

Аширбаев Шохрух,

студент бакалавриата;

Нафасов Расул,

студент бакалавриата;

Ракутубе Радувула,

студент бакалавриата;

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,

г. Санкт-Петербург, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАНАРНОГО ОСТЕКЛЕНИЯ СО СПАЙДЕРНЫМ КРЕПЛЕНИЕМ

Аннотация. Сегодня инженерия стала неотъемлемой частью инвестиционно-строительного процесса. Это своего рода – «мост через реку знаний».

Ключевые слова: спайдер, фитинги, остекление, фасад, стекло.

Практика инженера позволяет работать более тесно со всеми участниками проекта: от разработки документации до ввода в эксплуатацию, что значительно сокращает время строительства и улучшает эффективность проекта. Проводимые всесторонние опыты приводят к многократному повышению качества принимаемых решений, значительному уменьшению количества ошибок, которые проявляются позже: на этапе строительства, – что приводит к потере, несоизмеримой с затратами на внесение изменений в проект на ранней стадии.

Использование планарного остекления со спайдерным креплением обусловлено актуальностью и необходимостью введения данной технологии, так как она открывает новые возможности для архитекторов и проектировщиков, но до сих пор изучена недостаточно, чтобы использоваться повсеместно при проектировании зданий и сооружений.

Таким образом, мы можем заключить, что инженер задаёт темп техническому развитию. За ним постоянно остаётся последнее научное слово в решении острых проблем.

Область светопрозрачных ограждающих конструкций является наиболее динамично развивающейся отраслью фасадного рынка. На смену металлопластиковым окнам пришли алюминиевые витражные системы. Теперь на их место претендует безрамное планарное остекление.

Термин «планарное остекление» обозначает систему примыкающих друг к другу светопрозрачных элементов, не разделенных рамами или перегородками из непрозрачных материалов [3].

Несмотря на высокую себестоимость, данный тип облицовки имеет заведомо более высокий эстетический потенциал, а значит и спрос. Наиболее современные архитектурные решения, априори, подразумевают их использование [4; 5].

Основным замедляющим фактором внедрения планарного остекления является его цена. Несмотря на использование отнюдь не инновационных материалов, таких как стали (преимущественно нержавеющей) и стекла (закалённого или ламинированного), в образовании стоимости вмешивается ряд факторов. Таких как обработка стекла, в большинстве своём импортные комплектующие (спайдеры, фитинги), нестабильность несущей способности стекла, а также относительно невысокая изученность статических и динамических особенностей конструкции.

Задачей нашего исследования является пошаговое уточнение фактических параметров использования стекла, а также повышение уровня доверия к его несущим свойствам. Не секрет, что ряд смелых конструктивных идей с применением стекла в России отвергается, по причине малой изученности его строительных качеств. Нормативной документации по этому вопросу на данный момент в России не существует. Даже в Германии нормативные уточнения по поводу планарного остекления вышли только в 2015 году. На этом фоне усилиями студентов и сотрудников Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета проведён ряд экспериментальных исследований, позволяющих с большой точностью производить расчёт планарных конструкций.

Обзор литературы

На сегодняшний день рынок предлагает большой ассортимент различных систем крепёжных элементов для стекла (фитинги, спайдеры) [7; 8; 9], однако рекомендаций по расчёту и подбору стеклянного заполнения нет ни в одной из них! Это связано, безусловно, и с коммерческой заинтересованностью компаний, выпускающие данные системы.

Анализ доступной литературы [7] показал, что нет общедоступной информации и конкретных данных о величинах и зависимостях точечных креплений стекла. Также не существует нормативных документов, регламентирующих данный вопрос. Нет чётких правил расстановки отверстий под точечное крепление в пластинах из стекла, на подобии тех, которые присутствуют в стальных конструкциях [9], где есть минимальные рекомендуемые расстояния между отверстиями вдоль и поперёк усилия, а также минимальные рекомендуемые расстояния от кромок элементов до центра отверстия, выраженные через диаметр отверстия. На данный момент компании, производители систем, основанных на точечном креплении, выполняют собственных испытания или заказывают их в независимых организациях. Именно на этих закрытых исследованиях выполняется проектирование объектов.

Постановка проблемы, задачи

Благодаря определённому практическому опыту, различной степени детализации расчётов (с помощью ПК ANSYS, SCAD или MEPLA), а также значительных коэффициентов запаса, планарные конструкции проектируются и в нашей стране. Вниманию и изучению авторов данной работы подверглась конструкция планарного остекления со стеклянными несущими рёбрами. Предваряя исследование конструкции в целом, нашей задачей стало исследование несущей способности точечного крепления представленного узлового соединения (рис. 1).



Рисунок 1 – Пример соединения металлическими фитингами стеклянных элементов систем планарного остекления между собой [9]

Усилия между стеклянными пластинами в конструкции передаются точно, по внутреннему контуру отверстия в стекле, куда вставляется металлический фитинг. Место контакта фитинга со стеклом уплотнено резиновой подкладкой. Рассмотрение напряжённно-деформируемого состояния около отверстий в стекле надо начать с самого простого случая. Растягиваемая пластина будет иметь конечную ширину и отверстие посередине.

На первоначальном этапе, предваряющим натурный эксперимент, задача будет решаться численными методами, путём создания и нагружения расчётной схемы в ПК SCAD. Вторым этапом исследования станет проведение и выработка методики эксперимента, в результате, которого можно будет сделать выводы о корректности расчётной схемы и собрать статистику данных о несущей способности различных точечных креплений стекла.

Исследование в SCAD

В конструкциях около отверстий, резких переходов сечений, трещин и других неоднородностей всегда возникают напряжения, больше тех, которые получаются расчётом конструкции по ослабленному сечению по методикам из дисциплины «Сопротивление материалов». Это явление называется концентрацией напряжений. А элементы конструкций, его вызывающие, – концентраторами напряжений.

Коэффициент α_σ , равный отношению максимального напряжения в ослабленном сечении σ_{\max} к номинальному напряжению $\sigma_{\text{ном}}$ в ослабленном сечении, которое получено по формулам сопротивления материалов, называется коэффициентом концентрации напряжений.

Рассмотрение напряжённо-деформируемого состояния около отверстий в стекле надо начать с самого простого случая. Растягиваемая пластина будет иметь конечную ширину и отверстие посередине. На первоначальном этапе, предваряющим натурный эксперимент, задача будет решаться численными методами, путём создания и нагружения расчётной схемы в ПБК SCAD. Картина распределения напряжений по отверстию представлена на рис. 2.

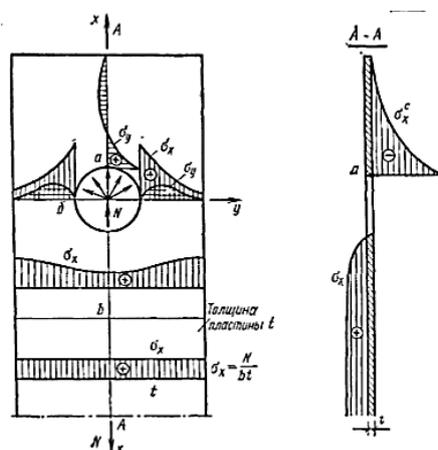


Рисунок 2 – Распределение напряжений около отверстия в пластине

Представляемая задача по своей сути напоминает задачу Кирша о растягиваемой пластине бесконечной ширины, с отверстием посередине. В задаче Кирша коэффициент концентрации напряжений равен трём. Однако рассматриваемая задача отличается от варианта Кирша, во-первых, тем, что отношение диаметра отверстия к ширине пластины не стремится к нулю, а во-вторых, нагрузка приложена непосредственно к отверстию, а в месте приложения нагрузки также возникает концентрация напряжений (принцип Сен-Венана).

Таким образом, концентрация напряжений вокруг отверстия будет возникать и из-за наличия в пластине отверстия и из-за того, что нагрузка

приложена непосредственно по его кромке. Благодаря совместному действию этих двух факторов, коэффициент концентрации напряжений будет больше получаемого по решению задачи Кирша.

Первая проблема, заключающаяся в конечной ширине растягиваемой пластины, широко изучена в работе Савина Г.Н. Указанный автор решал задачи по определению распределений напряжений у отверстий в пластинах, в которых отношение диаметра отверстия к ширине пластины не стремится к нулю. Его результаты были получены аналитическим методом и могут служить своеобразным ориентиром для оценки результатов, получаемых численными методами. Полученный Савиным график зависимости коэффициента концентрации напряжений α_σ от отношения диаметра отверстия к ширине пластины d/b представлен на рисунке 3.

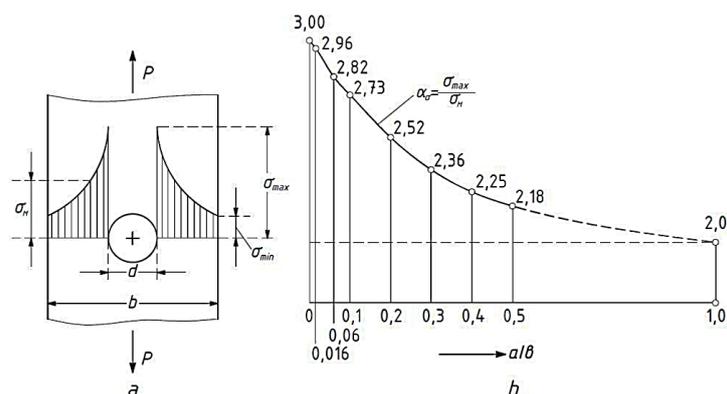


Рисунок 3 – а) распределение напряжений по сечению отверстия;
б) график зависимости α_σ от d/b [7]

Вторая проблема, заключающаяся в дополнительных напряжениях по отверстию из-за смятия отверстия, осталась не решённой в отечественной и зарубежной литературе. Эти дополнительные напряжения в нашей задаче будут искомыми и будут определяться как разность напряжений, получаемых при растягивании пластины силами, приложенными по кромке пластины (задача Кирша, с дополнениями Савина), и напряжений, получаемых при растягивании пластины силами, приложенными по кромке отверстия. Искомые напряжения будут подвергнуты анализу, с целью выявления зависимостей от различных факторов.

Следует заметить, что аналитическое решение подобных задач довольно сложно и трудоёмко. В случае проведения строительных экспертиз и проверок в любом случае необходимо будет использовать программные комплексы, применяющие численные методы оценки принятых технических решений. В рамках научной исследовательской работы была создана расчётная схема для численного решения подобных задач.

Расчётная модель представляет собой пластину с отверстием, получаемую путём создания контура триангуляции в ПК SCAD. Отверстие представляет собой пустой контур. Справа пластина закреплена в крайних узлах по направлениям всех степеней свободы. Только данный вид закрепления позволил получить картину распределения напряжений, как при аналитическом решении.

Внешнее усилие прилагается по контуру отверстия в виде равномерно распределённой нагрузки, по длине равной диаметру отверстия. Такое задание нагрузки вызвано, во-первых, стремлением приблизить нагружение расчётной модели к реальной работе в конструкции, а во-вторых, – стремлением провести аналогии со стальными конструкциями, где при расчёте на смятие пластин берётся диаметр болта. В рассматриваемом случае диаметр металлического фитинга, который, к тому же, в месте контакта со стеклом обёрнут резиновыми уплотняющими подкладками, будет равен диаметру отверстия. Пример расчётной схемы представлен на рисунке 4.

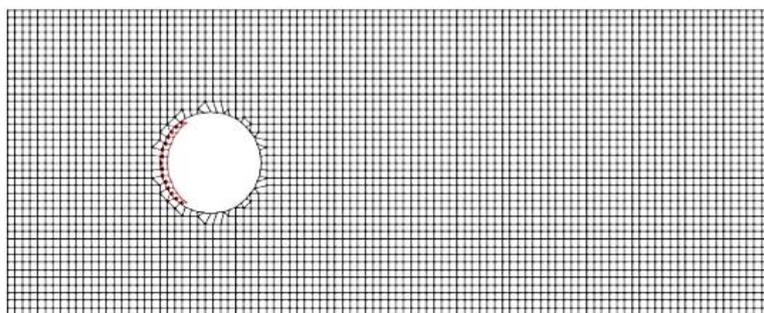


Рисунок 4 – Пример расчётной схемы

В ходе выполнения работы возник резонный вопрос о корректности данной расчётной модели. Можно ли верить результатам, получаемым

данными методами? Для оценки корректности, расчётная модель подвергается испытанию задачей Кирша, с уже известным аналитическим решением Савина. Если получаемые напряжения сходятся со значениями, полученными аналитическим методом, значит, рассматриваемая расчётная модель работает правильно и может быть использована для испытания стеклянных пластин с различным расположением отверстий.

Регулирование расчётной модели осуществляется двумя параметрами: шагом триангуляции и количеством узлов, по которым вычерчивается контур отверстия.

Чем меньше шаг триангуляции, тем меньше размер элемента, с которого ПК SCAD будет выдавать среднее напряжение [9; 10]. Соответственно, тем более отчётливо можно оценить всплеск напряжений в ослабленном сечении.

Чем меньше узлов в контуре отверстия, тем меньше получаемый многоугольник похож на окружность и тем больше коэффициент концентрации напряжений по его краям.

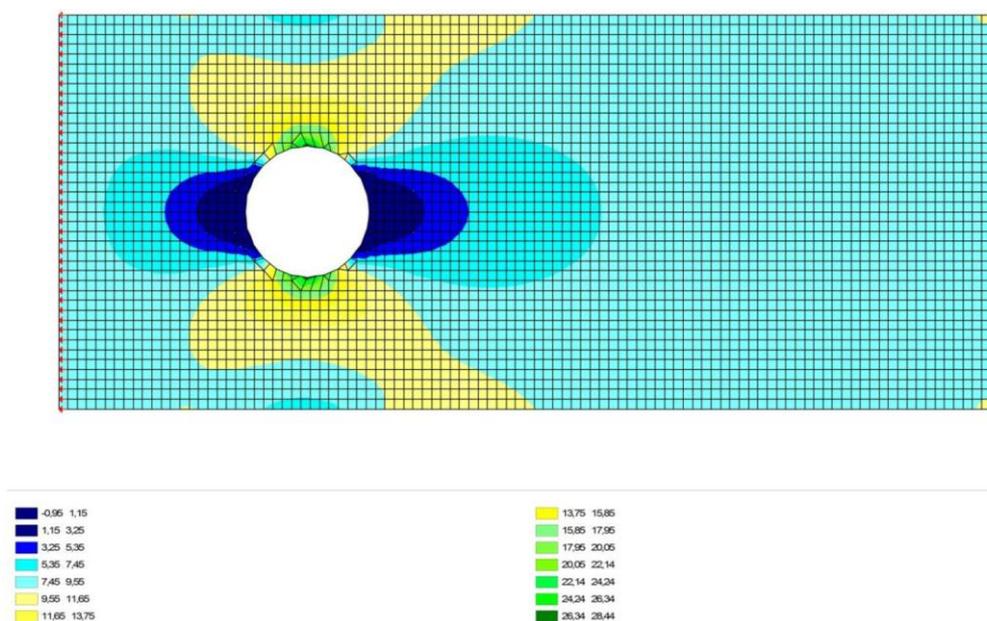


Рисунок 5 – Картина распределения напряженной в расчетной при приложении сил к кромке пластины (Задача Кирша)

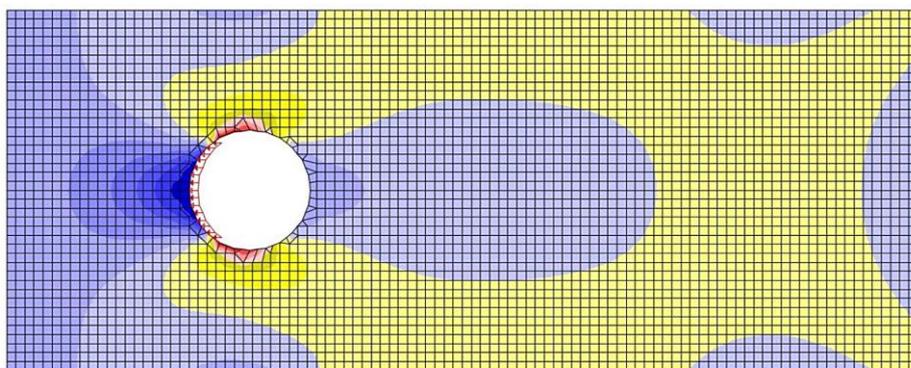


Рисунок 6 – Картина распределения напряжений в расчётной модели при приложении сил к кромке отверстия

Следует отметить, что растягивающие напряжения, возникающие по краям отверстия, по своему абсолютному значению будут больше сжимающих напряжений, возникающих в центральной зоне прилагаемой нагрузки. Специфика стекла, как хрупкого материала, позволяет сделать предположение, что разрушение будет проходить по растянутой зоне отверстия.

В итоге, по результатам выполнения серии расчетов в ПК SCAD, был получен график зависимости коэффициента концентрации напряжений от расстояния между краем пластины и центром отверстия.

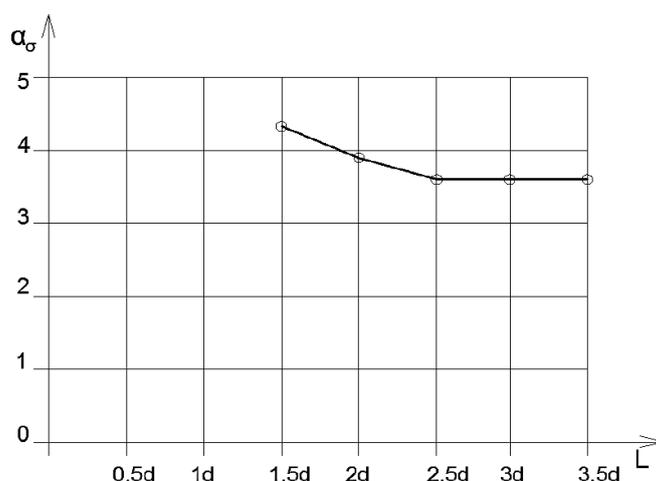


Рисунок 7 – График зависимости α_σ от расстояния до отверстия

Анализируя график, можно сделать вывод о том, что увеличение расстояния отверстия от кромки больше двух с половиной диаметров не приведёт к снижению концентрации напряжений и, следовательно, не повысит прочность конструкции. На графике показан результат проведения серии экспериментов в ПК SCAD. Однако по нему можно судить лишь о характере изменения коэффициента концентрации напряжений в зависимости от расстояния между краем пластины и центром отверстия. Это связано с тем, что концентрация напряжений также зависит от прилагаемой нагрузки. Чем больше будет нагрузка, тем больше будут усилия смятия в отверстии, и тем больше будет концентрация напряжения.

Необходимо отметить и тот факт, что обычно в планарном остеклении используется закалённое стекло толщиной 6-19 мм, а диаметры отверстий обычно колеблются в интервале от 12 до 36 мм [3; 9; 10] Из этого можно сделать вывод, что зачастую отверстия нельзя располагать к кромке пластины ближе, чем полтора диаметра отверстия. Это следует из технических условий выполнения отверстий.

Результаты, полученные в ПК SCAD, должны быть проверены в ходе эксперимента, который позволит сделать окончательный вывод о корректности выбранной расчётной схемы и полученных по ней данных.

Вывод.

В результате нашего исследования были получены диаграммы концентрации напряжений в зависимости от расстояния между кромкой пластины и центром отверстия. Анализ графиков показывает, что увеличение расстояния от края отверстия более двух с половиной диаметров не приведет к уменьшению концентрации напряжений и, следовательно, не увеличивает прочность конструкции. Также были получены оправданные Правила размещения точки крепления:

1. принятое расстояние от края пластины к проксимальному краю отверстия не должно быть меньше 2,5 диаметров;
2. принятые диаметры отверстий должны быть не менее толщины стекла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грякалов Н.А. Стекло в градостроительных стратегиях // *Социология города*. – 2013. – №4. – С. 54-71.
2. Шутов А.И., Новиков И.А., Франк А.Н. Прочность ламинированного безопасного стекла для строительных целей // *Стекло и керамика*. – 2001. – Т. 58. – №5-6. – С. 203-205.
3. Шутов А.И., Чистяков А.А., Прокофьева Т.П. Распределение напряжений в стекле при воздушно-струйном тушении // *Стекло и керамика*. – 1981. – Т. 38. – №3. – С. 125-128.
4. Шутов А.И., Лалыкин Н.В., Овчинников А.В. Изменение температуры закалки стекла // *Стекло и керамика*. – 1993. – Т. 49. – № 11-12. – С. 516-517.
5. Эпаараччи Я.А., Клаузен П.Д. Эмпирическая модель для прогнозирования поведения усталости стеклопластиковых пластиковых композитов для различных коэффициентов напряжений и тестовых частот // *Композиты Часть А: Прикладная наука и производство*. – 2003. – Т. 34. – №4. – С. 313-326.
6. Краснопольский Б.И., Чесноков А.Г., Чесноков С.А. Численное моделирование и анализ прочностных свойств стекла // *Стекло и керамика*. – 2005. – Т. 62. – №11. – С. 375-378.
7. Корчехчи L.G., Shitova L.A. Усиление в верхушке апекса в стекле // *Стекло и керамика*. – 2001. – Т.58. – № 7-8. – С. 265-267.
8. Louter Ch., Veer F., Belis J. Избыточность армированных стеклянных балок; Температуры, влажности и зависящего от времени поведения адгезионной связи. Конкурсное стекло. – 2008, С. 479-490.
9. Мартина Х., Ингрид Т. Нержавеющая сталь и стекло. Первое издание. Строительная серия. – 2008. – №13. – С. 15-19.
10. Будов В.М. Продление срока службы стеклянных печей может увеличить выпуск листового стекла // *Стекло и керамика*. – 1975. – Т. 32. – № 4. – С. 231-235.
11. <http://week-science.spbstu.ru/conf2013/agenda/926/>