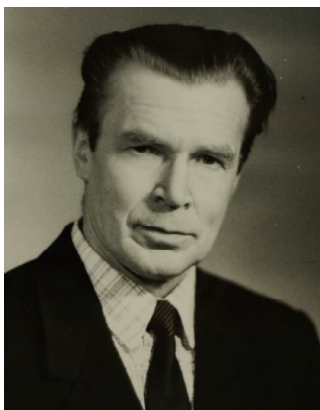




Пыринов Борис Владимирович родился в 1933 г. В 1955 г. окончил Новосибирский институт инженеров железнодорожного транспорта (НИИЖТ) по специальности инженер путей сообщения по мостам и тоннелям. В настоящее время работает главным специалистом ООО «Опора». Кандидат технических наук.

Опубликовано более ста научных работ. Автор семи изобретений.

Круг научных интересов — оптимизация конструкций пролетных строений мостов и применение полимерных материалов в мостостроении.

E-mail: pirinov33@mail.ru



Яшнов Андрей Николаевич родился в 1961 г. В 1984 г. окончил с отличием Новосибирский институт инженеров железнодорожного транспорта (НИИЖТ) по специальности «Мосты и тоннели». Кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты» СГУПС, ведущий научный сотрудник лаборатории «Мосты» НИДЦ СГУПС.

Область научных интересов — мониторинг технического состояния строительных конструкций, в том числе сооружаемых с применением композиционных материалов. Имеет около ста научных трудов.

E-mail: yan@stu.ru



Иванов Артём Николаевич родился в 1987 г. В 2010 г. окончил с отличием Сибирский государственный университет путей сообщения по специальности «Мосты и транспортные тоннели». В настоящее время работает младшим научным сотрудником лаборатории «Мосты» НИДЦ СГУПС, аспирант кафедры «Мосты» СГУПС.

Опубликовано 10 научных работ. Круг научных интересов — полимерные композиционные материалы и их применение в мостостроении.

E-mail: a.n.ivanov1@mail.ru

УДК 621.882.6:624.21.09

Б.В. ПЫРИНОВ, А.Н. ЯШНОВ, А.Н. ИВАНОВ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье обосновывается целесообразность использования высокопрочных болтов в узловых соединениях конструкций из полимерных композиционных материалов на примере сравнения соединений на обычных и высокопрочных болтах. Выдвигаются гипотезы по анализу контактных напряжений от натяжения высокопрочного болта между металлической шайбой и стеклопластиковым элементом. Приводятся данные по расчету одноболтового соединения с целью определения формы и толщины шайб под высокопрочные болты М10.

Ключевые слова: соединения, высокопрочные болты, шайбы, стеклопластик, контактные напряжения.

Узловые соединения в конструкциях пролетных строений являются одним из основных мест, требующих детальной проработки. В конструкциях металлических пролетных строений для соединения (стыкования) элементов используются в основном высокопрочные болты и сварка. Данные виды соединений уже достаточно хорошо изучены применительно к металлическим конструкциям. Однако применение новых для строительной отрасли материалов требует поиска иных типов соединений, учитывающих преимущества данных материалов, или же совершенствования существующих.

Работы по исследованию соединений конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) велись с момента появления и внедрения этих материалов в машиностроительную отрасль. По имеющимся в открытой печати публикациям можно сказать, что уже в середине 80-х гг. XX в. применялись такие способы соединения элементов, как болтовые, клепаные, шпильочно-болтовые, сшивные, клеевые, сварные, а также различные комбинированные соединения [1].

В настоящее время узловые соединения пролетных строений из ПКМ в нашей стране выполняются на обычных болтах класса точности «А». В англоязычной литературе встречаются упоминания об исследованиях клеевых соединений [2]. Однако в открытой печати не было найдено никаких исследований о применении высокопрочных болтов в конструкциях из ПКМ. Поэтому в данной статье рассмотрим вопросы, связанные с применением высокопрочных болтов в узловых соединениях пролетных строений из ПКМ.

Для обоснования целесообразности применения высокопрочных болтов в сравнении с обычными болтами был выполнен расчет соединения стеклопластиковых элементов марки СППС-240. Схема соединения приведена на рис. 1.

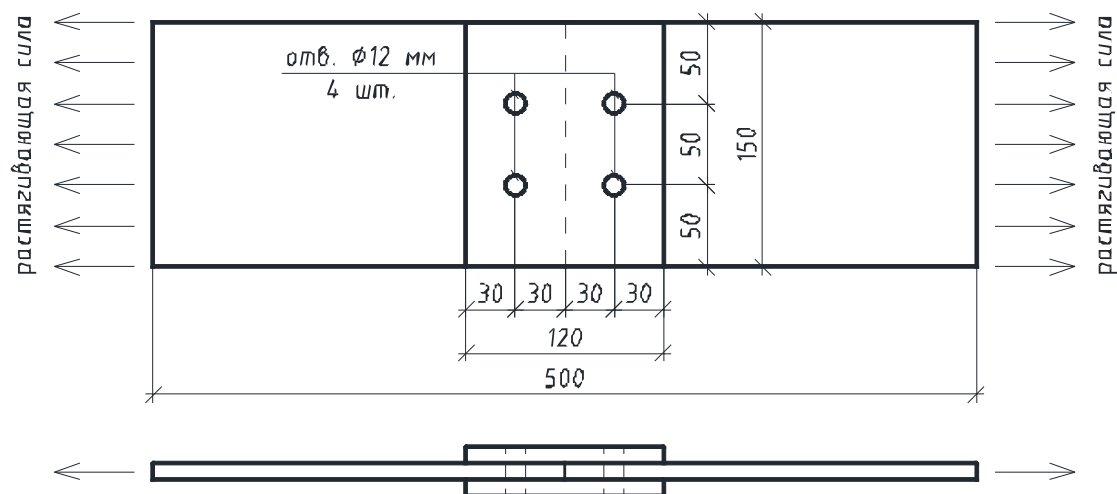


Рис. 1. Схема соединения

В соответствии с требованиями [3] в конструкциях пролетных строений из стеклопластика применяются обычные болты высокого класса точности, поэтому для отверстия диаметром 12 мм болты имеют диаметр также 12 мм. Для обеспечения нормальной работы высокопрочных болтов под отверстие 12 мм они имеют номинальный диаметр 10 мм. Для соединения на обычных болтах предельная растягивающая сила, из условия обеспечения прочности соединения по сдвигу стеклопластика между отверстиями [3], составляет 13,7 кН при толщине листов 10 мм. Для соединения на высокопрочных болтах предельная растягивающая сила составляет 67,0 кН. При этом коэффициент

трения по контакту стеклопластиковых листов был принят равным 0,55 по результатам контрольных измерений, выполненных на деталях из стеклопластика марки СППС-240. Выполненные расчеты показали, что даже при меньшем диаметре высокопрочных болтов соединение обладает значительно большей несущей способностью в сравнении с соединениями на обычных болтах. В пользу высокопрочных болтов говорит также тот факт, что несущая способность болтоконтакта в анизотропном материале не зависит от направления действия усилия, в отличие от обычного болта, где несущая способность болтоконтакта поперек волокон армирования в несколько раз меньше.

Соединения на высокопрочных болтах работают за счет трения поверхностей соединяемых элементов. Давление на элементы для возникновения силы трения обеспечивается посредством затяжки болтов на расчетное усилие и через головку болта (гайку) передается на шайбу и далее на элемент. Ввиду того что пултрузионный (однонаправленно армированный) стеклопластик имеет небольшое расчетное сопротивление сжатию поперек армирующих волокон, необходимо обеспечить его несминаемость под шайбой при натяжении болта на расчетное усилие.

Определение оптимальной формы и размеров шайбы выполнялось на основании решения контактной задачи по распределению нормальных напряжений в элементах одноболтового соединения в программном комплексе *SolidWorks* методом конечных элементов. Задача решалась в упругой постановке с использованием объемных конечных элементов, а также с учетом трения по контактной поверхности шайбы и элемента. Численное значение коэффициента трения по контакту металлической шайбы и стеклопластикового листа было принято на основании контрольных измерений равным 0,35. Соединение состояло из двух стеклопластиковых листов толщиной 10 мм каждый, двух шайб и гаек (в расчетной схеме цилиндры, очерченные по внешнему радиусу стандартных гаек под болт М10). К верхней гайке прикладывалась сила 38,24 кН (расчетное усилие натяжения высокопрочного болта М10), а нижняя гайка жестко закреплялась. Модель соединения в программе *SolidWorks* приведена на рис. 2.

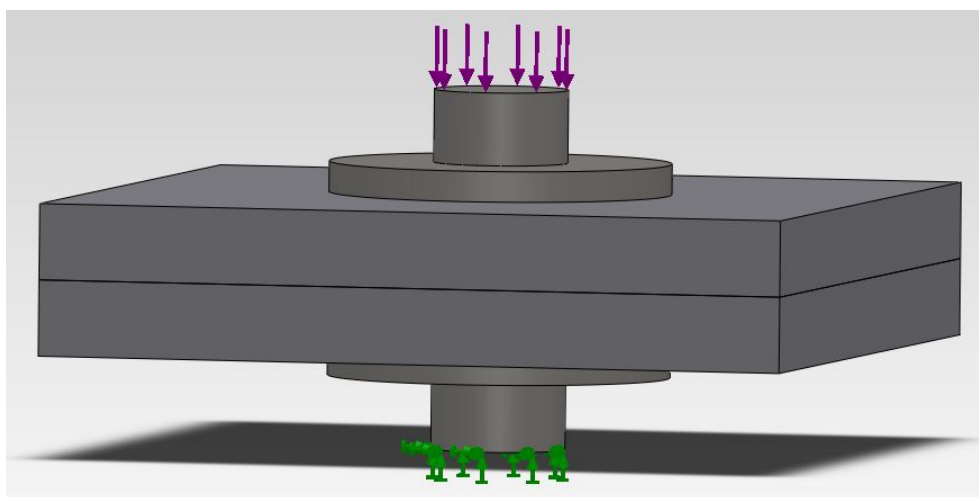


Рис. 2. Расчетная модель соединения в программе *SolidWorks*

При условии равномерного распределения давления от головки болта по контактной поверхности шайбы и стеклопластикового элемента шайба при внутреннем диаметре 12 мм должна иметь внешний диаметр 45 мм. Равномерного распределения давления по контактной поверхности добиться практически невозможно, так как соединение имеет ослабление в виде отверстия, которое, безусловно, является концентратором

ром напряжений, а также давление от гайки передается на ограниченной поверхности, определяемой размерами гайки.

Первоначально толщина шайбы была назначена 10 мм и ставилась задача получить детальную эпюру нормальных напряжений по контактной поверхности.

Сжимающие напряжения по контактной поверхности на стеклопластиковом листе составили: среднее — 30,6 МПа; максимальное — 82 МПа, возникающее в локальных местах по внутренней кромке отверстия; минимальное — 15,2 МПа. Эпюра нормальных напряжений по контактной поверхности на стеклопластиковом листе приведена на рис. 3.

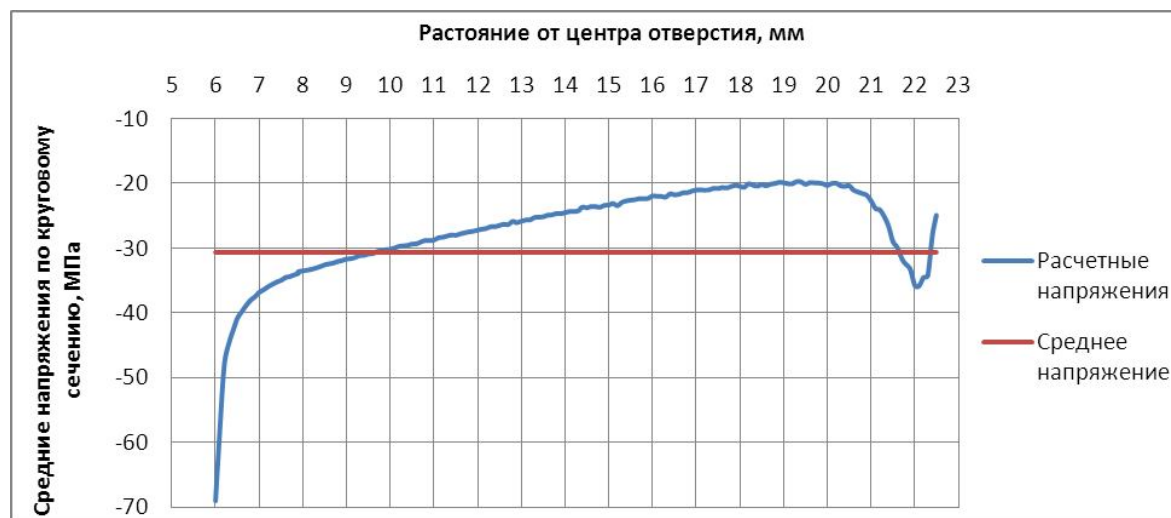


Рис. 3. График распределения нормальных напряжений по контактной поверхности на стеклопластиковом листе

Из графика на рис. 3 видно, что напряжения по контактной поверхности на стеклопластиковом листе не имеют положительных значений, т.е. по всей плоскости контакта шайбы и листа передается сжимающее давление. Однако в краевых зонах контакта возникают большие сжимающие напряжения, превышающие расчетное сопротивление материала сжатию. Данные напряжения характерны для контактных задач, так как именно в краевых зонах происходит резкое изменение параметров соединения (край отверстия, край шайбы), что и приводит к резкому изменению напряжений. Ограничение краевых напряжений расчетным сопротивлением материала было бы не совсем верным, так как в конечно-элементных моделях передача напряжений (деформаций) осуществляется дискретно, поэтому получаемые результаты имеют погрешности, и, как следствие, в отдельных точках (узлах сетки) возникают большие перенапряжения. Для более точной оценки при анализе контактных напряжений следует использовать интегральный анализ по интересующей нас области. Смысл данного анализа заключается в следующем. Для оценки величины перенапряжения отдельных участков вычисляется соотношение объема всей эпюры контактных напряжений и объема эпюры, ограниченной расчетным сопротивлением материала. Данное соотношение не должно превышать коэффициент надежности по материалу, т.е. отношения нормативного сопротивления материала к расчетному. При достижении на отдельных участках предельных напряжений по контактной поверхности происходит перераспределение напряжений. За счет этого расчетная эпюра напряжений выравни-

вается и стремится к среднему значению по контактной поверхности. Данный подход может применяться только в том случае, когда среднее напряжение по контактной поверхности не превышает расчетного сопротивления. Таким образом, допускается перераспределение напряжений по контактной поверхности за счет перехода отдельных зон в пластическое состояние. При этом по всей зоне контакта должны действовать сжимающие напряжения, т.е. не должно возникать зон отлипания. Ввиду ограниченного количества данных о свойствах стеклопластика и характере его работы под длительной статической нагрузкой, сделанные предположения требуют обязательной экспериментальной проверки.

Примером, иллюстрирующим предлагаемую методику расчета давлений от шайб, может послужить используемый в проектировании расчет растянутого стеклопластикового элемента, имеющего концентраторы напряжений. Стандарт организации [3] допускает осреднение нормальных напряжений по сечению при расчете на прочность растягиваемых стеклопластиковых элементов с ослаблениями, расставленными в соответствии с рекомендациями [3, п. 4.9.12]. Для стеклопластикового элемента марки СППС-240 с размерами 650×150×10 мм и ослаблениями в виде сквозных отверстий диаметром 12 мм, расположенных на расстоянии 50 мм друг от друга, среднее растягивающее напряжение по ослабленному сечению составляет 98,8 МПа при воздействии растягивающей продольной силы в 124,4 кН. С целью анализа краевых напряжений в зоне ослаблений было выполнено уточняющее решение данной задачи с использованием метода конечных элементов. Расчетная схема элемента в программном комплексе SolidWorks приведена на рис. 4.

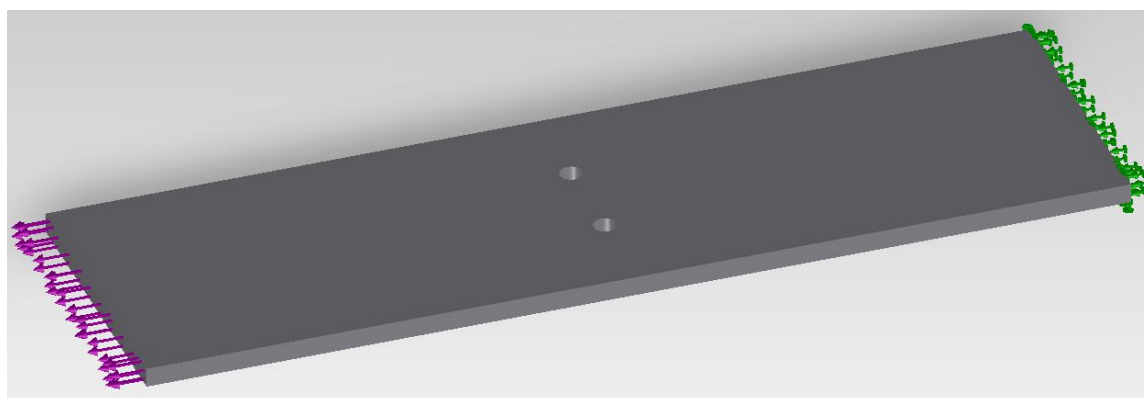


Рис. 4. Расчетная схема элемента в программе *SolidWorks*

Среднее напряжение в расчетном сечении 101,8 МПа при расчетном сопротивлении 98,8 МПа. При этом близ отверстий возникают максимальные напряжения около 255 МПа, а минимальные напряжения по краям элемента около 81 МПа. Отношение объема всей эпюры к объему эпюры, не превышающей расчетного сопротивления, составляет 1,98, что превышает коэффициент надежности материала при растяжении вдоль волокон армирования, равный 1,86. Детальная эпюра нормальных напряжений в расчетном сечении приведена на рис. 5.

Исходя из результатов выполненного расчета, можно сделать вывод, что при расчете соединения осреднение напряжений по контактной поверхности в первом приближении возможно при отношении объема всей эпюры контактных напряжений к объему эпюры, лежащей ниже уровня расчетного сопротивления материала, не превышающего коэффициента надежности материала при сжатии поперек армирующих волокон.



Рис. 5. Эпюра нормальных напряжений в расчетном сечении

По результатам выполненных расчетов соединений с учетом выдвинутых гипотез было установлено, что шайба стандартной формы при внутреннем диаметре 12 мм, внешнем диаметре 45 мм и толщине 5,5 мм имеет соотношение объемов эпюр 1,5, при коэффициенте надежности по материалу при сжатии поперек волокон 2,1. График распределения нормальных напряжений по контактной поверхности приведен на рис. 6.



Рис. 6. График распределения нормальных напряжений по контактной поверхности на стеклопластиковом листе при толщине шайбы 5,5 мм

Расчеты соединений показали, что при стандартной форме шайб в зонах ослаблений стеклопластиковых элементов возникают максимальные напряжения как в продольном направлении (от действия продольной силы в элементе), так и в поперечном направлении (от натяжения высокопрочных болтов). Поэтому в настоящее время

ведется поиск конструктивных решений соединительных элементов для уменьшения сжимающих напряжений по краям отверстий от воздействия высокопрочных болтов.

Выполненные работы показали, что применение высокопрочных болтов в конструкциях из ПКМ вполне возможно и целесообразно, так как несущая способность соединений на высокопрочных болтах выше, чем на обычных и не зависит от направления действия силы. В ходе работ была подобрана необходимая толщина шайбы стандартной формы, а также выявлены некоторые недостатки таких шайб и намечены пути их устранения.

Приведенные в данной работе результаты и высказанные гипотезы планируется проверить экспериментально при проведении испытаний соединений стеклопластиковых элементов на обычных и высокопрочных болтах.

Библиографический список

1. Воробей В.В., Сироткин О.С. Соединения конструкций из композиционных материалов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985.
2. Keller T. Overview of Fibre-Reinforced Polymers in Bridge Construction / Structural Engineering International. 2002. № 2. P. 66–70.
3. СТО 39790001.03–2007. Пешеходные мосты и путепроводы. Конструкции дорожно-строительные из композитных материалов. Технические требования, методы испытаний и контроля.

B.V. Pyrinov, A.N. Yashnov, A.N. Ivanov. Development of Constructive Decisions for Construction Units Made of Polymeric Composite Materials.

In the article the reasonability of high-strength bolts use in construction joints made of polymeric composite materials is approved by the comparison of construction units on usual and high-strength bolts. A hypothesis puts forward the analysis of contact stresses from tension of a high-strength bolt between a metal washer and a fiberglass element. Calculation of one-bolt construction unit with the purpose of washers shape and thickness determination for high-strength bolts M10 are given.

Key words: *construction units, high-strength bolts, washers, fiberglass, contact stresses.*