

DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-1-32-36

*Леонтьев В.В. *, кандидат технических наук, доцент,
Севастопольский государственный университет, Россия,
Политехнический институт,
Кондратова Е.В., доцент,
Коломийченко В.П., преподаватель,
Черноморское высшее военно-морское училище им. П.С. Нахимова, Россия*
*Ответственный автор E-mail: leonardo1967@yandex.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАКЛЕПОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация: традиционные методы расчета заклепочных соединений базируются на весьма приближенных способах определения сил, возникающих в соединении. Это ведет к серьезным неточностям в определении напряжений. Кроме того, при таком подходе отсутствует возможность вычисления эквивалентных напряжений и получения полной картины напряженно-деформированного состояния соединения. Все это приводит к необходимости повышения коэффициента запаса прочности и, как следствие, увеличению количества или диаметра заклепок, что ведет к увеличению веса конструкции и ее удорожанию. Предложенный способ расчета соединения методом конечных элементов позволяет весьма точно определить напряжения во всех элементах соединения. Это дает возможность получить достоверную картину напряженно-деформированного состояния всех элементов соединения. Как следствие, возможно снижение трудоемкости создания соединения и его массы за счет уменьшения числа заклепок. Метод конечных элементов следует применять для расчета ответственных соединений со сложными условиями работы. Рассмотрен пример расчета такого соединения.

Ключевые слова: заклепочное соединение, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, эквивалентные напряжения, контактные напряжения

Введение

В настоящее время заклепочные соединения достаточно широко применяются для соединения частей различного рода металлических конструкций: стропил, ферм мостов [1], кранов, для соединения листов в котлах, судах, резервуарах и т. п. [2, 3].

При выполнении прочностного расчета соединения традиционно рассчитываются заклепочные стержни на срез и смятие и соединяемые листы на разрыв [4, 5, 6-9]. Таким образом получают значения касательных напряжений в горизонтальном сечении заклепки при срезе, нормальных напряжений в ее вертикальном сечении при смятии и нормальных напряжений в ослабленном сечении листа при растяжении. При этом не учитывается, что касательные напряжения по сечениям, по которым происходит сдвиг, распределяются неравномерно. Неравномерно также распределяются и напряжения смятия. Расчетные напряжения при этом отличаются от действительных напряжений, действующих в конструкциях, а поэтому их следует считать условными [10]. Кроме того, не учитываются контактные напряжения в районах передачи усилия от листа к стержню заклепки. Эти напряжения могут достигать значительных величин. Особую опасность они представляют для соединений, подверженных переменным нагрузкам, так как могут привести к возникновению усталостных трещин. Поэтому для точного расчета ответственных соединений необходимо использовать численные методы, в частности, метод конечных элементов [11-13].

Цель исследования – определить эквивалентные напряжения по энергетической теории прочности в заклепочном соединении методом конечных элементов и дать рекомендации по подходу к расчету таких соединений.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования было выбрано заклепочное соединение листов, нагруженных только продольной растягивающей силой. Схема соединения показана на рис. 1.

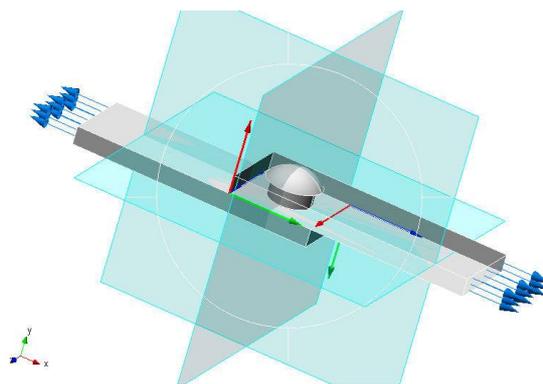


Рис. 1. Схема заклепочного соединения
Fig. 1. Scheme of rivet connection

Размеры деталей: толщина листов 6 мм, ширина листов 28 мм, диаметр заклепки 14 мм, материал листов и заклепки – сталь 3. К листам приложена продольная растягивающая сила 10 кН, равномерно распределенная по сечению. Требуется определить эквивалентные напряжения в листе и в заклепке.

При решении задачи приняты следующие **основные допущения**:

- 1) трение между соединяемыми листами отсутствует;
- 2) материал листов и заклепки работает в пределах упругости.

Результаты и обсуждения

Расчет эквивалентных напряжений в стенках бака выполнен методом конечных элементов с помощью программы COMSOL MULTIPHYSICS. Для ускорения расчета рассмотрена только половина заклепки; влияние отброшенной части заменено граничными условиями, выражающими равенство нулю линейных перемещений среднего поперечного сечения заклепочного стержня по всем направлениям (заделка по симметрии). Использована сетка из 12838 тетраэдральных конечных элементов. Конечноэлементная сетка показана на рис. 2.

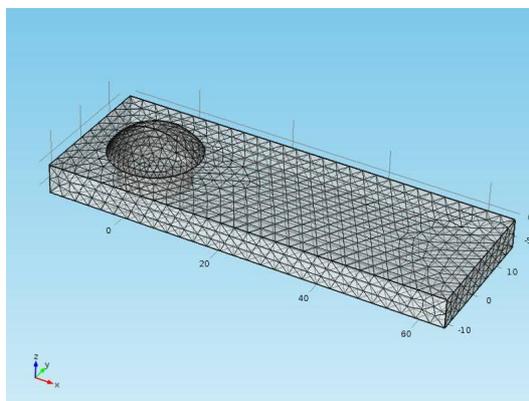


Рис. 2. Сетка конечных элементов для расчета заклепочного соединения
Fig. 2. Finite element grid for riveting calculation

Результаты расчета показаны на рис. 3.

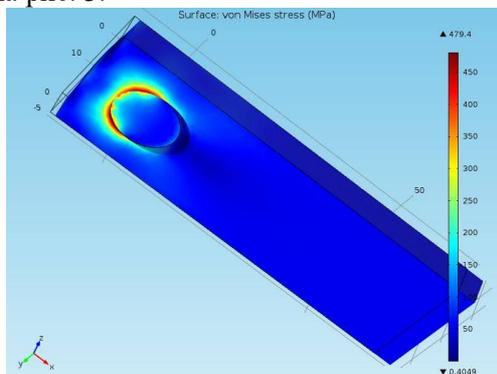


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние соединения
Fig. 3. The intense deformed condition of connection

Анализ *деформированного* состояния заклепочного соединения позволяет сделать вывод об адекватности модели реальной конструкции. Как видно из рис. 3, отверстие в листе приобретает эллиптическую форму, вытягиваясь в направлении нагрузки; поперечное сечение листа, ближе к заклепке, выпячивается в сторону, противоположную направлению нагрузки. Такое поведение соединения вполне соответствует физическому смыслу задачи.

Был выполнен расчет заклепочного соединения по традиционной схеме. Согласно ему, напряжения смятия в заклепке $\sigma_{см}$ при указанных выше размерах соединения и приложенной нагрузке составили 119 МПа, напряжения сдвига $\tau_{ср}$ в заклепке 65 МПа и напряжения растяжения в ослабленном сечении листа σ_p 131,6 МПа. Численное же моделирование (рис. 3) показывает, что напряжения, близкие к полученным традиционным методом, возникают лишь в зонах листа и заклепки, достаточно удаленных от отверстия. Вблизи же отверстия напряжения в листе достигают 450 МПа. В заклепке значительная часть области, прилегающей к отверстию, охвачена напряжениями до 230 МПа. Полученные значения *существенно* превышают найденные методами сопротивления материалов. Это, очевидно, связано с не учитываемыми при традиционном подходе контактными напряжениями и допущением о равномерности распределения напряжений при сдвиге и смятии. Следует отметить, что схожие результаты получены в работе [14].

Выводы

Численное моделирование заклепочного соединения показывает, что в нем возникают значительные контактные напряжения, не учитываемые при традиционном подходе к расчету. Анализ эквивалентных напряжений показывает, что они распределяются существенно неравномерно, что не отражается расчетом методами сопротивления материалов.

Основные рекомендации по проектированию сводятся к необходимости выполнять расчет прочности ответственных заклепочных соединений методом конечных элементов. При этом в качестве расчетных следует принимать эквивалентные напряжения.

Литература

1. Казакова Е.В., Юрченко В.В. Анализ соединения узлов сквозных ферм для металлических железнодорожных мостов // В сборнике: Транспорт: наука, образование, производство: Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. 2017. 9 (55). С. 259 – 263.
2. Мусаелян Г.В. Исследование процесса деформирования узла рамы методом конечных элементов // Вестник Национального политехнического университета Армении. Механика, машиноведение, машиностроение. 2015. №1. С. 98 – 107.
3. Абросимов Ю.А., Бережной Д.В., Еранов А.П., Сибгатуллин Р.Г. Расчет заклепочных соединений на рабочих колесах центробежных машин // В сборнике: Материалы XIX международного симпозиума "Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред" имени А.Г. Горшкова / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2013. С. 4 – 5.
4. Валишвили Н.В., Гаврюшин С.С. Сопротивление материалов и конструкций: учебник для академического бакалавриата. Москва: Издательство Юрайт, 2019. 429 с. (Серия: Бакалавр. Академический курс). ISBN 978-5-9916-8247-3. Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. URL: <https://biblio-online.ru/bcode/433489>
5. Астанин В.В. Техническая механика: в четырех книгах. Книга вторая. Сопротивление материалов [Электронный ресурс]: учебное пособие. Электрон. дан. Москва: Машиностроение, 2012. 160 с.
6. Гузенков П.Г. Детали машин: учеб. для студ. высш. техн. учеб. заведений. 5-е изд., перераб. М.: Высш. шк., 1991. 383 с.
7. Гулиа Н.В., Клоков В.Г., Юрков С.А. Детали машин [Электронный ресурс]: учебник. Электрон. дан. Санкт-Петербург: Лань, 2013. 416 с
8. Рукодельцев А.С., Никитаев И.В., Сидорова О.В. Детали машин [Электронный ресурс]: учебное пособие. Электрон. дан. Нижний Новгород: ВГУВТ, 2012. 204 с.
9. Хруничева Т.В. Детали машин: типовые расчеты на прочность: учебное пособие. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2007. 224 с.
10. Писаренко Г.С. и др. Сопротивление материалов. Киев: Техніка, 1967. 792 с.
11. Валишвили Н.В., Гаврюшин С.С. Сопротивление материалов и конструкций: учебник для академического бакалавриата. Москва: Издательство Юрайт, 2019. 429 с. (Серия: Бакалавр. Академический курс). ISBN 978-5-9916-8247-3. Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. URL: <https://biblio-online.ru/bcode/433489>

12. Мищенко Г.В., Самогин Ю.Н., Чирков В.П. Метод конечных элементов в курсе сопротивления материалов [Электронный ресурс]: учебное пособие / под ред. В.П. Чиркова. Электрон. дан. Москва: Физматлит, 2015. 472 с.
13. Макаров Е.Г. Сопротивление материалов с использованием вычислительных комплексов: учеб. пособие для академического бакалавриата. 2-е изд., испр. и доп. Москва: Издательство Юрайт, 2019. 413 с. (Серия: Бакалавр. Академический курс). ISBN 978-5-534-01761-8. Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. URL: <https://biblio-online.ru/bcode/438313>
14. Чемезов Д.А., Баякина А.В. Состояние нагруженных деталей заклепочного соединения // Theoretical & Applied Science. 2015. №9 (29). С. 17 – 20.

References

1. Kazakova E.V., Yurchenko V.V. Analiz soedineniya uzlov skvozhnyh ferm dlya metallicheskih zhelezodorozhnyh mostov. V sbornike: Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: Sbornik nauchnyh trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2017. 9 (55). P. 259 – 263. (rus.)
2. Musaelyan G.V. Issledovanie processa deformirovaniya uzla ramy metodom konechnykh ehlementov. Vestnik Nacional'nogo politekhnicheskogo universiteta Armenii. Mekhanika, mashinovedenie, mashinostroenie. 2015. 1. P. 98 – 107. (rus.)
3. Abrosimov YU.A., Berezhnoj D.V., Eranov A.P., Sibgatullin R.G. Raschet zaklepochnykh soedinenij na rabochih kolesah centrobezhnykh mashin. V sbornike: Materialy XIX mezhdunarodnogo simpoziuma "Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstrukcij i sploshnykh sred" imeni A.G. Gorshkova. Moskovskij aviacionnyj institut (nacional'nyj issledovatel'skij universitet). 2013. P. 4 – 5. (rus.)
4. Valishvili N.V., Gavryushin S.S. Soprotivlenie materialov i konstrukcij: uchebnik dlya akademicheskogo bakalavriata. Moskva: Izdatel'stvo YUrajt, 2019. 429 s. (Seriya: Bakalavr. Akademicheskij kurs). ISBN 978-5-9916-8247-3. Текст: ehlektronnyj. EHBS YUrajt [sajt]. URL: <https://biblio-online.ru/bcode/433489> (rus.)
5. Astanin V.V. Tekhnicheskaya mekhanika: v chetyrekh knigah. Kniga vtoraya. Soprotivlenie materialov [EHlektronnyj resurs]: uchebnoe posobie. EHlektron. dan. Moskva: Mashinostroenie, 2012. 160 p. (rus.)
6. Guzenkov P.G. Detali mashin: ucheb. dlya stud. vyssh. tekhn. ucheb. zavedenij. 5-e izd., pererab. M.: Vyssh. shk., 1991. 383 p. (rus.)
7. Gulia N.V., Klokov V.G., Yurkov S.A. Detali mashin [EHlektronnyj resurs]: uchebnik. EHlektron. dan. Sankt-Peterburg: Lan', 2013. 416 p. (rus.)
8. Rukodel'cev A.S., Nikitaev I.V., Sidorova O.V. Detali mashin [EHlektronnyj resurs]: uchebnoe posobie. EHlektron. dan. Nizhnij Novgorod: VGUVT, 2012. 204 p. (rus.)
9. Hrunicheva T.V. Detali mashin: tipovye raschety na prochnost': uchebnoe posobie. M.: FORUM: INFRA-M, 2007. 224 p. (rus.)
10. Pisarenko G.S. i dr. Soprotivlenie materialov. Kiev: Tekhnika, 1967. 792 p. (rus.)
11. Valishvili N.V., Gavryushin S.S. Soprotivlenie materialov i konstrukcij: uchebnik dlya akademicheskogo bakalavriata. Moskva: Izdatel'stvo YUrajt, 2019. 429 p. (Seriya: Bakalavr. Akademicheskij kurs). ISBN 978-5-9916-8247-3. Текст: ehlektronnyj. EHBS YUrajt [sajt]. URL: <https://biblio-online.ru/bcode/433489> (rus.)
12. Mishenkov G.V., Samogin YU.N., CHirkov V.P. Metod konechnykh ehlementov v kurse soprotivleniya materialov [EHlektronnyj resurs]: uchebnoe posobie. pod red. V.P. CHirkova. EHlektron. dan. Moskva: Fizmatlit, 2015. 472 p. (rus.)
13. Makarov E.G. Soprotivlenie materialov s ispol'zovaniem vychislitel'nykh kompleksov: ucheb. posobie dlya akademicheskogo bakalavriata. 2-e izd., ispr. i dop. Moskva: Izdatel'stvo YUrajt, 2019. 413 p. (Seriya: Bakalavr. Akademicheskij kurs). ISBN 978-5-534-01761-8. Текст: ehlektronnyj. EHBS YUrajt [sajt]. URL: <https://biblio-online.ru/bcode/438313> (rus.)
14. CHemezov D.A., Bayakina A.V. Sostoyanie nagruzhenykh detalej zaklepochnogo soedineniya. Theoretical & Applied Science. 2015. 9 (29). P. 17 – 20. (rus.)

*Leontyev V.V. *, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Sevastopol State University, Polytechnic Institute, Russia,
Kondratova E.V., Associate Professor,
Kolomiychenko V.P., Lecturer,
P.S. Nakhimov Higher Naval School, Russia*
*Corresponding author E-mail: leonardo1967@yandex.ua

INVESTIGATION OF THE STRESS CONDITION OF RIVETED JOINTS BY FINITE ELEMENT METHOD

Abstract: traditional methods of calculation of rivet joints are based on very approximate methods of determining the forces arising in the connection. This leads to serious inaccuracies in the determination of stresses. In addition, this approach makes it impossible to calculate equivalent stresses and obtain a complete picture of the stress-strain state of the joint. All this leads to the need to increase the factor of safety and, as a consequence, increase the number or diameter of rivets, which leads to an increase in the weight of the structure and its rise in price. The proposed method of calculating the connection by the finite element method allows to determine the stresses in all elements of the connection very accurately. This makes it possible to obtain a reliable picture of the stress-strain state of all elements of the compound. As a result, it is possible to reduce the complexity of the compound and its mass by reducing the number of rivets. The finite element method should be used to calculate critical compounds with complex operating conditions. The example of calculation of such connection is considered.

Keywords: rivet connection, finite element method, stress-strain state, equivalent stresses, contact stresses

Для цитирования: Леонтьев В.В., Кондратова Е.В., Коломийченко В.П. Исследование напряженного состояния заклепочного соединения методом конечных элементов // Строительные материалы и изделия. 2019. Том 2. №1. С. 32 – 36. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-1-32-36

For citation: Leontyev V.V., Kondratova E.V., Kolomiychenko V.P. Investigation of the stress condition of riveted joints by finite element method. Construction Materials and Products. 2019. 2 (1). P. 32 – 36. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-1-32-36

*Поступила в редакцию 7 ноября 2018 г.
Принята в доработанном виде 20 декабря 2018 г.
Одобрена для публикации 25 января 2019 г.*

*Received: November 7, 2018.
Revised: December 20, 2018.
Accepted: January 25, 2019.*