

DOI: <https://doi.org/10.54422/1994-439X.2023.2-54.24-31>

УДК 624.078.4:004.94

канд. физ.-мат. наук Мартыненко Т.М.,

канд. техн. наук, доц. Смиловенко О.О.,

канд. физ.-мат. наук, доц. Мартыненко И.М.*, Лосик С.А.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ БОЛТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА ПОДЪЕМНОГО КРАНА

*Государственное учреждение «Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», г. Минск
* Белорусский государственный университет, г. Минск*

В статье разработана конечно-элементная модель болтового соединения опорно-поворотного устройства подъемного крана. Численный эксперимент в программном комплексе ANSYS Workbench позволил определить наиболее нагруженные болтовые соединения. Показано, что при возрастающей нагрузке на металлоконструкции поворотной и неповоротной рам крана начинается перекосячивание поворотной рамы, а затем дополнительное нагружение крепящих ее болтов. «Чистый болт» начинает работать как «черный», что ведет к последующему его обрыву.

Ключевые слова: башенный кран, конечно-элементная модель, опорно-поворотное устройство, болтовое соединение, устойчивость.

Ph.D. in Physics and Mathematics Martynenko T.M.,

Ph.D. in Technology, Associate Professor Smilovenko O.O.,

Ph.D. in Physics and Mathematics Martynenko I.M.*, Losik S.A.

COMPUTER MODELING OF THE DESTRUCTION OF THE BOLT CONNECTION OF THE SUPPORT-TURNING DEVICE OF THE CRANE

*The State Educational Institution "University of Civil Protection of the Ministry
of Emergency Situations of the Republic of Belarus", Minsk
* Belarusian State University, Minsk*

The finite element model of bolt connection of the support-turning device of the crane is developed. Numerical experiment in the program complex ANSYS Workbench allowed to determine the most loaded bolt connections. It is shown that with increasing load on the metal structures of the rotary and non-rotary frames of the crane the rotary frame begins skewing, and then additional loading of fastening bolts appears. "Clean bolt" begins to work as "black", which leads to its subsequent breakage.

Keywords: tower crane, finite element model, support-turning device, bolt connection, stability.

Введение

Башенный кран – это основная техника для городского строительства и масштабного ремонта. Функция крана состоит в том, чтобы перемещать груз из одной точки площадки в другую. Данное оборудование делает всю строительную площадку опасным производственным объектом. Поворотные строительные краны представляют собой вертикальные башни, наверху которых закреплена стрела. В ходе работ башенный кран может перемещаться и поворачиваться, менять высоту и вылет стрелы для выполнения поставленной задачи. Вращается только поворотная часть крана, связанная с неповоротным опорно-поворотным устройством (далее – ОПУ). Грузы поднимаются при помощи лебедки, каната и крюков.

Эксплуатация башенных кранов на строительных площадках связана с подъемными работами, которые являются одним из основных видов деятельности такого оборудования. Использование кранов для подъема и монтажа конструкций опасно ввиду возможного падения груза, его столкновения с движущимися препятствиями или краном, контакта с высоковольтными линиями электропередач. Потеря устойчивости крана и его опрокидывание может привести к травмам, гибели людей, повреждению зданий. Опрокидывание крана при подъемных работах является одной из наиболее серьезных проблем в строительной отрасли. Таким образом, возникает задача обеспечения безопасной эксплуатации кранов за счет сохранения устойчивости.

Конструкции кранов обычно разрушаются в наиболее нагруженных узлах, в которых при эксплуатации образуются трещины. Трещины могут развиваться медленно (до нескольких лет) или практически мгновенно (при хрупком разрушении). Последнее представляет наибольшую опасность для конструкций, так как происходит без заметной деформации или образования видимых трещин и поэтому трудно диагностируется (рисунок 1).

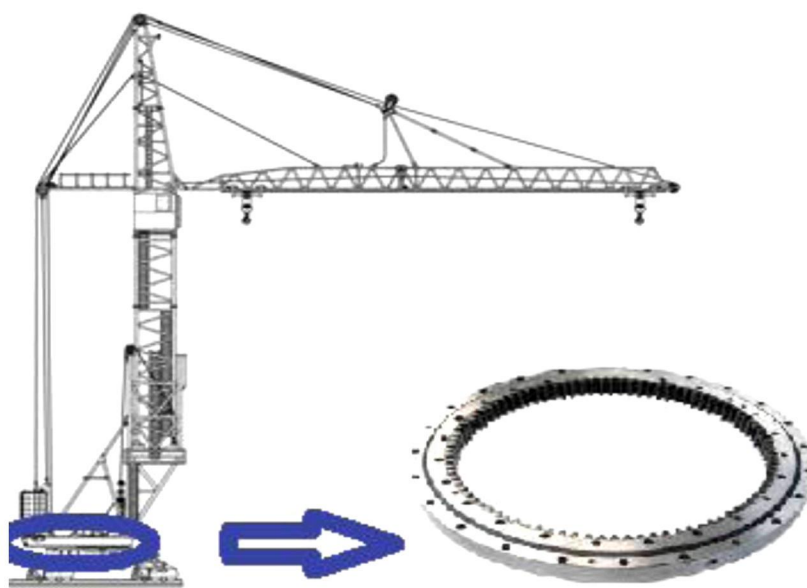


Рисунок 1. – Поворотный кран стреловидного типа с вынесенным ОПУ

Экспертиза аварий выявила, что чаще всего разрушается болтовое соединение внутреннего кольца с ОПУ (для упрощения расчета в модели отсутствуют наружное кольцо). Предельное рабочее усилие для одного болта диаметром 30 мм (площадь сечения по внутреннему диаметру резьбы 561 мм^2) из стали 40Х в многоболтовом соединении на растяжение составит около 15 т [2].

К основным причинам падений башенных кранов относят следующие: нарушение требований к изготовлению основных узлов и металлоконструкций, некачественный монтаж/демонтаж, низкий уровень организации работ, нарушение правил техники безопасности. Другая важная составляющая аварийности – техника изношена до предела. Одной из причин снижения уровня промышленной безопасности подъемных сооружений является большое количество оборудования, отработавшего свой расчетный ресурс.

Наименее надежный узел башенного крана – кольцевая поворотная рама с местами повышенной концентрации напряжений [1]. Целью данной работы является повышение надежности болтового крепления ОПУ.

Экспериментальные исследования

Для создания трехмерной модели крепления ОПУ использован программный комплекс *Autodesk Inventor Professional*, который позволяет работать со сборкой из твердых тел, находящихся в параметрических зависимостях между собой, и дает возможность варьировать геометрические параметры и виды нагружения конструкции при проведении модельных экспериментов.

ОПУ крепится калиброванными болтами к рамам: поворотной и неповоротной и является, по существу, упорным подшипником качения большого диаметра. В кране имеется 48 болтов, установленных без зазора (рисунок 2), наружный диаметр круга рамы 2500 мм и диаметр окружности установки болтов 2430 мм.



Рисунок 2. – Болтовое соединение

Далее был произведен экспорт данных в ANSYS [3]. Для оценки влияния крепления на работу конструкции выполнен численный эксперимент.

На рисунке 3 приведена объемная модель ОПУ.

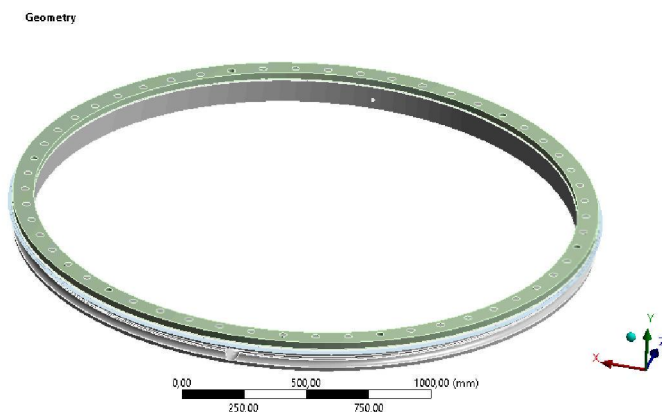


Рисунок 3. – Объемная модель ОПУ

Переходим от тел к конечным элементам, для чего нужно выбрать характерный размер элемента, форму элемента, способы разбиения. Для моделирования объемных сплошных тел *ANSYS Workbench* по умолчанию использует 3D-элементы типа *SOLID187* и *BEAM188*. Конечный элемент (КЭ) *SOLID187* – трехмерный элемент объемного напряженно-деформированного состояния с десятью узлами в форме тетраэдра, при этом каждый узел обладает тремя степенями свободы – три перемещения вдоль осей узловой системы координат. Конечный элемент *BEAM188* – одномерный балочный конечный элемент. Это двухузловой КЭ с линейной, квадратичной или кубической аппроксимацией. Каждый узел обладает шестью степенями свободы: три перемещения в направлениях x , y , z и три угла поворота вокруг осей Ox , Oy , Oz . Элементы *SOLID187* и *BEAM188* возможно использовать как в задачах с линейной постановкой, так и в задачах с нелинейной постановкой с большими деформациями [4]. Конечные элементы имеют произвольную ориентацию в пространстве и обладают свойствами пластичности, ползучести, гиперупругости, изменения жесткости под действием нагрузок [5].

Исследуемая конечно-элементная модель принята в виде тетраэдров и состоит из 68 062 конечных элементов двух основных типов: *SOLID187* (трехмерный элемент объемного НДС с десятью узлами в форме тетраэдра) и *BEAM188* (одномерный балочный конечный элемент) средний «габаритный» размер элемента составлял 1 мм, открытый профиль 5 мм (рисунок 4) [6].

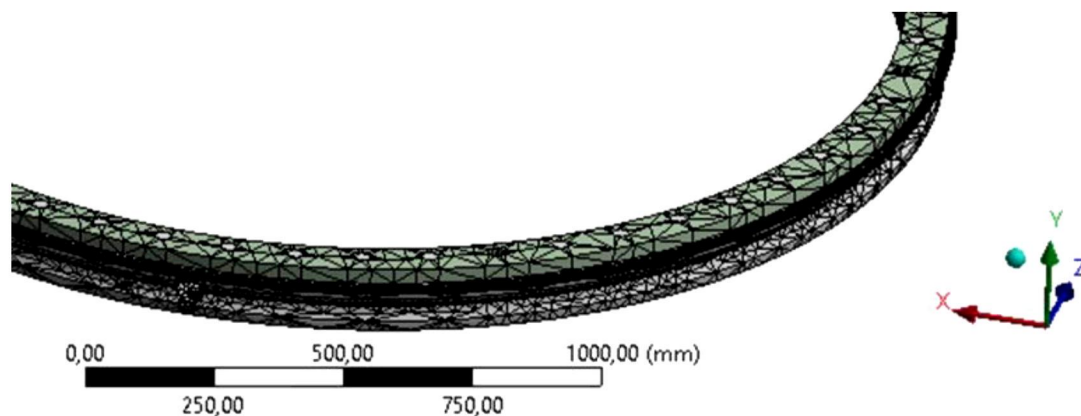


Рисунок 4. – Фрагмент модели ОПУ с нанесенной конечно-элементной сеткой

Кран, предназначенный для строительства 9-10-этажных зданий, имеет следующие характеристики: вылет стрелы – от 10 до 20 м, высота подъема крюка – до 33 м, грузоподъемность – 12,5 т, расстояние от оси вращения крана до центра масс в горизонтальной плоскости меняется от 5,75 м до 13,4 м. Для моделирования приложения удаленной силы и соблюдения равновесия между силой и моментом используем инструмент *Remote Force*.

Для данной конечно-элементной модели проводим статический расчет на прочность каждого болтового соединения. Воспользуемся модулем *Beam Prob*, предназначенным для определения уникального численного параметра каждого из 48 заданных соединений, который не будет перезаписываться и может использоваться для отслеживания в постобработке (таблица 1).

Таблица 1

● Result Summary

Probe: Beams	Axial Force	Shear Force At I	Shear Force At J	Units	Torque	Moment At I	Moment At J	Units	Time (s)
Beam Probe 37	84998	1627,6	1627,6	N	2,6481e-010	2,1775e+005	4,2276e-009	N*mm	1,
Beam Probe 44	84707	1565,2	1565,2	N	-2,3971e-010	2,0939e+005	4,1285e-009	N*mm	1,
Beam Probe 46	77982	1373,4	1373,4	N	-3,9784e-012	1,8373e+005	1,1621e-009	N*mm	1,
Beam Probe 35	77395	1313,	1313,	N	2,8163e-012	1,7565e+005	1,1194e-009	N*mm	1,
Beam Probe 38	67879	1409,	1409,	N	3,5958e-010	1,8849e+005	4,3469e-009	N*mm	1,
Beam Probe 43	67461	1418,9	1418,9	N	1,2241e-010	8,4933e-009	1,8982e+005	N*mm	1,
Beam Probe 42	62545	1386,7	1386,7	N	4,2801e-011	1,8551e+005	1,5608e-009	N*mm	1,
Beam Probe 40	62054	1293,2	1293,2	N	4,7692e-011	1,7301e+005	2,0729e-009	N*mm	1,
Beam Probe 39	62036	1321,	1321,	N	8,3113e-012	1,554e-009	1,7672e+005	N*mm	1,
Beam Probe 41	61759	1340,8	1340,8	N	-1,1414e-011	3,1088e-009	1,7937e+005	N*mm	1,
Beam Probe 34	53631	1340,	1340,	N	8,2607e-012	1,6716e-009	1,7927e+005	N*mm	1,
Beam Probe 47	53480	1346,2	1346,2	N	-8,433e-012	1,6599e-009	1,8009e+005	N*mm	1,
Beam Probe 48	41246	1350,5	1350,5	N	-1,1318e-010	1,8067e+005	6,779e-010	N*mm	1,
Beam Probe 33	41182	1330,7	1330,7	N	1,0832e-010	1,7803e+005	7,025e-010	N*mm	1,
Beam Probe 32	35024	1366,	1366,	N	-1,8548e-011	2,5096e-009	1,8275e+005	N*mm	1,
Beam Probe 49	34663	1291,7	1291,7	N	1,6844e-011	2,4577e-009	1,7281e+005	N*mm	1,
Beam Probe 50	29641	1366,2	1366,2	N	-4,0003e-010	1,8277e+005	1,7287e-009	N*mm	1,
Beam Probe 31	29464	1318,2	1318,2	N	3,8453e-010	1,7634e+005	1,8676e-009	N*mm	1,
Beam Probe 51	23598	1337,5	1337,5	N	5,6559e-011	1,1525e-009	1,7893e+005	N*mm	1,
Beam Probe 30	23538	1342,2	1342,2	N	-5,6105e-011	1,1257e-009	1,7956e+005	N*mm	1,
Beam Probe 29	17104	1336,2	1336,2	N	-3,9207e-010	1,7876e+005	2,5304e-009	N*mm	1,
Beam Probe 52	17072	1354,6	1354,6	N	5,0822e-010	1,8122e+005	2,1774e-009	N*mm	1,
Beam Probe 28	10728	1340,2	1340,2	N	-7,2933e-011	1,343e-009	1,793e+005	N*mm	1,
Beam Probe 53	10723	1342,8	1342,8	N	1,0612e-010	1,3775e-009	1,7964e+005	N*mm	1,
Beam Probe	-3201,3	1319,8	1319,8	N	1,099e-010	1,355e-009	1,7657e+005	N*mm	1,
Beam Probe 26	-3218,5	1322,7	1322,7	N	3,6076e-010	1,7695e+005	1,3484e-009	N*mm	1,
Beam Probe 25	-11303	1303,2	1303,2	N	1,1063e-010	1,635e-009	1,7434e+005	N*mm	1,
Beam Probe 2	-11401	1319,1	1319,1	N	-8,5648e-011	2,0685e-009	1,7647e+005	N*mm	1,

При расчете прочности болтового соединения без зазора не учитывают силы трения в стыке, стержень болта рассчитывают по напряжениям среза. Напряжение смятия в сечении детали при перпендикулярном сечении болта по поверхности контакта распределено по серповидному закону с максимальным значением по линии действия силы. При разбитом болтовом отверстии болт без зазора начинает работать как болт с зазором, момент передается за счет сил трения между фланцем внутреннего кольца и фланцем обечайки.

На основании полученных расчетных данных делаем вывод о том, что болты, равноудаленные от оси вращения крана до вертикальной оси, проходящей через башню, недогружены, а в области примыкания к поворотной раме консоли противовеса и стрелы нагружены неравномерно.

Для определения параметров разрушения болтового соединения моделируем обрыв наиболее нагруженной области болтового крепления (*Beam Probe 37, 44*) опорно-поворотного устройства в растянутой области (таблица 2).

Таблица 2

Probe: Beams	Axial Force	Shear Force At I	Shear Force At J
Beam Probe 38	1,086e+005	1641,7	1641,7
Beam Probe 43	1,0789e+005	1637,	1637,
Beam Probe 46	99945	1262,7	1262,7
Beam Probe 35	99347	1223,4	1223,4

При оборванных 37 и 44 болтах (*Beam Probe 37, 44 Axial Force=0*) моделируем разрушение болтовых соединений в наиболее нагруженной области болтового крепления (*Beam Probe 38, 43*) опорно-поворотного устройства в растянутой области (таблица 3).

Таблица 3

Probe: Beams	Axial Force	Shear Force At I	Shear Force At J
Beam Probe 42	1,3902e+005	1988,4	1988,4
Beam Probe 39	1,3883e+005	1916,	1916,
Beam Probe 46	1,363e+005	1384,3	1384,3
Beam Probe 35	1,3588e+005	1382,8	1382,8
Beam Probe 40	55675	1227,6	1227,6

Продолжаем моделировать разрушение болтовых соединений, имитируя обрыв наиболее нагруженной области болтового крепления (*Beam Probe 39, 42*) опорно-поворотного устройства в растянутой области (таблица 4).

Таблица 4

Probe: Beams	Axial Force	Shear Force At I	Shear Force At J
Beam Probe 40	1,7535e+005	1847,7	1847,7
Beam Probe 41	1,7424e+005	1993,8	1993,8
Beam Probe 46	1,6826e+005	1596,4	1596,4
Beam Probe 35	1,6756e+005	1626,5	1626,5
Beam Probe 34	49066	840,21	840,21

Разрушение болтового крепления опорно-поворотного устройства происходит по наиболее нагруженным болтам *Beam Probe 40, 41, 46, 35*, для материала которых превышен предел текучести. Силы начинают расти, работая на растяжение, и превышают предельно допустимые 15 т.

При возрастающем моменте, созданном противовесом, резко возрастает нагрузка не только на болты ОПУ, но и на металлоконструкции поворотной и неповоротной рам крана, начинается перекося сначала поворотной рамы, а затем и дополнительное нагружение крепящих ее к ОПУ болтов, «чистый болт» начинает работать как «черный», что ведет к последующему его обрыву.

Заключение

Разработана конечно-элементная модель разрушения болтового соединения в программном комплексе *ANSYS Workbench*. В результате компьютерного моделирования получено, что недотянутые болты начинают работать как болты

с зазором; возникают не только сдвиговые напряжения, но и напряжения кручения, связанные с дополнительной затяжкой.

Нормальная сила вызывает изгиб болтов, что приводит к возникновению в них значительных изгибных напряжений, наложенных на растягивающие напряжения от затяжки болтов. Особенно высок уровень таких напряжений в ближайших к моментной нагрузке болтах 35, 40, 41, 46, в которых превышена предельно допустимая сила равная 15 т.

Изгиб болтов приводит к возникновению в ОПУ зон с повышенным уровнем растягивающих контактных напряжений на выходах из отверстий, а также к неравномерному распределению растягивающих напряжений на боковых поверхностях этих отверстий, что вызывает их местное повреждение. При разбитых отверстиях рамы калиброванный болт начинает работать как болт с зазором, что ведет к последующему его обрыву.

ЛИТЕРАТУРА

1. Департамент по надзору за безопасным ведением работ в промышленности Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь: [Электронный ресурс]. URL: <https://gospromnadzor.mchs.gov.by>. – Дата доступа: 29.07.2023.

2. ГОСТ 1759.4-87 «Болты, винты и шпильки. Механические свойства и методы испытаний».

3. Дьяков, И.Ф. К расчету оболочки, укрепленной тонкостенными стержнями / И.Ф. Дьяков, С.А. Чернов // Автоматизация и современные технологии. – 2008. – № 1. – С. 16–20.

4. Басов, К.А. ANSYS в примерах и задачах / К.А. Басов; под общ. ред. Д. Г. Красковского. – М.: Компьютер-Пресс, 2002. – 223 с.

5. Мартыненко, Т.М. Анализ механических характеристик узловых соединений строительных конструкций на основе моделирования в среде ANSYS / Т.М. Мартыненко, О.О. Смиловенко, В.А. Максимович, М.В. Мелюх // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F Строительство. Прикладные науки. – 2023. – С. 39–44.

6. Конструирование зданий и сооружений. Легкие стальные тонкостенные конструкции: учеб. пособие / Н.И. Ватин, Е.Н. Жмарин, В.Г. Куражова, К.Ю. Усанова. – СПб.: Политехн. ун-т, 2012. – 266 с.

REFERENCE

1. Departament po nadzoru za bezopasnym vedeniem rabot v promyshlennosti Ministerstvo po chrezvychajnym situacijam Respubliki Belarus': [Elektronnyj resurs]. URL: <https://gospromnadzor.mchs.gov.by>. (29.07.2023).

2. GOST 1759.4-87 «Bolty, vinty i shpil'ki. Mekhanicheskie svojstva i metody ispytanij».

3. D'yakov, I.F. K raschetu obolochki, ukreplennoj tonkostennymi sterzhnyami / I.F. D'yakov, S.A. Chernov // Avtomatizaciya i sovremennye tekhnologii. – 2008. – № 1. – S. 16–20.

4. Basov, K.A. ANSYS v primerah i zadachah / K.A. Basov; pod red. D.G. Kraskovskogo. – M.: Komp'yuter-Press, 2002. – 223 s.

5. Martynenko, T.M. Analiz mekhanicheskikh harakteristik uzlovyh so-edinenij stroitel'nyh konstrukcij na osnove modelirovaniya v srede ANSYS / T.M. Martynenko, O.O. Smilovenko, V.A. Maksimovich, M.V. Melyuh // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – 2023. – S. 39–44.

6. Konstruirovaniye zdaniy i sooruzhenij. Legkie stal'nye tonkostennyye konstrukcii: ucheb. posobie / N.I. Vatin, E.N. ZHmarin, V.G. Kurazhova i dr. – SPb.: Politekhn. un-t, 2012. – 266 s.

