

Оценка влияния свойств композитных материалов на параметры болтовых соединений деталей

Т. М. Кокина, Л. Н. Шафигуллин

В работе разработаны методы расчета податливости деталей в местах соединений болтами с учетом свойств изотропных композитных материалов, из которых они изготовлены. Авторами приведены обоснования расчета податливостей соединяемых деталей. Применены случаи многоосного и одноосного напряженных состояний для различных композитных материалов. Выработаны методы по расчету коэффициента внешней нагрузки в зависимости от свойств материалов. На основании этих методов даны рекомендации о подборе размеров и формы проектируемых соединений деталей из композитных материалов.

Ключевые слова: коэффициент внешней нагрузки, прочность крепления деталей из наноматериалов, стеклопластик, углепластик, физико-механические свойства эластомеров, податливость детали из композитного материала, расчет винтового соединения.

Введение

Авторы многих статей придерживаются мнения о нестабильности свойств композиционных материалов, связанных с технологией изготовления деталей и сложных конструкций. Так, Ю. В. Скворцов связывает опыт создания конструкций из полимерных композиционных материалов с нестабильностью исходных компонентов этих материалов [1]. Из его работы очевидно то, что проблема прочности соединений является одной из основных при использовании полимерных композиционных материалов в сложных составных конструкциях. Он считает, что перспективными являются клеевые и клеємеханические соединения, которые более соответствуют строению и структуре композита. Ю. В. Скворцов придерживается мнения о создании высокопрочных механических соединений композитных деталей путем использования игольчатых соединений, содержащих большое количество металлических крепёжных элементов малого диаметра. При этом увеличение площади среза и смятия таких конструкций позволяет получать соединения, прочность которых составляет 80–90 % прочности материала [1].

Однако хотя прочность крепления деталей из композиционных материалов зависит от смятия поверхности контакта, но выполнение большого количества отверстий для крепления вызывает ослабления прочности стыка деталей в месте контакта при переменных нагрузках из-за наличия концентраторов напряжений. Более того, материал, обтекая поверхность болта, создает условия для деформации детали. Сложность сборки-разборки таких соединений также очевидна.

Р. А. Андриевский [2] представил анализ структуры материалов и их свойств в зависимости от упрочняющих элементов, придающих материалу дополнительные прочностные свойства при сохранении пластичности. Автор указывает на сложность технологических методов, исключающих некоторые дефекты наноматериалов, и приводит новейшие данные об исследованиях сверхпрочности с сохранением пластичности нанокompозитов.

Ф. Хуссейн и Х. Лафди [3] рассмотрели методы упрочнения графитовых наноматериалов с применением нанотрубок и графитовых включений. Эти исследования говорят о возможности получения наноматериалов различного качества, в том числе и высокопрочных полимерных наноматериалов, позволяющих применять их в различных конструкциях и деталях.

Ю. А. Остяков [4] рассмотрел различные физико-механические свойства стеклопластиков и других композитных материалов и указал детали, изготовленные из этих материалов, что позволяет говорить о связи механических свойств композитных и традиционных металлических материалов в некоторых областях при нагружении конструкции.

Кокина Тамара Михайловна, доцент, к.т.н.
Шафигуллин Ленар Нургалеевич, доцент, к.т.н.
Набережночелнинский институт, филиал Казанского (Приволжского) федерального университета.
Татарстан, 423822, г. Набережные Челны, пр. Мира, 13 а.
E-mail: dtp777@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30 мая 2018 г.

© Кокина Т. М., Шафигуллин Л. Н., 2018

В. А. Зорин, А. И. Швейв и др. [5, 6] приводят способы применения композитных материалов в автомобильной отрасли, причем в условиях вибраций и колебаний.

Существующие методики расчета на прочность конструкционных композитных материалов имеют в своей основе методики расчета на прочность традиционных металлов. Однако имеют место разногласия, связанные с особенностями восприятия нагрузок полимерными материалами и металлами. Об этом говорят Л. Б. Потапова и В. П. Ярцев в работе [7]. Трехосное пластическое деформирование стеклопластиков, например, указывает на иную степень восприятия ими нагрузок в соединениях.

Таким образом, стройного изложения методов расчета болтов на основании свойств материалов стыков деталей из композиционных материалов при их креплении с помощью разъемных болтовых соединений, а также изложения методов расчета болтов этих соединений при действии внешних нагрузок в литературе не найдено. Видимо, это связано с разбросом параметров материалов, определяющих свойства соединений деталей из композитных материалов.

Целью настоящей работы является обоснование выбора методов расчета коэффициента внешней нагрузки деталей из материалов, имеющих изотропные свойства. Это позволяет авторам разработать рекомендации по созданию оптимальных узлов крепления сложных разборных конструкций из композитных материалов.

Постановка работы

Поставив задачей определение расчетных напряжений болтов (винтов) крепления деталей из композитных материалов, имеющих полимерную и кристаллическую структуру, возможно применение понятия об одноосном и многоосном нагружении полимерных материалов [7, 8]. При этом в случае затяжки винтов разрушение материала возможно от напряжений, возникающих при одноосном нагружении материала. При приложении нагрузки к детали из композитного материала силами отрыва имеет место разгрузка присоединяемой детали, и в таком случае описание процесса деформирования материала не следует считать одноосным. Однако замена сложного напряженного состояния на эквивалентное одноосное в расчетах при сравнении последнего с предельными напряжениями разрушения с учетом запаса прочности конструкции, позволяет ввести некоторые допущения.

При составлении девиатора образца при затяжке винтов учитывается, что деформация полимерной матрицы имеет неоднородную структуру

$$[\varepsilon] = [\Phi] [\sigma], \tag{1}$$

где $[\Phi]$ – матрица податливости материала, вид которой может быть определен на основании того, что основным видом разрушения полимерных материалов является срез в слоях композита, но не разрыв волокон [1]. Тогда закон Гука для изотропных материалов в матричной записи определяется формулой (1). При этом для упругого изотропного тела главные оси напряжённого состояния всегда совпадают с главными осями деформированного состояния.

$$[\Phi] = 1/E \begin{pmatrix} 1 & -\mu & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 1 & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & -\mu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{pmatrix}. \tag{2}$$

Здесь μ – коэффициент поперечной деформации, E – модуль Юнга.

Ю. В. Скворцов [1] утверждает, проводя необходимые доказательства с упрощениями для моделей, отражающих изотропные свойства материала, что прочность композита при растяжении поперёк волокон может быть значительно меньше, чем прочность долевой матрицы. Эти выводы можно использовать для расчета податливости композитного материала при проектировании соединений композитных деталей, работающих в условиях статической прочности. Выводы автора однозначно говорят о том, что прочность при разрушении полимерного композиционного материала может быть определена лишь экспериментальным путем. Однако использование диаграмм «растяжения–сжатия» композитного материала на основании моделей, описанных в работе [7], позволяет производить расчеты на прочность болтов (винтов) крепления для деталей, работающих в области упругих и пластических деформаций композитных материалов, имеющих стекловолоконистую полимерную структуру или структуру наноматериалов. Всё это позволяет разработать рекомендации по дальнейшему использованию практических результатов.

Расчеты

При расчетах мест креплений деталей необходимо определение коэффициентов податливости материалов λ_1 и λ_2 с целью получения величины коэффициента внешней нагрузки, приходящейся на болт и зависящего от свойств материалов [9]:

$$\chi = \lambda_2 / \lambda_2 + \lambda_1. \tag{3}$$

Для нагрузок, вызывающих деформацию деталей с учетом и упругих и неупругих свойств материалов, необходимо расчет податливостей производить с учетом свойств полимеров, имеющих изотропные свойства по формуле (1). Для раскрытия уравнения (1) выбирается система начальных координат отсчета, в которой деформации будут совпадающими с направлениями напряженного состояния материала. Если предполагать, что в общем случае разрушение материала будет происходить от среза слоев композитного материала, то матрица деформации совпадет с деформацией сдвига волокон и будет преобразована к модулю сдвига:

$$G = 2(1 + \mu) / E \quad (4)$$

в направлении разрушения материала. Такие рассуждения, выдвинутые в работе [1], справедливы при многостороннем приложении нагрузки, т. е. при переменных нагрузках материалов или для случаев нагружения полимерного материала под напряжением.

При рассмотрении картины нагружения болтовых (винтовых) соединений характерно однонаправленное действие нагрузки лишь от сжатия силой затяжки, что является обоснованием для предположения одноосного нагружения сжатия материала, а значит и применения формулы при раскрытии матрицы $[\Phi]$ и уравнения (1):

$$\varepsilon' = -\mu\sigma / E. \quad (5)$$

При этом расчет податливости детали из полимера следует производить по формуле:

$$\lambda = \mu l / AE. \quad (6)$$

Реальные условия работы узлов с разборными винтовыми креплениями, как правило, имеют нагрузки, которые отрывают одну деталь от другой после приложения силы затяжки к соединению, а зачастую и в условиях вибраций и колебаний. В первом случае соединение имеет предварительное сжатие, а затем разгрузку, что не позволяет говорить об условиях одноосного нагружения, т. е. формула (5) не работает. То же может относиться к условиям работы соединения при вибрации и колебаниях соединения. В этом случае, учитывая, что реальные напряжения растяжения не будут разрушающими, выражение (1) преобразуется к виду:

$$[\varepsilon] = [\Phi] [\tau]. \quad (7)$$

Тогда податливость детали определится выражением:

$$\lambda = 2(1 + \mu) l / EA. \quad (8)$$

Формула (6) приведена из условия приведения системы к замене сложного напряженного состояния на эквивалентное одноосное для расчетов прочности соединения с некоторыми допущениями. Она может быть применима для случаев расчета композитных полимерных стеклопластиков, имеющих высокую податливость.

При использовании приведенных методов проектирования болтовых соединений и в инженерных расчетах немаловажное значение имеет выбор коэффициента поперечной деформации μ . Так, в работе [10] авторы определяют его величину (для случаев предварительного нагружения от действия предварительного натяга) в пределах до $\mu = 0,5$. В работе [7] их значения в зависимости от свойств традиционных металлических материалов находятся в пределах $\mu = 0,21$ до $\mu = 0,4$. Последняя цифра относится к полимерам.

При расчете коэффициента внешней нагрузки χ с учетом податливости детали, рассчитанной по формуле (8), получаем диаграмму его изменения, представленную на рис. 1.

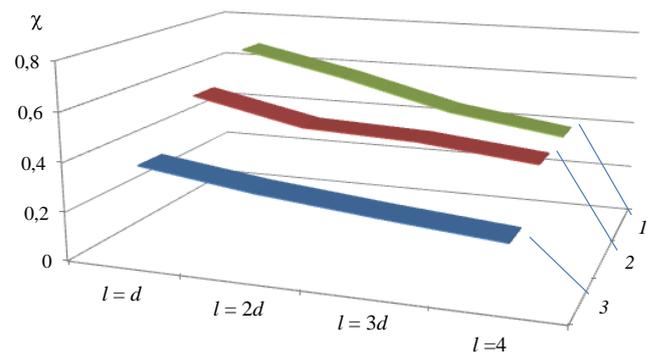


Рис. 1. Диаграмма изменения коэффициента внешней нагрузки χ для образцов из композитных материалов с различными размерами шайбы 1, 2, 3 и длинами болтов l .

На этой диаграмме показаны модели соединений, выполненные из стеклопластика с модулем упругости $E = 0,5 \times 10^5$ МПа при различных толщинах деталей и различных размерах установочных шайб. Образец № 1 имел конструкцию с малой площадью прилегания, № 2 – стандартной, а № 3 – с повышенной площадью прилегания шайбы.

Для стандартной шайбы № 2 и шайбы № 1 с малой площадью прилегания значение коэффициента χ повышено. При применении специальных шайб № 3 для толщин соединяемых деталей от $2d_{\text{болта}}$ до $4d_{\text{болта}}$ имеет место незначительное снижение коэффициента внешней нагрузки (а вместе с ним и доли внешней нагрузки на болт). При этом стабилизируется работа всего узла. Другими словами, шайбы с повышенной поверхностью контакта позволяют устойчиво работать при различных условиях со сниженной долей внешней нагрузки

на болт при различных толщинах соединяемых деталей.

При разработке моделей крепежного узла также были взяты образцы деталей с различными размерами, податливости которых рассчитывались по формуле (5). Изменение коэффициента внешней нагрузки χ , вычисленного по этой формуле в зависимости от толщины соединяемой детали, представлено на диаграмме рис. 2.

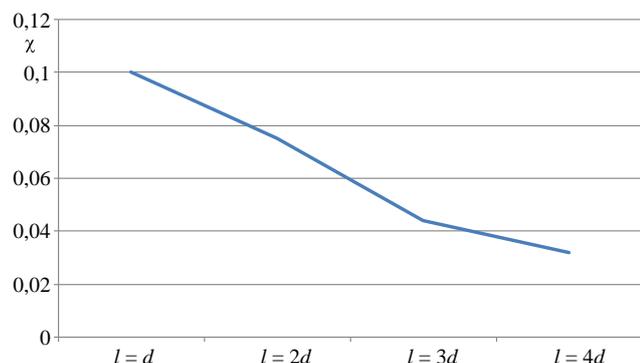


Рис. 2. Диаграмма коэффициента внешней нагрузки χ в зависимости от размеров соединяемых деталей, выполненных из стеклопластиков с повышенной жесткостью при $E = 1,2 \times 10^5$ МПа.

Анализ данных моделей показывает, что для материалов с изотропными свойствами коэффициент внешней нагрузки уменьшается с ростом толщины соединяемых деталей и имеет незначительную величину. Такие условия возможны для материалов с повышенной жесткостью, работающих на сжатие. В соединениях с материалами с подобными свойствами доля внешней нагрузки, приходящейся на болт, незначительна. Болты таких конструкций имеют лучшие условия работы при вибрациях и колебаниях из-за малой доли внешней нагрузки, т. е. малого значения χ [9].

Заключение

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом.

1. Выявлены способы учета свойств композитных материалов на параметры проектируемого

изделия путем теоретического использования закона Гука для различных областей деформации болта и деталей. Отмечена целесообразность применения областей деформаций с учетом изотропных свойств композитных материалов при однонаправленном действии нагрузки путем раскрытия матрицы деформаций материала.

2. Выявлены параметры и условия проектирования крепежных узлов из композитных материалов в зависимости от физико-механических свойств материалов путем введение методов инженерного расчета.

3. Рекомендуется применение в болтовом соединении шайб с повышенной поверхностью прилегания для стекло- и углепластиков, а также наноматериалов, имеющих модули упругости в пределах от $E = 0,5 \times 10^5$ МПа до $E = 0,8 \times 10^5$ МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скворцов Ю. В. Механика композиционных материалов. – Самара: Изд-во Самарского аэрокосмического государственного университета, 2013.
2. Андриевский Р. А. Основы наноструктурного материаловедения. Возможности и проблемы [Электронный ресурс]. – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – <https://e.lanbook.com/reader/book/66209>
3. Нано- и биокompозиты. [Электронный ресурс]. Под ред. Лау А.К.-Т., Хуссейн Ф., Лафди Х.; Пер. с англ. – Электрон. дан. – М.: Издательство "Лаборатория знаний", 2015. <https://e.lanbook.com/reader/book/66206/#96>
4. Остяков Ю. А., Шевченко И. В. Проектирование деталей и узлов конкурентоспособных машин. [Электронный ресурс]. – СПб.: Лань, 2013. <http://e.lanbook.com/book/30428>
5. Зорин В. А. Надежность механических систем: учебник. – М.: ИНФРА-М., 2015.
6. Швейв А. И., Гумеров М. И., Гумеров А. Ф., Файзуллина Р. Ф., Шафигуллин Л. Н. // Автомобильная промышленность. 2015. № 4. С. 33.
7. Потапова Л. Б., Ярцев В. П. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. – М.: Машиностроение-1, 2005.
8. Ильюшин А. А. // Прикладная математика и механика. 1945. Т. 9. № 3. С. 207.
9. Решетов Д. Н. Детали машин: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1989.
10. Башкарев А. Я., Куценко А. В. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2015. № 2. С. 151.

Evaluation of the influence of the properties of composite materials on the parameters of bolted connections of parts

T. M. Kokina and L. N. Shafigullin

Kazan Federal University – Naberezhnye Chelny Institute
13A Mira av., Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan, 423822, Russia
E-mail: dtp777@mail.ru

Received May 30, 2018

Consideration is given to the calculating methods of the parts ductility at the bolting spots subject to properties of the isotropic composites of which the parts are made. The authors describe the justification of the calculation of the compliances of the parts. Applied cases of uniaxial and multiaxial stress states were obtained for different composite materials. The methods for calculation of external loads depending on the properties of materials are developed. The recommendations about the selecting of the sizes and shapes of the designed junctions of the composite parts were given.

Keywords: external load factor, fastening strength of the parts mad of nanomaterials, fibreglass, carbon fiber composite, physical properties of the elastomers, give details of composite material, the calculation of screw connections.

REFERENCES

1. J. V. Skvortsov, *The mechanics of the composite materials*. (Samara, Publishing house of the Samar Aerospace State University, 2013) [in Russian].
2. R. A. Andrievskiy, *The basis of the nanostructural materials science. Opportunities and problems*. [E-resource], <https://e.lanbook.com/reader/book/66209> [in Russian].
3. *Nano- and bio- composite materials*. [E-resource]. By the edition of Lau A.K.-T., Hussein F., Lafdi H.; Translated from English. Moscow. The publishing house “The laboratory of knowledge”, 2015; Alan Kin-tak Lau. Publisher: Taylor & Francis, Inc. Year: August 2009. ... Nano- and Biocomposites <http://www.toyota-ti.ac.jp/Lab/Zairyu/5z50/publications/09B1.pdf>
4. J. A. Ostyakov and I.V. Shevchenko, *Designing of the parts and units for the competitive machines*. [E-resource] (St.-Petersburg: Lany, 201) <http://e.lanbook.com/book/30428> [in Russian].
5. V. A. Zorin, *The reliability of the mechanical systems* (Moscow, INFRA, 2015) [in Russian].
6. A. I. Shveyov, M. I. Gumerov, A. F. Gumerov, R. F. Faizullina, and L. N. Shafigullin, *Avtomobil. Promyshlennost*, No. 4, 33 (2015).
7. L. B. Potapova and V. P. Yartsev, *The mechanics of the materials in the complex state of tension*. (Moscow, Machine Building-1, 2005) [in Russian].
8. A. A. Ilyushin, *Prikl. Matemftika i Mekhanika* **9** (3), 207 (1945).
9. D. N. Reshetov, *The machine components*. (Moscow, Mashinostr., 1989), [in Russian].
10. A. Y. Bashkarev and A. V. Kushenko, *Scientific-technical Bulletin of Saint-Petersburg State Polytechnical University*, No. 2, 151 (2015).