## Влияние способа закрепления стеклопакетов на прочность стекол

Автор: А. Г. Чесноков

Традиционно в строительстве применялись стекла сравнительно небольших размеров, которые крепились по четырем сторонам (за исключением, пожалуй, витрин магазинов). Развитие архитектуры, доступность и улучшение качества стекла стали причиной увеличения размеров применяемого остекления [1]. Желание разнообразить архитектурный облик зданий тоже является причиной того, что стали применяться различные способы крепления стекол: по двум, трем, четырем сторонам, с помощью различного количества спайдеров. При этом очень часто не задумываются над тем, что разные способы закрепления стекол приводят к разным напряжениям и прогибам в них при эксплуатации. Недооценка роли способа крепления в обеспечении устойчивости конструкций может вызвать их разрушение. При проектировании рост напряжений и прогибов приходится компенсировать увеличением толщины стекол или уменьшением их размеров (на что архитекторы обычно не соглашаются). Увеличение толщины стекол, в свою очередь, приводит к увеличению нагрузки на строительные конструкции и росту цены остекления (что вызывает негативную реакцию заказчиков). Поэтому вопросы размеров стекол и способов их закрепления должны обсуждаться на начальном этапе проектирования остекления, а лучше — на начальном этапе проектирования здания, чтобы строительные конструкции гарантированно выдержали нагрузки от остекления.

Для понимания сути вопросов, сильно упрощая теоретические выкладки [2], следует отметить, что напряжение в стеклянной пластине можно приближенно считать прямо пропорциональным расчетной нагрузке и квадрату линейного размера пластины. Также оно обратно пропорционально квадрату толщины стекла. Прогиб же стекла пропорционален четвертой степени линейного размера пластины и обратно пропорционален кубу толщины стекла. Коэффициенты пропорциональности при этом зависят от способа крепления и соотношения сторон пластины. Под линейным размером понимается длина незакрепленной стороны, если мы говорим о прямоугольном стекле. В случае крепления по всем сторонам всегда имеется в виду длина меньшей стороны. Приняв во внимание хотя бы эти соображения, мы можем сделать первый вывод: стекла, не имеющие незакрепленных или не-опертых сторон, подвержены гораздо меньшим напряжениям и прогибаются гораздо меньше. Также очень важно, из тех же соображений, чтобы длины незакрепленных сторон были наименьшими, если полное опирание невозможно. Таким образом, различные способы крепления стекла неравноценны с точки зрения устойчивости конструкции. Проиллюстрируем это на примере остекления с использованием стеклопакета размером 3 x 2 м (этот размер лежит в самом популярном на сегодня диапазоне — перекрывает всю высоту этажа и всю ширину окна). Для расчета мы выбрали пакет с дистанционной рамкой шириной 16 мм (самая удобная рамка с точки зрения теплотехники). Точечные крепления размещались в 100 мм от краев пакета.

Рассмотрим структуру расчетной нагрузки. Главными компонентами нагрузки являются:

- постоянные нагрузки — собственный вес, но в нашем примере стеклопакет расположен вертикально, поэтому его вес начинает влиять на прочность стекол только при неправильном (невертикальном) его монтаже и сильных прогибах стекол, что повышает требования к качеству монтажа остекления;
- высотные нагрузки, которые связаны с изменением атмосферного давления и характерной силы ветра с ростом высоты над уровнем основания;
- снеговые нагрузки, которые тоже существенны только для горизонтального и наклонного остекления;
- климатические нагрузки, возникающие из-за того, что условия эксплуатации

стеклопакета (температура и давление) отличаются от условий при производстве, в России имеют существенно большее значение, чем в странах Западной Европы, и часто являются доминирующими;

- ветровые нагрузки или другие кратковременные нагрузки.

Для примера мы рассмотрим остекление, расположенное вертикально на высоте не более 80 м от поверхности земли (20–25-этажное здание, каких сейчас много строят в Московском регионе). Расчетная ветровая нагрузка при этом составит 0,400 кН/м<sup>2</sup> (согласно СНиП «Нагрузки и воздействия» [3]). Диапазоны колебаний наружной температуры и атмосферного давления приняты по СНиП «Строительная климатология» [4]. Каких-либо дополнительных эксплуатационных нагрузок не предусмотрено. Расчет производится по схеме, основанной на prEN 13474 [5, 6]. Данная схема отличается тем, что в ней происходит поэтапная проверка различных сочетаний нагрузок для выбора их наиболее опасной комбинации и вводятся различные коэффициенты запаса. В таблицах 1, 2 приведены значения прогиба и напряжения для наиболее неблагоприятного сочетания всех возможных нагрузок для разных способов закрепления стеклопакета и толщины стекол, обеспечивающие выполнение всех требований. Данные в таблицах начинаются со стеклопакета со стеклами толщиной по 6 мм, поскольку их обычно пытаются применить в этом случае из-за того, что у большинства производителей максимальная толщина стекол с низкоэмиссионными или солнцезащитными покрытиями как раз 6 мм, стекла с покрытиями большей толщины выпускаются только на заказ. Для сравнения приведен также вес стеклопакета. В случае, если стеклопакет не выдерживает какой-либо другой этап проверки, это отмечено отдельно.

В соответствии с ГОСТ 111-2001 [7] справочное значение напряжения на изгиб для листового стекла составляет 15 МПа, что при данной конструкции стеклопакета и размерах стекол соответствует допустимому напряжению в стекле (в случае использования флоат-стекла) 30,7 Н/мм<sup>2</sup>. Аналогично в случае использования закаленного стекла: по ГОСТ 30698-2000 [8] — 120 МПа, что соответствует 80,7 Н/мм<sup>2</sup>. Допустимый прогиб стекол в соответствии с BS 6180 [9] (не более 1/250 узкой стороны) равен 8 мм. Следует отметить, что проектировщики часто пренебрегают ограничениями на величины прогибов, считая их несущественными из-за отсутствия в отечественных нормативных документах. На самом деле это чрезвычайно важное ограничение по нескольким причинам: выполняемые прочностные расчеты основаны на предположении, что лист стекла находится в условиях упругой деформации, а при больших прогибах стекло переходит в зону хрупкого разрушения, где прочность стекла существенно падает, и разрушение происходит лавинообразно; при прогибах листа стекла он отклоняется от вертикали и появляется дополнительная нагрузка от собственного веса стекла, увеличивающая напряжение в стекле, что обычно не учитывается при расчетах вертикального остекления; при больших прогибах стекол в стеклопакетах возможно их разрушение из-за удара друг об друга, и так далее.

Для исследования точечных креплений мы использовали разработанные программы моделирования [2]. Следует отметить, что наша модель позволяет получить не только значение максимального прогиба и напряжения, но и распределение этих величин. Однако получаемые с ее помощью значения, как можно заметить, не совсем корректно сравнивать с расчетами по prEN, так как последние не явно содержат некоторый запас (учитывающий, в частности, разброс прочности материалов конструкции) и предполагают, что каждое из стекол пакета находится в наихудших для него условиях. Наша модель более «физична», но вычисления по ней чрезвычайно ресурсоемки. Кроме того, погрешность расчета напряжения довольно велика, что связано с математическими особенностями решаемой задачи. Поэтому мы приводим только величины прогибов. На

приведенных иллюстрациях можно видеть, что наибольший прогиб внешнего стекла достигается в геометрическом центре, а внутреннего — в краевых зонах для 4-точечного крепления. Размещение в этих зонах еще двух узлов крепления существенно улучшает ситуацию: прогибы уменьшаются в 2–3 раза. Наибольшие напряжения при точечном креплении наблюдаются вблизи узлов крепления и на максимальном удалении от них — в середине стекла. Расчеты показывают, что для устойчивости остекления имеет значение как выбор способа закрепления, так и порядка расположения стекол в стеклопакете. При проектировании полезно помнить, что стоит рассмотреть вариант стеклопакета из стекол разной толщины. Оказывается также, что для остекления большой площади закрепление по двум сторонам или при помощи 4 точек часто нецелесообразно, ведь для обеспечения надежности требуется слишком тяжелая и дорогостоящая конструкция. Поэтому мы рекомендуем увеличивать число точек крепления до 6–8, если площадь элемента превышает 3–4 м<sup>2</sup>, и располагать их, разумеется, вдоль длинной стороны или по всем сторонам.

## Литература

1. Чесноков А. Г. «Проблемы фасадного остекления». //«Стройпрофиль», № 5 (43), 2005, с. 76–77.
2. Краснопольский Б. И., Чесноков А. Г., Чесноков С. А. «Численное моделирование и расчет прочностных свойств стекла». // «Стекло и керамика», № 12, 2005, с. 14–17.
3. СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия».
4. СНиП 23-01-99 «Строительная климатология».
5. Проект prEN 13474-1 «Стекло в строительстве. Расчет оконных стекол». Часть 1: «Общее обоснование расчета».
6. Проект prEN 13474-2 «Стекло в строительстве. Расчет оконных стекол». Часть 2: «Расчет однородно распределенных нагрузок».
7. ГОСТ 111-2001 «Стекло листовое. Технические условия».
8. ГОСТ 30698-2000 «Стекло закаленное строительное. Технические условия».
9. Британские строительные нормы и правила BS 6180:1982 «Защитные преграды внутри и вокруг зданий».