Строительство уникальных зданий и сооружений. ISSN 2304-6295. 5 (32). 2015. 39-49

Construction of Unique Buildings and Structures

journal homepage: www.unistroy.spb.ru

Расположения точечных креплений цельностекольной конструкции

М.С. Холмин[1], **А.В. Галямичев**[2], **К.А. Клюев**[3], **В.Г. Кононов**[4], **А.С. Малков**[5]

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Информация о статье	История	Ключевые слова
УДК 691.615.1 Научная статья	Подана в редакцию 20 марта 2015 Принята 27 апреля 2015	стекло, несущая способность стекла, точеченое крепление стекла, планарное остекление, испытание стекла

АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрено напряжённо-деформируемого состояния около отверстий в стекле с помощью ПВК SCAD на примере задачи Кирша. Данное исследование необходимо для определения расположений точечных креплений в стеклянных конструкциях. В результате были получены: график зависимости коэффициента концентрации напряжений от расстояния до отверстия, диаграммы концентрации напряжений. В работе приняты минимальные расстояния от края пластины до края отверстия.

Содержание

[1] *Контактный автор:*
+7 (981) 755 4946, Holmin-mihail@mail.ru (Холмин Михаил Сергеевич, студент)
[2] +7 (911) 811 0719, galyamichev@yandex.ru (Галямичев Александр Викторович, ассистент)
[3] +7 (911) 113 7830, kluyevkirill@yandex.ru (Клюев Кирилл Алексеевич, студент)
[4] +7 (951) 660 3131, Kononowycheslav@yandex.ru (Кононов Вячеслав Геннадьевич, студент)
[5] +7 (960) 271 5821, Gerostrat07@yandex.ru (Малков Антон Сергеевич, студент магистратуры)

1. Введение

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 [1].

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 [2,3].

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 готовятся к выходу только в 2015 году. На этом фоне, усилиями студентов и сотрудников Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета, готовится ряд экспериментальных исследований, позволяющих с большой точностью производить расчёт планарных конструкций.

Рисунок 1. Пример применения планарного остекления [1]

Рисунок 2. Пример применения планарного остекления [14]

2. Обзор литературы

На сегодняшний день рынок предлагает большой ассортимент различных систем крепёжных элементов для стекла (фитинги, спайдеры) [4,5,6], однако рекомендации по расчёту и подбору стеклянного заполнения не были найдены. Это связано, безусловно, и с коммерческой заинтересованностью компаний, выпускающие данные системы.

Анализ доступной литературы показал [4,8,11], что нет общедоступной информации и конкретных данных о величинах и зависимостях точечных креплений стекла [7,10]. 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 [13], 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 [9,12]. 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.

Рисунок 3. Примеры применения спайдерных систем крепления в планарном остеклении [17]

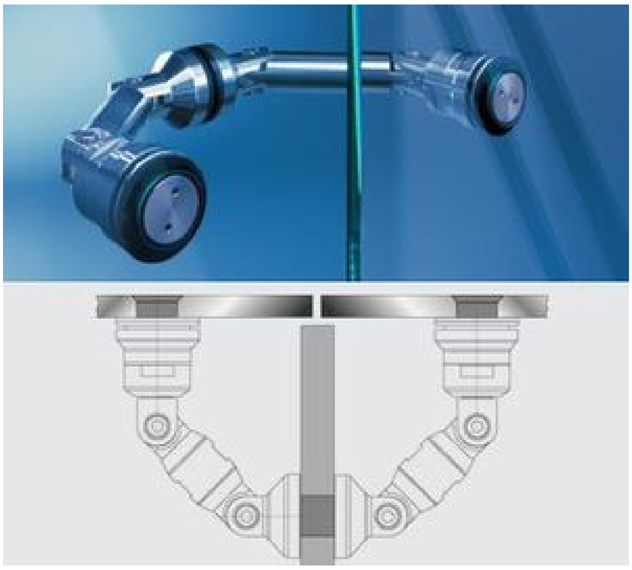

Рисунок 4. Пример применения точечных систем крепления (коннекторов) в планарном остеклении [14]

3. 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 (рисунок 5).

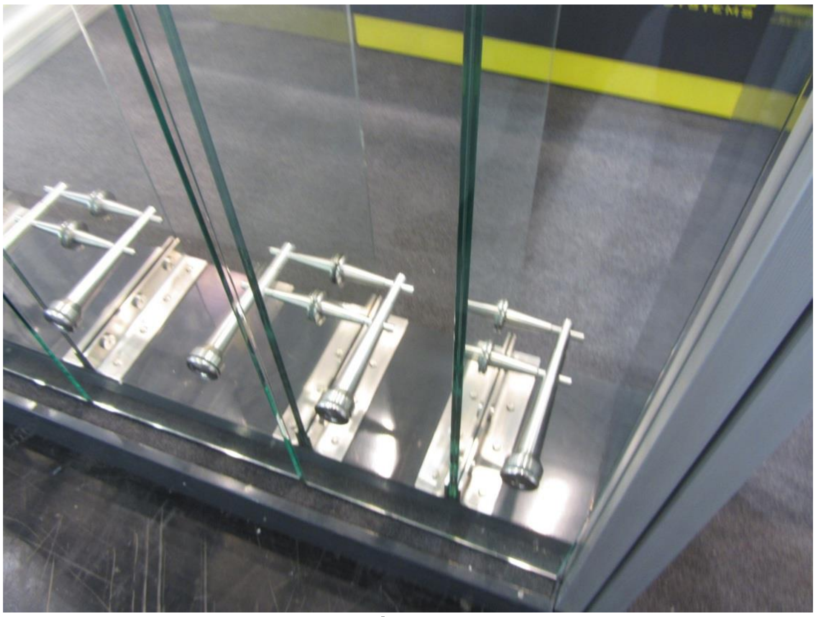

Рисунок 5. Пример соединения металлическими фитингами стеклянных элементов систем планарного остекления между собой [14]

Усилия между стеклянными пластинами в конструкции передаются точечно, по внутреннему контуру отверстия в стекле, куда вставляется металлический фитинг. Место контакта фитинга со стеклом уплотнено резиновой подкладкой.

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 вычислительном комплексе SCAD (далее – 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.

4. Исследование в SCAD

В конструкциях около отверстий, резких переходов сечений, трещин и других неоднородностях всегда возникают напряжения, больше тех, которые получаются расчётом конструкции по ослабленному сечению методиками из сопротивления 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 $\sigma_{ном}$ 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 SCAD. Картина распределения напряжений по отверстию представлена на рисунке 6.

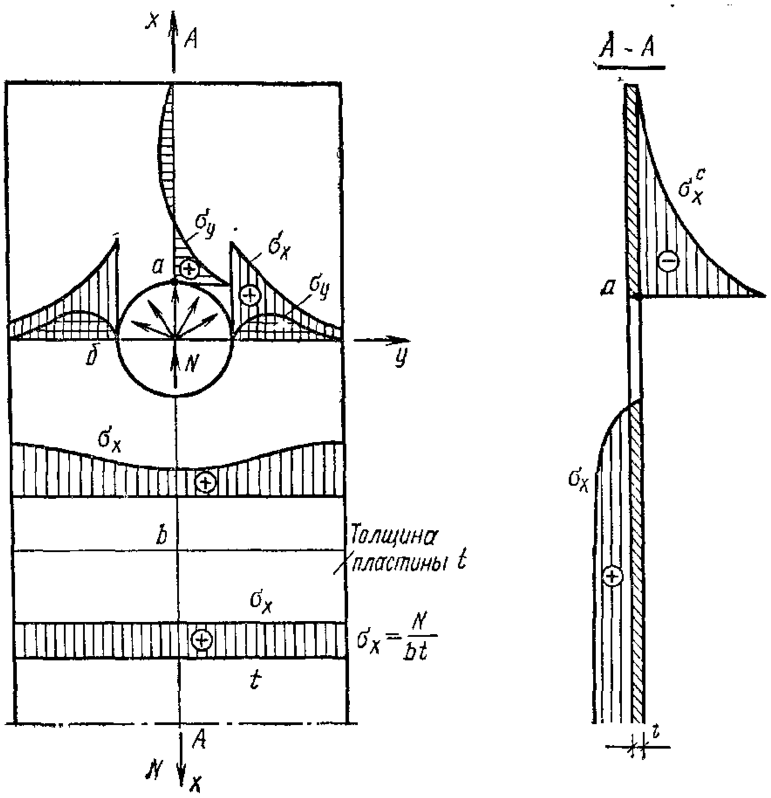

Рисунок 6. Распределение напряжений около отверстия в пластине [19]

Представляемая задача по своей сути напоминает задачу Кирша о растягиваемой пластине бесконечной ширины, с отверстием посередине [22]. 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 [22]).

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 [20]. Савин 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 7.

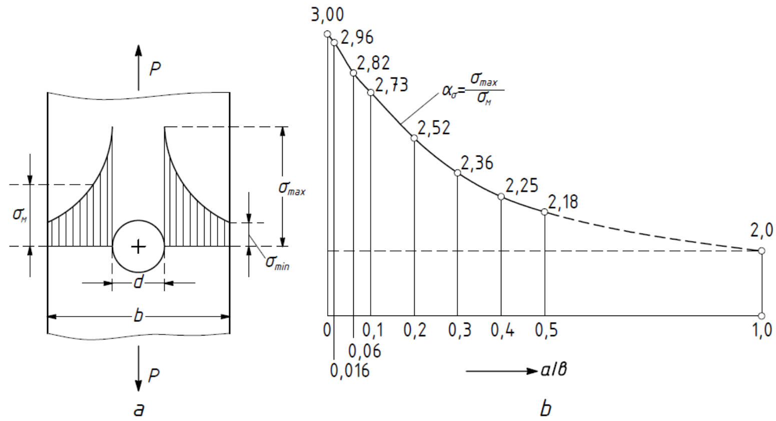

Рисунок 7. а) Распределение напряжений по сечению отверстия. б) График зависимости α_σ от d/b [19]

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 определятся 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 поверок 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 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 8.

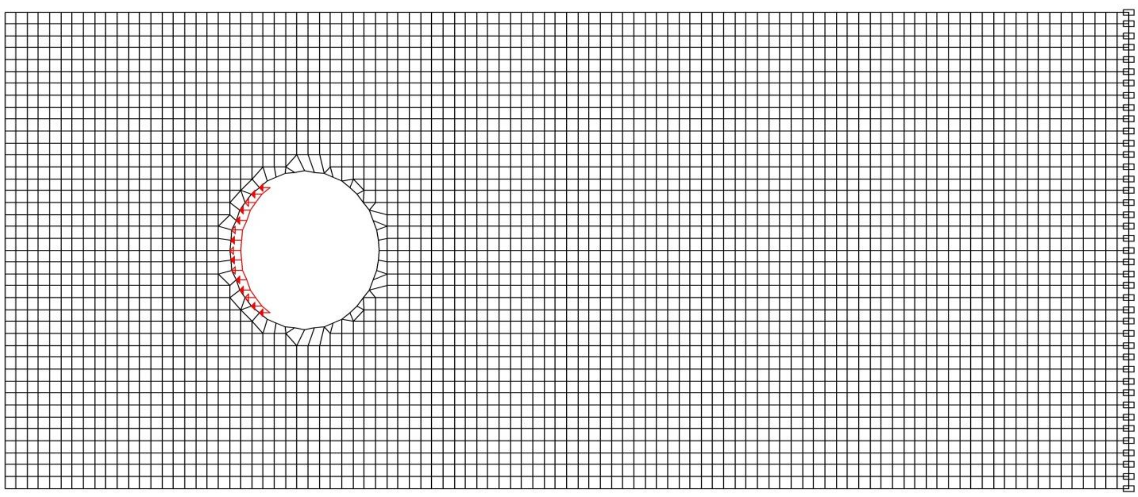

Рисунок 8. Пример расчётной схемы

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 SCAD будет выдавать среднее напряжение [16,19]. 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.

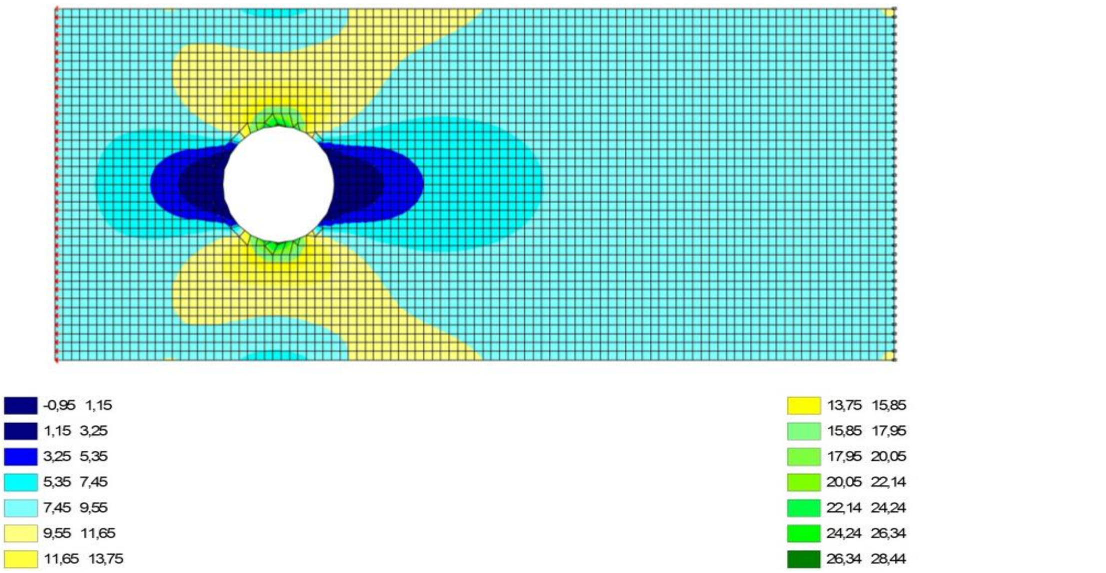

Рисунок 9. Картина распределения напряжений в расчётной модели при приложении сил к кромке пластины (Задача Кирша)

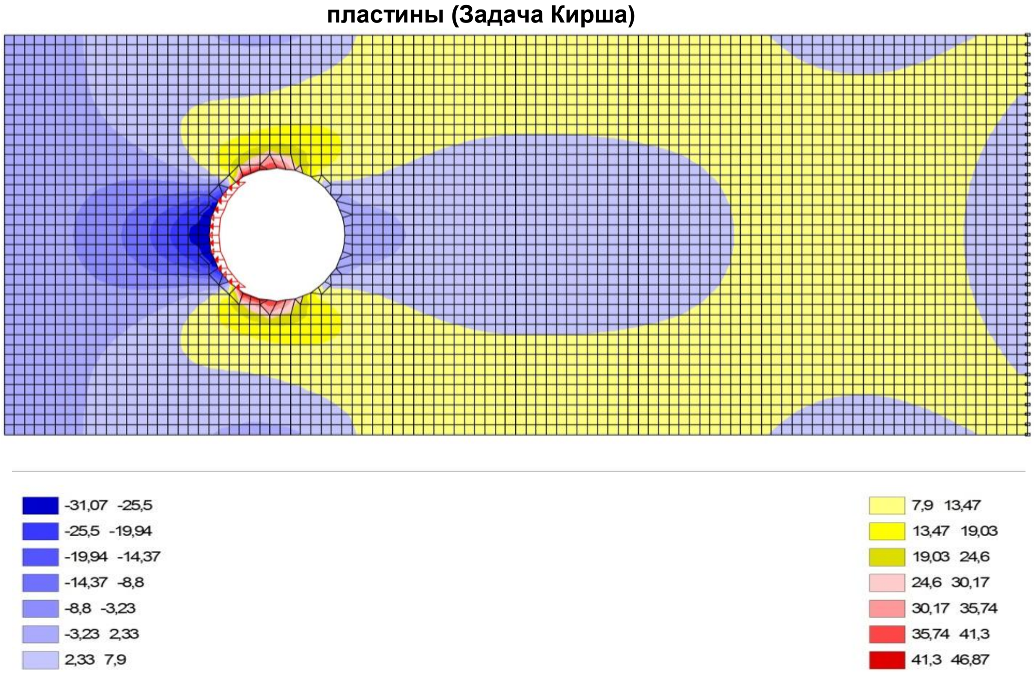

Рисунок 10. Картина распределения напряжений в расчётной модели при приложении сил к кромке отверстия

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 SCAD был получен график зависимости коэффициента концентрации напряжений от расстояния между краем пластины и центром отверстия.

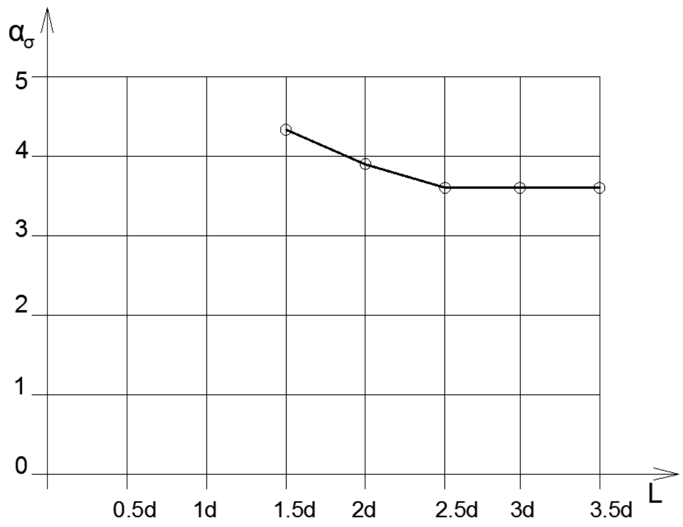

Рисунок 11. График зависимости α_σ от расстояния до отверстия

Анализируя график, можно сделать вывод о том, что увеличение расстояния от центра отверстия до кромки больше двух с половиной диаметров не приведёт к снижению концентрации напряжений и, следовательно, не повысят прочность конструкции. На графике показан результат проведения серии экспериментов в 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 [1, 9, 17]. 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 SCAD, должны быть проверены в ходе эксперимента, который позволит сделать окончательный вывод о корректности выбранной расчётной схемы и полученных по ней данных.

5. Вывод

В результате исследования были получены диаграммы концентрации напряжений в зависимости от расстояния между кромкой пластины и отверстием. Анализ графиков показывает, что увеличение расстояния от центра отверстия до кромки более двух с половиной диаметров не приведет к уменьшению концентрации напряжений и, следовательно, не увеличивает прочность конструкции. Также, были получены правила размещения точки крепления стекла:

1. Расстояние от края пластины до края отверстия не должно быть меньше 2.5 диаметров.
2. Принятые диаметры отверстий должны быть не менее толщины стекла.

Литература

[1]. Shutov A.I., Novikov I.A., Frank A.N. (2001). Strength of Laminated Safety Glass for Construction Purposes. Glass and Ceramics. 2001. T. 58. No. 5-6. Pp. 203-205.

[2]. Guseva E.Yu., Gulyukin M.N. (2001). Deformation Resistance of Glass Ceramic Material. Glass and Ceramics. 2001. T. 58. No. 1-2. Pp. 17-20.

[3]. Barinov Yu.D., Livshits B.Kh. (1971). Resistance of Glass-Enamel Coatings to Mechanical Effects. Glass and Ceramics. 1971. T. 28. No 5. Pp. 299-301.

[4]. Shutov A.I., Chistyakov A.A., Prokof'eva T.P. (1981). Stress Distribution in Glass During Air-Jet Quenching. Glass and Ceramics. 1981. Vol. 38. No. 3. Pp. 125-128.

[5]. Shutov A.I., Lalykin N.V., Ovchinnikov A.V. (1993). Alteration of The Tempering Stress Diagram for Plate Glass. Glass and Ceramics. 1993. Vol. 49. No. 11-12. Pp. 516-517.

[6]. Epaarachchi J.A., Clausen P.D. (2003). An Empirical Model for Fatigue Behavior Prediction of Glass Fibre-Reinforced Plastic Composites for Various Stress Ratios and Test Frequencies. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2003. Vol. 34. No. 4. Pp. 313-326.

[7]. Krasnopolskii B.I., Hesnokov A.G., Chesnokov S.A. (2005). Numerical modeling and analysis of strength properties in glass. Glass and Ceramics. 2005. Vol. 62. No. 11. Pp. 375-378.

[8]. Kopchekchi L.G., Shitova L.A. (2001). Stresses at Crack Apexes in Glass. Glass and Ceramics. 2001. T. 58. No. 7-8. pp. 265-267.

[9]. Hess, R. (2004). Material Glass. Structural Engineering International. 2004, No. 14(2). pp. 76-79.

[10]. Louter, Ch., Veer, F. Belis, J. (2008). Redundancy of reinforced glass beams; temperature, moisture and time dependent behaviour of the adhesive bond. Challenging Glass. 2008. pp. 479-490.

[11]. Born, P. (2005). Modern design in Glazing – Glass Bonding in Automotive, Proceedings of the 9th International Conference on Architectural and Automotive Glass (GPD). 2005. pp. 679-680.

[12]. Schittich C., Staib G., Balkow D., Schuler M., Sobek W. Glass Construction Manual. 2005. pp.158-164.

[13]. Bergmeister, K.; Englhardt, O. (2007). The Aesthetics of Transparency – Conceptual Design for an All-Glass Façade System. Proceedings of the 10th International Conference on Architectural and Automotive Glass (GPD). 2007. pp. 130-133

[14]. Martina H., Ingrid T. (2008). Stainless Steel and Glass First Edition. Building Series. 2008. No. 13. pp. 15-19.

[15]. Budov V.M. (1975). Extending the Campaign Life of Glass Furnaces Can Boost Sheet-Glass Output. Glass and Ceramics. 1975. T. 32. No. 4. pp. 231-235.

[16]. Alekseev V.N., Pakhumkov I.M., Yaroker Kh.G. (1975). Improving the Production of Glass Blocks at the Lisichansk Glass Factory. Glass and Ceramics. 1975. T. 31. No. 6. pp. 412-413.

[17]. Андреева Е. Н. Тенденции внешнеэкономической деятельности предприятий стекольной отрасли // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. 2013. № 3. С. 163-166.

[18]. Грякалов Н. А. Стекло в градостроительных стратегиях // Социология города. 2013. №. 4. С. 54-71.

[19]. Савин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий. Киев: Наукова Думка, 1968. 883 с.

[20]. Савин Г.Н. Механика деформируемых тел. Киев: Наукова Думка, 1979. 451 с.

[21]. Демидов С.П. Теория упругости. М.: Высшая школа, 1979. 225 с.

Glass single-point fixing test

M.S. Holmin[1], A.V. Galyamichev[2], K.A. Kluyev[3], V.G. Kononov[4], A.S. Malkov[5]

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Polytechnicheskaya st., St.Petersburg, 195251, Russia.

ARTICLE INFO	Article history	Keywords
Original research article	Received 20 March 2015 Accepted 27 April 2015	point fixing, fixing system, spider system, fixing test, glass construction

ABSTRACT

Strain-stress distribution about holes in glass by means of PCK SCAD on the example of Kirsch's task was considered in this article. This research is necessary for definition of location of point-fixing in glass designs. As a result it was received: the graph of dependence of stress concentration factor on distance to the hole, diagram of stress concentration. Also minimum distances from edge of a plate to edge of the hole were accepted.

1 *Corresponding author:*
+7 (981) 755 4946, Holmin-mihail@mail.ru (Mikhail Sergeevich Holmin, Student)
2 +7 (911) 811 0719, galyamichev@yandex.ru (Aleksandr Viktorovich Galyamichev, Assistant)
3 +7 (911) 113 7830, kluyevkirill@yandex.ru (Kirill Alekseevich Kluyev, Student)
4 +7 (951) 660 3131, Kononowycheslav@yandex.ru (Vyacheslav Gennadyevich Kononov, Student)
5 +7 (960) 271 5821, Gerostrat07@yandex.ru (Anton Sergeevich Malkov, Graduate Student)

References

[1]. Shutov A.I., Novikov I.A., Frank A.N. (2001). Strength of Laminated Safety Glass for Construction Purposes. Glass and Ceramics. 2001. T. 58. No. 5-6. pp. 203-205.

[2]. Guseva E.Yu., Gulyukin M.N. (2001). Deformation Resistance of Glass Ceramic Material. Glass and Ceramics. 2001. T. 58. No. 1-2. pp. 17-20.

[3]. Barinov Yu.D., Livshits B.Kh. (1971). Resistance of Glass-Enamel Coatings to Mechanical Effects. Glass and Ceramics. 1971. T. 28. No 5. pp. 299-301.

[4]. Shutov A.I., Chistyakov A.A., Prokof'eva T.P. (1981). Stress Distribution in Glass During Air-Jet Quenching. Glass and Ceramics. 1981. T. 38. No. 3. pp. 125-128.

[5]. Shutov A.I., Lalykin N.V., Ovchinnikov A.V. (1993). Alteration of The Tempering Stress Diagram for Plate Glass. Glass and Ceramics. 1993. T. 49. No. 11-12. pp. 516-517.

[6]. Epaarachchi J.A., Clausen P.D. (2003). An Empirical Model for Fatigue Behavior Prediction of Glass Fibre-Reinforced Plastic Composites for Various Stress Ratios and Test Frequencies. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2003. T. 34. No. 4. pp. 313-326.

[7]. Krasnopolskii B.I., Hesnokov A.G., Chesnokov S.A. (2005). Numerical Modeling And Analysis of Strength Properties in Glass. Glass and Ceramics. 2005. T. 62. No. 11. pp. 375-378.

[8]. Kopchekchi L.G., Shitova L.A. (2001). Stresses at Crack Apexes in Glass. Glass and Ceramics. 2001. T. 58. No. 7-8. pp. 265-267.

[9]. Hess, R. (2004). Material Glass. Structural Engineering International. 2004, No. 14(2). pp. 76-79.

[10]. Louter, Ch., Veer, F. Belis, J. (2008). Redundancy of reinforced glass beams; temperature, moisture and time dependent behaviour of the adhesive bond. Challenging Glass. 2008. pp. 479-490.

[11]. Born, P. (2005). Modern design in Glazing – Glass Bonding in Automotive, Proceedings of the 9th International Conference on Architectural and Automotive Glass (GPD). 2005. pp. 679-680.

[12]. Schittich C., Staib G., Balkow D., Schuler M., Sobek W. Glass Construction Manual. 2005. pp.158-164.

[13]. Bergmeister, K.; Englhardt, O. (2007). The Aesthetics of Transparency – Conceptual Design for an All-Glass Façade System. Proceedings of the 10th International Conference on Architectural and Automotive Glass (GPD). 2007. pp. 130-133

[14]. Martina H., Ingrid T. (2008). Stainless Steel and Glass First Edition. Building Series. 2008. No. 13. pp. 15-19.

[15]. Budov V.M. (1975). Extending the Campaign Life of Glass Furnaces Can Boost Sheet-Glass Output. Glass and Ceramics. 1975. T. 32. No. 4. pp. 231-235.

[16]. Alekseev V.N., Pakhumkov I.M., Yaroker Kh.G. (1975). Improving the Production of Glass Blocks at the Lisichansk Glass Factory. Glass and Ceramics. 1975. T. 31. No. 6. pp. 412-413.

[17]. Andreyeva Ye. N. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo sotsialno-ekonomicheskogo universiteta*. 2013. No. 3. Pp. 163-166. (rus)

[18]. Gryakalov N. A. *Sotsiologiya goroda*. 2013. No. 4. Pp. 54-71. (rus)

[19]. Savin G.N. *Raspredeleniye napryazheniy okolo otverstiy* [The stress distribution around holes]. Kyiv: Naukova Dumka, 1968. 883 p. (rus)

[20]. Savin G.N. *Mekhanika deformiruyemykh tel* [Mechanics of deformable bodies]. Kyiv: Naukova Dumka, 1979. 451 p. (rus)

[21]. Demidov S.P. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow: Vysshaya shkola, 1979. 225 p. (rus).

Холмин М.С., Галямичев А.В., Клюев К.А., Кононов В.Г., Малков А.С. Расположения точечных креплений цельностекольной конструкции // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №5(32). С. 39-49.

Holmin M.S., Galyamichev A.V., Kluyev K.A., Kononov V.G, Malkov A.S. Glass single-point fixing test. Construction of Unique Buildings and Structures, 2015, 5(32), Pp. 39-49. (rus)