

УДК 62-112.83

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-8-11-18

# Моделирование напряженно-деформированного состояния болтовых соединений в среде ANSYS

С.И. Каратушин, Д.А. Храмова, П.Н. Бокучава

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 1-я Красноармейская ул., д. 1

## Simulation of the Stress-Strain State of Bolted Connections in ANSYS

S.I. Karatushin, D.A. Khramova, P.N. Bokuchava

Baltic State Technical University VOENMEKH named after D.F. Ustinov, 190005, Saint-Petersburg, Russian Federation, 1<sup>st</sup> Krasnoarmeyskaya St., Bldg. 1



e-mail: karatsi@bk.ru, khdoria@mail.ru, Bokuchava.PN@Astronomikon.ru



Рассмотрено моделирование напряженно-деформированного состояния болтовых соединений с использованием программного комплекса ANSYS Workbench. Для расчета выбрано болтовое соединение двух фланцев с прокладкой, нагруженных отрывающим усилием. Внешняя нагрузка к фланцам прикладывалась как к внешней, так и к внутренней поверхности. Компьютерная программа обеспечила возможность учесть влияние прокладки (с отличным от фланцев модулем упругости) на коэффициент внешней нагрузки и вычислить его. На примере расчета фундаментных болтов планетарных редукторов, нагруженных опрокидывающим моментом, исследовано их напряженно-деформированное состояние. Программа ANSYS позволила учесть все нагрузки на болты: отрывающее усилие и силу сдвига, обусловленную высотой расположения осей валов. В итоге получена полная картина напряженно-деформированного состояния каждого болта, включая концентраторы напряжений. Напряженное состояние болтов — неоднородное вследствие наличия изгибающих моментов. Компьютерное моделирование с заложенным в нем методом конечных элементов дает существенно больше информации о напряженно-деформированном состоянии болтовых соединений, нагруженных по различным схемам, без принятия каких-либо допущений.

**Ключевые слова:** болтовое соединение, ANSYS, коэффициент внешней нагрузки, напряженно-деформированное состояние



Modeling of the stress-strain state of bolted connections using the ANSYS Workbench software is considered in this article. A bolted connection of two flanges with a gasket loaded with a tear force is chosen for the calculation. The external load is applied both to the outer and inner surfaces of the flanges. The computer program made it possible to take into account the effect of the gasket (the elastic modulus of which is different from that of the flange) on the external load factor and calculate it. Using the foundation bolts of planetary reducers loaded with the tilting moment as an example, the stress-strain state was calculated. The ANSYS software allowed taking into account the true forces acting on the bolts: the tear force and shear due to the height of the shaft axes. As a result, a complete evaluation of the stress-strain state of each bolt was obtained, including the stress concentrators. The stress state of the bolts is not uniform due to the presence of bending moments. Computer simulation with embedded finite element method provides

significantly more information about the stress-strain state of bolted connections loaded by a variety of schemes, without making any assumptions.

**Keywords:** bolted connection, ANSYS, external load factor, stress-strain state

Болтовые соединения (БС), относящиеся к самым распространенным видам разъемных соединений, существенно влияют на надежность всего изделия. Натурные испытания конструкций с БС — мероприятие дорогостоящее, поэтому расчетным методикам уделяется достаточно большое внимание. Это связано еще и с тем, что разновидностей и технологических решений в воплощении БС тоже очень много [1, 2].

Так, работы [3, 4] посвящены исследованию влияния изменений (появление коррозии и релаксации напряжений) в материале болтов в процессе эксплуатации. Не оставлены в стороне и соединения из полимерных материалов [5]. Аналитические прочностные расчеты металлических БС для разнообразных схем соединения элементов конструкций приведены в статьях [6–8].

Использование компьютерных программ ABAQUS, DEFORM-3D, МАКС [9–16] позволило решить задачи групповых БС с учетом концентраторов напряжений и динамических нагрузок. Большая часть задач по расчету БС относится к статически неопределимым. По сравнению с аналитическими методами компьютерная программа ANSYS Workbench предоставляет значительно больше информации и применима не только к отдельным фрагментам конструкции БС. Эта программа дает полную картину напряженно-деформированного состояния (НДС) всех деталей со-

единения, а не просто нормальные осевые напряжения в болте. Известно, что очень важными участками БС являются места концентраторов напряжений.

Цель работы — моделирование НДС болтовых соединений в программном комплексе ANSYS Workbench.

В качестве примера рассмотрен расчет НДС фундаментных болтов планетарного редуктора под действием опрокидывающего момента и расчет БС под действием отрывающего усилия.

При аналитическом расчете усилий в фундаментных болтах редукторов (групповых БС) усилия от моментов ведомого и ведущих валов приводятся к центру тяжести фигуры, образуемой лапами редуктора на плоскости фундаментной плиты (рис. 1).

Отрывающими нагрузками являются сила  $F_z$  и моменты  $M_x, M_y$ . Оси моментов  $M_x$  и  $M_y$  находятся в плоскости стыка плиты и лап редуктора, что исключает сдвиговую составляющую от крутящего момента на лапах редуктора. Согласно рис. 1, нормальное напряжение в болте определяется выражением

$$\sigma_{\text{ст min}}^{\text{max}} = \frac{F_{\text{зат } z}}{A_{\text{ст}}} - (1 - \chi) \left( \frac{F_z}{A_{\text{ст}}} + \frac{M_x}{J_{\text{ст } x}} L_y + \frac{M_y}{J_{\text{ст } y}} L_x \right),$$

где  $F_{\text{зат } z}$  — усилие затяжки по оси  $z$ ;  $L_y, L_x$  — расстояния от центров болтов до координатных осей;  $F_z$  — внешняя сила по оси  $z$ ;  $A_{\text{ст}}$  — площадь поперечного сечения стыка;  $\chi$  — коэффициент внешней нагрузки,  $\chi = \sum \lambda_{\phi} / (\sum \lambda_{\phi} + \sum \lambda_{\phi})$  ( $\lambda_{\phi}$  и  $\lambda_{\phi}$  — коэффициенты податливости фланцев и болтов);  $J_{\text{ст } x}, J_{\text{ст } y}$  — моменты инерции фигур, образованных сечениями болтов и плоскостями стыков.

При вычислении коэффициентов податливости используют гипотезу правомерной замены фланцев двумя усеченными конусами давления. Экспериментальная проверка гипотезы весьма затруднена. В компьютерных программах эта гипотеза не применяется, так как моделируется реальное поле напряжений и деформаций. Для снижения коэффициента внешней нагрузки следует повышать податливость болтов и снижать податливость фланцев. На практике между фланцами зачастую находится прокладка. В большинстве расчетов обычно учитывают шайбу, хотя ее влияние невелико, но

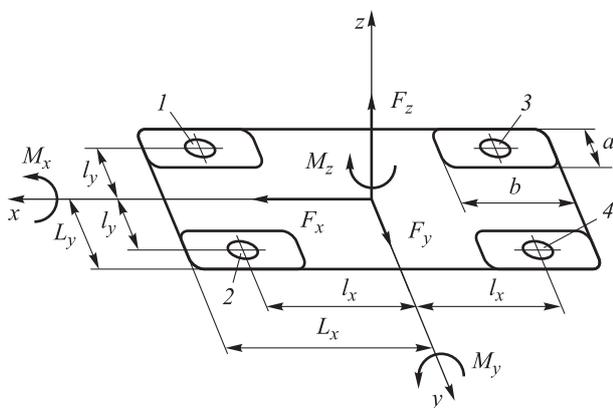


Рис. 1. Схема соединения с помощью группы болтов: 1–4 — БС;  $l_x, l_y$  — расстояния от центров болтов до координатных осей;  $F_x, F_y$  — силы;  $a, b$  — размеры лап корпуса редуктора;  $M_z$  — крутящий момент

игнорируют прокладку. Именно прокладка способствует увеличению коэффициента внешней нагрузки.

**Расчет фундаментных болтов планетарного редуктора.** В качестве примера рассмотрен редуктор, выполненный по схеме двухступенчатого планетарного редуктора с двумя остановленными колесами с внутренним зацеплением. В таком редукторе ведущий и ведомый валы вращаются в одну сторону. Для расчета усилий в болтах необходима модель внешней конфигурации редуктора — реальная или упрощенная, но с эквивалентными размерами (рис. 2).

Использование упрощенной конфигурации модели сокращает количество конечных элементов и существенно уменьшает время вычислений. Точность расчетов при этом не ухудшается. В отличие от общепринятого аналитиче-

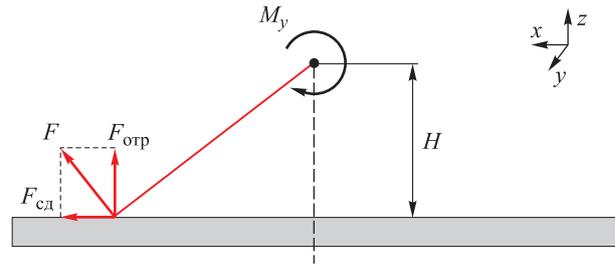


Рис. 3. Схема сил, действующих на фундаментный болт редуктора

ского метода компьютерный вариант расчета учитывает высоту  $H$  расположения валов редуктора над фундаментной плитой (рис. 3).

При таком подходе к исходным данным учитывается зависимость отрывающего усилия  $F_{отр}$  от крутящего момента, а также силы сдвига  $F_{сдл}$  от высоты расположения валов. Усилия на фундаментные болты от крутящего момента передаются через зубчатые колеса, закрепленные в корпусе редуктора. Это исключает необходимость применения при расчетах модели внутренних деталей. В увеличенном масштабе перемещений элементов конструкции под действием крутящего момента заметны отрыв и деформация лап редукторов (см. рис. 2). Фундаментные болты под действием отрывающего и сдвигающего усилий изгибаются.

На рис. 4 показаны болты с указанием нормальных напряжений (Normal Stress) вдоль оси  $y$ . Полученное распределение нормальных напряжений создает изгибающее усилие. Функция Bolt Pretension позволяет создать предварительную затяжку болтов, контролируемую по заданным напряжениям. Предварительная затяжка должна обеспечивать в болтах напряжение порядка 10...20 % предела текучести материала. Для болтов нельзя применять стали с пределом текучести более 1000...1200 МПа ввиду повышенной чувствительности к концентраторам напряжений сталей в высокопрочном состоянии.

Наибольшие напряжения в нагруженном болте, как и следовало ожидать, возникают в галтелях. Именно на эти напряжения и следует ориентироваться при определении допустимых напряжений. Расчетный комплекс ANSYS Workbench позволяет не только рассчитать главные напряжения в болтах, но и оценить правильность конструкции и размеров лап редуктора. На упрощенной модели редуктора видно (рис. 4, а), что в стыках лап с корпусом возникают большие растягивающие напряжения.

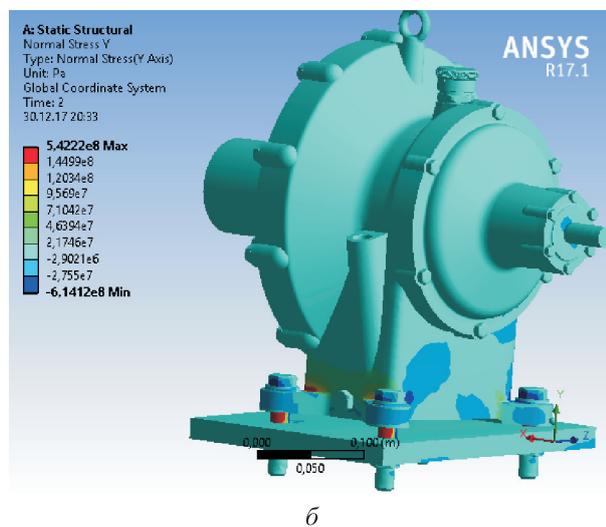
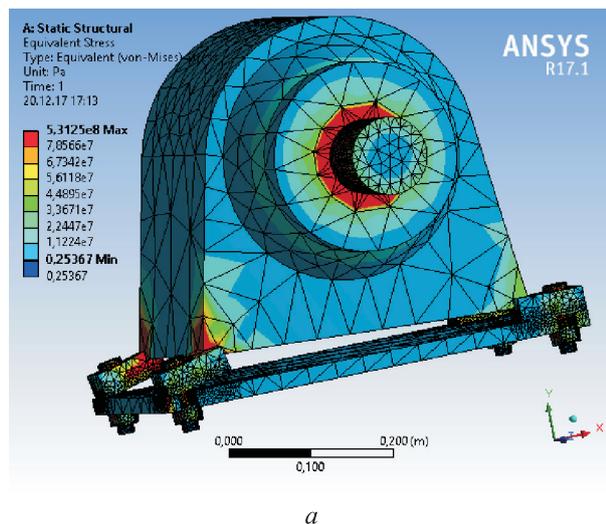


Рис. 2. Упрощенная (а) и реальная (б) расчетные модели редуктора

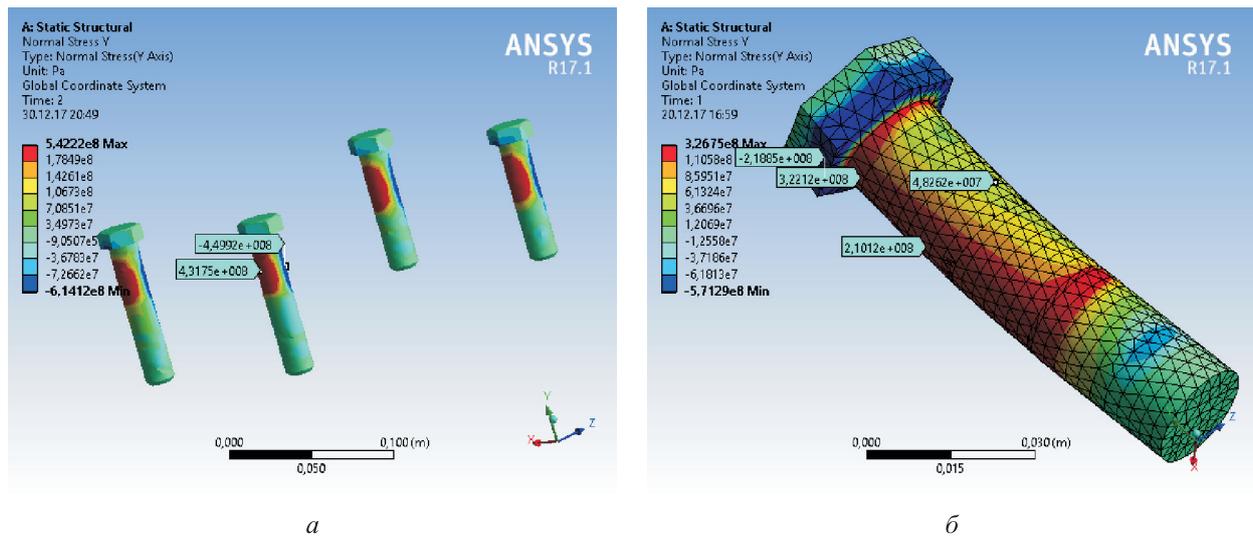


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений, Па, в болтах:  
 а — упрощенная модель; б — реальная модель

**Расчет БС, нагруженного отрывающей нагрузкой.** Для решения поставленной задачи создана модель, состоящая из двух стальных фланцев диаметром 80 мм, соединенных болтом М12 через алюминиевую прокладку (рис. 5). Назначение прокладки — уплотнение стыка, поэтому ее изготавливают из таких материалов, которые имеют небольшой модуль упругости (алюминий, медь, полимеры). Прокладка обжимается при предварительной затяжке и далее ведет себя как упругий элемент конструкции. Фланцы стянуты усилием 40 кН, создающим в болте осевые нормальные напряжения 350 МПа, что составляет примерно одну треть предела текучести материала высокопрочных болтов.

При таком усилии затяжки в деталях соединения формируется НДС, показанное на рис. 6 для эквивалентных напряжений. Эпюры напряжений отличаются от тех, которые соответствуют принятым гипотезам.

Для построения графика распределения усилий в затянутом соединении, по которому обычно определяют усилие раскрытия стыка, компьютерное моделирование дает полную информацию о НДС. Внешняя нагрузка  $F_{вн}$  — это Force в дереве построения, задаваемая величина. Наружная поверхность фланца, контактирующая с головкой болта, закреплена неподвижно. К наружной поверхности второго фланца приложена внешняя нагрузка. Усилие

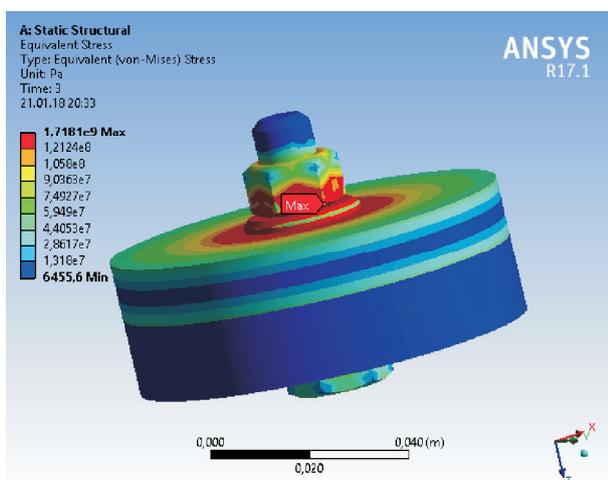


Рис. 5. Внешний вид модели БС — двух фланцев, стянутых болтом через прокладку (предварительное усилие затяжки 40 кН)

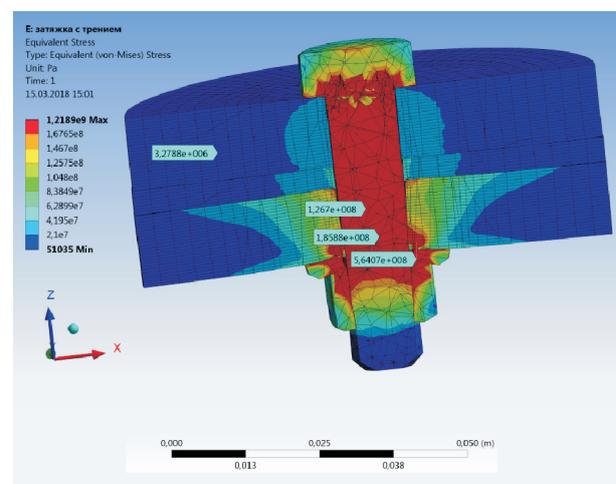


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений, Па, в поперечном сечении БС при предварительной затяжке 40 кН

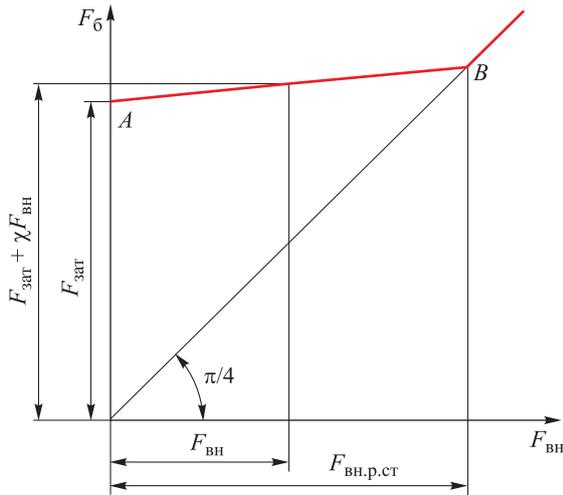


Рис. 7. Зависимость полного усилия в болте  $F_6$  от внешней нагрузки  $F_{вн}$

затяжки  $F_{зат}$ , указанное в дереве построения Bolt Pretension, также задается в зависимости от категории прочности материала болта. В уравнении  $F_6 = F_{зат} + \chi F_{вн}$  полное усилие в болте  $F_6$  вычисляется через действующее в нем напряжение в зависимости от задаваемой внешней нагрузки  $F_{вн}$ . Из этого уравнения определяется коэффициент внешней нагрузки  $\chi$  и строится график (рис. 7).

Тангенс угла наклона линии  $AB$  есть коэффициент внешней нагрузки. В точке  $B$  при  $F_{вн,р.ст}$  начинается раскрытие стыка соединения.

Податливость соединений болтового узла рассчитывается программой ANSYS Workbench по заданным для конкретных деталей модулям упругости и коэффициентам Пуассона. Следует иметь в виду, что коэффициент внешней нагрузки зависит не только от податливости элементов конструкции, но и от схемы приложения внешней нагрузки. Все это учитывается программой. Визуальный осмотр модели указывает на то, что у болта податливость значительно больше, чем у фланцев. В приведенных фрагментах расчета (рис. 8) показана картина НДС на разных этапах нагружения БС отрывающим усилием.

Приложение внешней нагрузки, равной 40 кН, снижает напряжения в прокладке с 37 до 18 МПа. При этом напряжения в болте изменяются с 367 до 375 МПа (см. рис. 8). Этот факт указывает на то, что только небольшая часть внешней нагрузки  $\chi F_{вн}$  дополнительно нагружает болт, а остальная часть  $[(1 - \chi)F_{вн}]$  идет на разгрузку стыка — уменьшение напряжений во фланцах и прокладке. В прокладке напряжения падают в большей степени, так как материал прокладки имеет меньший модуль упругости. Рассмотренный принцип расчета можно использовать при анализе других конструкций групповых соединений, нагруженных по различным схемам.

На основе анализа НДС соединения построена зависимость полного усилия в болте от

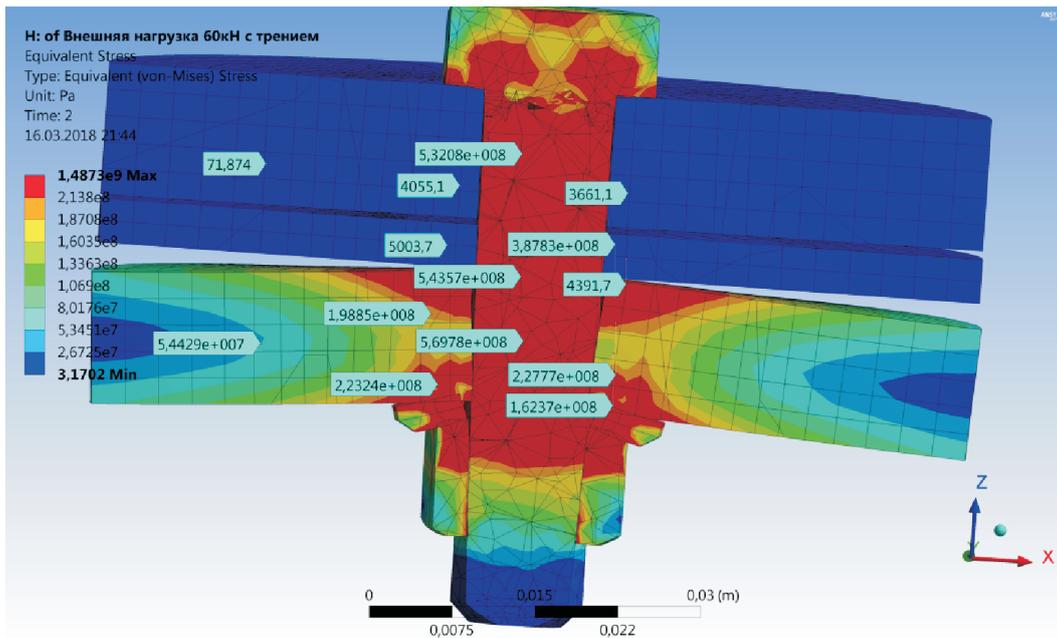


Рис. 8. Распределение эквивалентных напряжений, Па, в поперечном сечении БС, нагруженного усилием 60 кН на внешних сторонах фланцев, при предварительной затяжке 40 кН

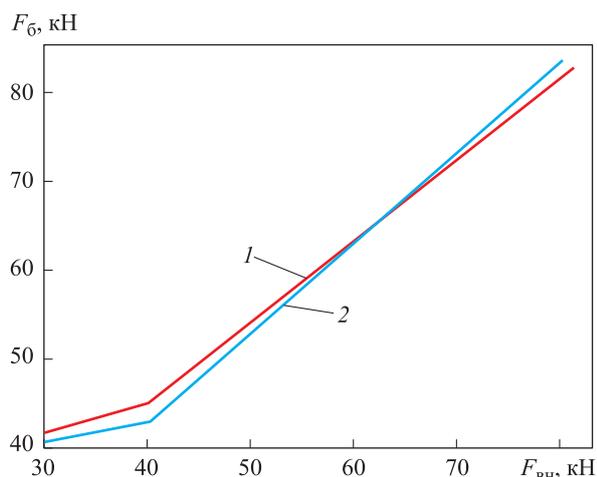


Рис. 9. Расчетная зависимость полного усилия в болте  $F_6$  от внешней нагрузки  $F_{вн}$  при ее приложении к внешней (1) и внутренней (2) сторонам фланцев

внешней нагрузки при двух вариантах ее приложения (рис. 9).

Если нагрузка приложена к внешней поверхности фланцев, то  $\chi = 0,265$ , а если к внутренней —  $\chi = 0,264$ . Без прокладки коэффициент внешней нагрузки снижается до 0,1.

## Выводы

1. Компьютерная технология расчетов БС в среде ANSYS Workbench имеет несомненные преимущества перед аналитическими методами как по информативности, так и точности.

2. В компьютерных программах можно рассчитать БС из нескольких слоев разнородных материалов с различными схемами нагружения.

3. Расчет фундаментных болтов по компьютерным программам дает объективную оценку их напряжений и деформаций.

## Литература

- [1] Matharu N.S., Mottram J.T. *Plain and threaded bearing strength for the design of bolted connections with pultruded FRP material. Engineering Structures*, 2017, vol. 152, pp. 878–887.
- [2] Correia J.A.F.D.O., Pedrosa B.A.S., Raposo P.C., De Jesus A.M.P., dos Santos Gervásio H.M., Lesiuk G.S., da Silva Rebelo C.A., Calçada R.A.B., da Silva L.A.P.S. Fatigue strength evaluation of resin-injected bolts connections using statistical analysis. *Engineering*, 2017, vol. 3, is. 6, pp. 795–805.
- [3] Paolo Z., Curtarello A., Maiorana E., Pellegrino C. Numerical analyses of corroded bolted connections. *Procedia Structural Integrity*, 2017, vol. 5, pp. 592–599.
- [4] Nazarko P., Ziemianski L. Force identification in bolts of flange connections for structural health monitoring and failure prevention. *Procedia Structural Integrity*, 2017, vol. 5, pp. 460–467.
- [5] Woo S.-P., Kim S.-H., Yoon S.-J., Choi W. Effect of Bolt-Hole Clearance on Bolted Connection Behavior for Pultruded Fiber-Reinforced Polymer Structural Plastic Members. *International Journal of Polymer Science*, 2017, vol. 2017, article no. 8745405.
- [6] Васильев Н.С., Заярный С.Л. Модель фрикционного болтового соединения, с учетом податливости стыка. *Инновационная наука*, 2016, № 6, с. 42–44.
- [7] Иванов А.С., Муркин С.В. Расчет и проектирование резьбовых соединений приводов. *Вестник машиностроения*, 2016, № 5, с. 3–10.
- [8] Семенов К.О., Пикус Г.А., Байбурин А.Х. Начальные деформации болтовых соединений металлоконструкций. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*, 2016, № 2, с. 18–21.
- [9] Иванов А.С., Муркин С.В. *Расчет и проектирование резьбовых соединений приводов*. Москва, Инновационное машиностроение, 2015. 108 с.
- [10] Жернаков В.С., Мардимасова Т.Н., Арсланов М.Р., Акбашев В.Р. Исследование влияния резьбовых вставок на напряженно-деформированное состояние резьбового соединения. *Вестник УГАТУ*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 18–24.
- [11] Molnár L., Váradi K., Holubán J., Tamási A. Stress Analysis of Bolted Joints Part II. Contact and Slip Analysis of a Four Bolt Joint. *Modern Mechanical Engineering*, 2014, no. 4, pp. 46–55.
- [12] Molnár L., Váradi K., Liktó B. Stress Analysis of Bolted Joints Part I. Numerical Dimensioning Method. *Modern Mechanical Engineering*, 2014, no. 4, pp. 46–55.

- [13] Евдокимов Н.Н., Степченко А.С., Трубаев А.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния болтового соединения рабочего колеса гидротурбины на основе 3D-модели. *Вестник НТУ «ХПИ»*, 2009, № 42, с. 45–53.
- [14] Жилин Р.А., Нилов В.А., Рукин Ю.Б., Демидов А.В., Коновалюк С.Н., Трухачев А.И. Анализ работоспособности затянутого соединения деталей наклонно-поворотного механизма. *Вестник ВГТУ*, 2014, т. 10, № 5-1, с. 41–45.
- [15] Bocko J., Čarák P., Čajka M. Analysis of Stress and Deformation States in Bolted Joints with Prestress. *American Journal of Mechanical Engineering*, 2016, no. 4(7), pp. 241–246, doi: 10.12691/ajme-4-7-2.
- [16] Liu J.H., Ouyang H.J., Ma L.J., Zhang C.Q., Zhu M.H. Numerical and theoretical studies of bolted joints under harmonic shear displacement. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2015, no. 12(1), pp. 115–132.

## References

- [1] Matharu N.S., Mottram J.T. *Plain and threaded bearing strength for the design of bolted connections with pultruded FRP material. Engineering Structures*, 2017, vol. 152, pp. 878–887.
- [2] Correia J.A.F.D.O., Pedrosa B.A.S., Raposo P.C., De Jesus A.M.P., dos Santos Gervásio H.M., Lesiuk G.S., da Silva Rebelo C.A., Calçada R.A.B., da Silva L.A.P.S. Fatigue strength evaluation of resin-injected bolts connections using statistical analysis. *Engineering*, 2017, vol. 3, is. 6, pp. 795–805.
- [3] Paolo Z., Curtarello A., Maiorana E., Pellegrino C. Numerical analyses of corroded bolted connections. *Procedia Structural Integrity*, 2017, vol. 5, pp. 592–599.
- [4] Nazarko P., Ziemianski L. Force identification in bolts of flange connections for structural health monitoring and failure prevention. *Procedia Structural Integrity*, 2017, vol. 5, pp. 460–467.
- [5] Woo S.-P., Kim S.-H., Yoon S.-J., Choi W. Effect of Bolt-Hole Clearance on Bolted Connection Behavior for Pultruded Fiber-Reinforced Polymer Structural Plastic Members. *International Journal of Polymer Science*, 2017, vol. 2017, article no. 8745405.
- [6] Vasil'ev N.S., Zaiarnyi S.L. Model' friktsionnogo boltovogo soedineniia, s uchetom podatlivosti styka [Model friction bolt connection, taking into account the malleability of the joint]. *Innovatsionnaia nauka [Innovative science]*. 2016, no. 6, pp. 42–44.
- [7] Ivanov A.S., Murkin S.V. *Raschet i proektirovanie rez'bovykh soedinenii privodov* [Calculation and design of screw connections of the actuators]. *Vestnik mashinostroeniia [Russian Engineering Research]*. 2016, no. 5, pp. 3–10.
- [8] Semenov K.O., Pikus G.A., Bayburin A.H. Nachal'nye deformatsii boltovykh soedineniy metallokonstruktsiy [Initial deformations of bolted joints in metal structures]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of SUSU. Series Construction Engineering and Architecture]. 2016, no. 2, pp. 18–21.
- [9] Ivanov A.S., Murkin S.V. *Raschet i proektirovanie rez'bovykh soedinenii privodov* [Calculation and design of screw connections of the actuators]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie, 2015. 108 p.
- [10] Zhernakov V.S., Mardimasova T.N., Arslanov M.R., Akbashev V.R. Issledovanie vliianiia rez'bovykh vstavok na napriazhenno-deformirovannoe sostoianie rez'bovogo soedineniia [Investigation of the influence of threaded inserts on the stressed-deformed state of the threaded connection]. *Vestnik UGATU [Vestnik of Ufa State Aviation Technical University]*. 2017, vol. 21, no. 4, pp. 18–24.
- [11] Molnár L., Váradi K., Holubán J., Tamási A. Stress Analysis of Bolted Joints Part II. Contact and Slip Analysis of a Four Bolt Joint. *Modern Mechanical Engineering*, 2014, no. 4, pp. 46–55.
- [12] Molnár L., Váradi K., Liktor B. Stress Analysis of Bolted Joints Part I. Numerical Dimensioning Method. *Modern Mechanical Engineering*, 2014, no. 4, pp. 46–55.

- [13] Evdokimov N.N., Stepchenko A.S., Trubaev A.I. Modelirovanie napriazhenno-deformirovannogo sostoianii boltovogo soedineniia rabocheho kola gidroturbiny na osnove 3D modeli [Modeling of the stress-strain state of the bolt connection of the impeller of the hydraulic turbine based on the 3D model]. *Vestnik NTU KhPI* [Proceeding of NTU KhPI]. 2009, no. 42, pp. 45–53.
- [14] Zhilin R.A., Nilov V.A., Rukin Iu.B., Demidov A.V., Konovaliyk S.N., Trukhachev A.I. Analiz rabotosposobnosti zatianutogo soedineniia detalei naklonno-povorotnogo mekhanizma [Problems and possible ways of their decision at discrete modelling of complex systems]. *Vestnik VGTU* [Proceedings of Voronezh State Technical University]. 2014, vol. 10, no. 5–1, pp. 41–45.
- [15] Bocko J., Čarák P., Čajka M. Analysis of Stress and Deformation States in Bolted Joints with Prestress. *American Journal of Mechanical Engineering*, 2016, no. 4(7), pp. 241–246, doi: 10.12691/ajme-4-7-2.
- [16] Liu J.H., Ouyang H.J., Ma L.J., Zhang C.Q., Zhu M.H. Numerical and theoretical studies of bolted joints under harmonic shear displacement. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2015, no. 12(1), pp. 115–132.

Статья поступила в редакцию 07.05.2018

## Информация об авторах

**КАРАТУШИН Станислав Иванович** (Санкт-Петербург) — доцент кафедры «Механика деформируемого твердого тела». БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 1-я Красноармейская ул., д. 1, e-mail: karatsi@bk.ru).

**ХРАМОВА Дария Алексеевна** (Санкт-Петербург) — ассистент кафедры «Механика деформируемого твердого тела». БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 1-я Красноармейская ул., д. 1, e-mail: khdoria@mail.ru).

**БОКУЧАВА Петр Нугзариевич** (Санкт-Петербург) — сотрудник кафедры «Космические аппараты и двигатели». БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 1-я Красноармейская ул., д. 1, e-mail: Bokuchava.PN@Astronomikon.ru).

## Information about the authors

**KARATUSHIN Stanislav Ivanovich** (Saint Petersburg) — Associate Professor, Department of Deformable Solid Body Mechanics. Baltic State Technical University VOENMEKH named after D.F. Ustinov (190005, Saint Petersburg, Russian Federation, 1<sup>st</sup> Krasnoarmeyskaya St., Bldg. 1, e-mail: karatsi@bk.ru).

**KHRAMOVA Dariya Alekseevna** (Saint Petersburg) — Assistant Lecturer, Department of Deformable Solid Body Mechanics. Baltic State Technical University VOENMEKH named after D.F. Ustinov (190005, Saint Petersburg, Russian Federation, 1<sup>st</sup> Krasnoarmeyskaya St., Bldg. 1, khdoria@mail.ru).

**BOKUCHAVA Petr Nugzarievich** (Saint Petersburg) — Faculty Member, Department of Spacecraft and Engines. Baltic State Technical University VOENMEKH named after D.F. Ustinov (190005, Saint-Petersburg, Russian Federation, 1<sup>st</sup> Krasnoarmeyskaya St., Bldg. 1, e-mail: Bokuchava.PN@Astronomikon.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Каратушин С.И., Храмова Д.А., Бокучава П.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния болтовых соединений в среде ANSYS. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 8, с. 11–18, doi: 10.18698/0536-1044-2018-8-11-18.

### Please cite this article in English as:

Karatushin S.I., Khramova D.A., Bokuchava P.N. Simulation of the Stress-Strain State of Bolted Connections in ANSYS. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 8, pp. 11–18, doi: 10.18698/0536-1044-2018-8-11-18.