

УДК 622.673.6

Е. А. Калентьев, кандидат технических наук
В. В. Тарасов, доктор технических наук, профессор
Институт механики УрО РАН
Ю. В. Пузанов, кандидат технических наук, доцент
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КАНАТА ПРИ РАБОТЕ НА БЛОКЕ*

В работе представлены результаты численного анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) каната при его работе на блоке. Проведен анализ полученных результатов и сделаны выводы о возможности применения разработанной методики в практике инженерных расчетов.

Ключевые слова: стальной канат, численный анализ, блок.

Введение

Стальной канат широко используется в современной технике, особенно в подъемно-транспортных машинах и механизмах. Существует большое количество видов канатов, но основными конструктивными факторами, определяющими форму и границы применимости того или иного вида, являются: порядок свивки, профиль поперечного сечения отдельной проволоки, форма контакта между проволоками в пряди, контакт прядей в канате.

В конструкции каната одинарной свивки проволоки с осями в форме винтовых линий свиты в один или несколько слоев вокруг центральной прямолинейной проволоки. Канаты одинарной свивки называются также спиральными канатами. Если произвести дальнейшую свивку спирального каната, получится так называемый канат двойной свивки; при этом спиральный канат будет называться прядью. Заметим, что в канатах двойной свивки центральная проволока пряди имеет форму винтовой линии. Продолжая аналогичным образом процесс свивки, можно получить канат любого порядка свивки. Наибольшее распространение получили спиральные канаты и канаты двойной свивки.

Перед современной промышленностью стоит задача повышения долговечности канатов. Для решения этой задачи применяются разнообразные методы: это рациональное геометрическое проектирование конструкции канатов, совершенствование подъемной техники, применение различных смазочных материалов, модернизация конструкций канатов, введение в них полимерных материалов, снижающих деградационные явления, вызванные процессом трения его элементов. Знание особенностей контактного взаимодействия проволок в канате между собой и блоком позволит построить научно обоснованные методики расчета канатов на долговечность.

Следуя интуиции и работе [1], изгиб канатов и связанные с ним напряжения при работе на блоках и барабанах являются главным фактором разрушения канатов. Напряжение в элементах каната могут быть разделены на три группы:

1. Первичные изгибные напряжения, связанные с изменением формы оси каната при ее изгибе.

2. Вторичные изгибные напряжения, связанные с раздавливанием элементов каната на блоках и барабанах.

3. Контактные напряжения в элементах каната, вызванные поперечной нагрузкой.

В связи с этим определение напряженно-деформированного состояния каната при его работе на блоке представляет важную задачу, позволяющую подойти к вопросу снижения износа проволок каната и продления ресурса его работы. Например, в работе [2] проведен анализ процессов фреттинг-разрушения (механического изнашивания соприкасающихся тел при колебательном относительном микросмещении), приводящего к снижению долговечности канатов.

Численный анализ широко используется для исследования напряженно-деформированного состояния канатов, этому вопросу посвящено множество работ, в том числе и относительно свежих – 2010–2015 гг. Среди работ Cengiz Erdonmez, C. Erdem İmrak отметим [3, 4].

В работе Gordana M. Kastratović, Nenad D. Vidanović [5], кроме прочего, проведено исследование зависимости количества конечных элементов модели и типа контактного взаимодействия на полученные результаты.

В работе [6] исследуются синтетические плетеные канаты, при этом большое внимание уделено контактному взаимодействию элементов каната.

Влияние направления свивки слоев спирального каната на напряженно-деформированное состояние проведено в работе [7], рассматривается трехслойный спиральный канат, и строятся зависимости нормальных напряжений вдоль продольной оси каната. При этом параметрами приняты продольная сила, и комбинации направлений свивки слоев проволок каната.

Исследование стальных канатов при воздействии высоких температур выполнено в работе V. Fontanari, B. D. Monelli, F. Degasperi, A. Dallago [8]. Объектами изучения являются: 124-проволочный канат закрытой конструкции с номинальным диаметром 60 мм и 186-проволочный канат конструкции 6×31 Варрингтон-Сил номинальным диаметром 36 мм.

Интересна работа [9], в которой исследуется поведение прямого каната при его контакте со шкивом. Показано, что при огибании канатом шкива центральная прядь каната загружена больше, чем внешние пряди. Однако стоит отметить, что в рассматриваемой постановке канат в свободном, не нагруженном состоянии не огибает шкив.

В работе Rakesh Sidharthan, Gnanavel B. K. [10] объектом исследования является состояние каната при осевом удлинении. Особенностью данной работы является моделирование эрозийного износа проколов каната в морской воде.

Сведения об изучаемом объекте и его геометрии

Объектом исследования является прядь каната с линейным касанием двойной свивки типа ЛК-Р конструкции $6 \times 19(1+6+6/6)+1$.о.с. Канат 25-ГЛ-В-Л-О-Н-Т-1770 ГОСТ 2688–80, работающая на цилиндрическом блоке. Общее количество проволок в пряди – 19 шт.; шаг свивки проволок – 60 мм; диаметр пряди каната – 8 мм; кратность свивки – 7,5; длина пряди каната $l = 100$ мм; модуль упругости материала проволок и блока $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; коэффициент трения $\mu = 0,2$. Диаметр блока 55,94 мм, толщина блока 12 мм.

Одна из торцевых поверхностей каната жестко закреплена (здесь и далее под торцевой поверхностью пряди каната подразумевается совокупность торцевых поверхностей составляющих ее проволок). На противоположном торце, который свободен, моделируется поверхность с жестким поведением как наиболее точно соответствующая реальным условиям нагружения каната. В табл. 1 приведены некоторые геометрические характеристики проволок, необходимые для построения модели каната.

Исследования распространяются на случаи статического нагружения торцевой поверхности каната с жестким поведением. К ней прикладывается растягивающее усилие T , перпендикулярное торцу, второй торец каната и блок жестко закреплены. Условия симметрии не вводятся.

Таблица 1

№ слоя	Количество проволок, шт.	Диаметры проволок, мм	Радиусы винтовых спиральных осей проволок, мм	Шаг свивки, мм
0	1	1,75	–	–
1	6	1,72	1,754	60,00
2-1	6	1,36	3,315	60,00
2-2	6	1,8	3,1	60,00

Задача расчета НДС пряди каната решается как задача контактного взаимодействия с учетом трения геометрически нелинейных проволок, находящихся в пространственном напряженном состоянии. Отметим, что первоначально канат изогнут на блоке и свободен от напряжений.

Целью расчета является определение следующих характеристик пряди каната: перемещений каната Δl ,

интенсивности напряжений $\sigma_{\text{эKB}}$ и контактных давлений в зонах взаимодействия проволок между собой и с блоком p . НДС пряди каната будем находить методом конечных элементов.

Для создания расчетной геометрии исследуемого объекта используется одна из распространенных в инженерной практике систем твердотельного трехмерного проектирования. На рис. 1 и 2 показаны результаты моделирования геометрии пряди каната.

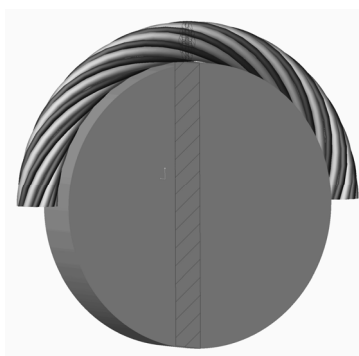


Рис. 1. Геометрическая модель каната на блоке

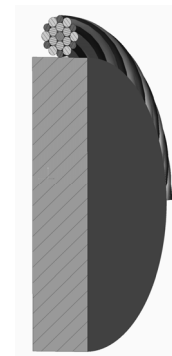


Рис. 2. Поперечное сечение геометрической модели

Конечно-элементная модель, контактные взаимодействия

Генерация конечно-элементной сетки осуществляется посредством процедуры – «методом протягивания» (Sweep Method). Суть метода заключается в следующем: один из торцов проволоки выбирается «источником», второй – «целью», а винтовая ось проволоки – «путем». Торце «источник» разбивается на конечные элементы (гексаэдры), которые затем «протягиваются» по «пути» до торца «цели». Данная процедура выполняется для всех проволок пряди каната. Далее определяется длина ребер конечных элементов на торцевой поверхности пряди каната. Полученная таким образом конечно-элементная модель пряди представлена на рис. 3 и 4; основные параметры сетки приведены в табл. 2.

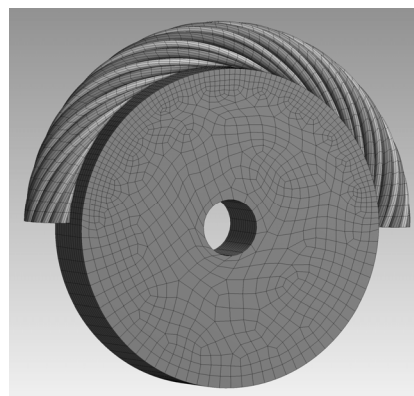


Рис. 3. Конечно-элементная модель каната и блока

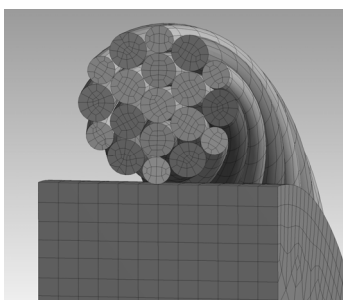


Рис. 4. Поперечное сечение конечно-элементной модели каната и блока

Таблица 2. Основные параметры конечно-элементной сетки

№ п/п	Наименование квадратичного элемента	Имя конечного элемента	Количество элементов в модели
1	20-узловой гексаэдр	Mesh200	31334
2	8-узловой контактный четырехугольник	Conta174	22792
3	8-узловой целевой четырехугольник	Targe170	29390

К основным проблемам численного анализа НДС канатов с линейным касанием следует отнести сложную структуру и множественное пространственное контактное взаимодействие между элементами каната и блоком (рис. 5, 6).

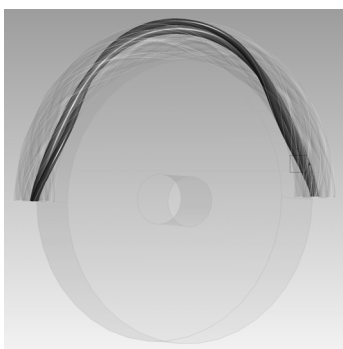


Рис. 5. Контакт проволок каната между собой

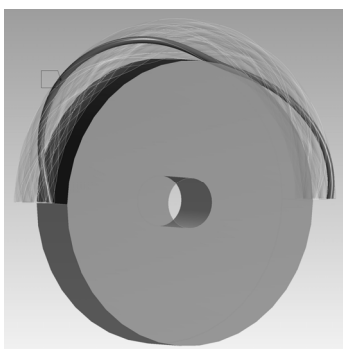


Рис. 6. Контакт проволоки каната с блоком

Общее количество контактных областей (границ) в рассматриваемой пряди составляет 42, также 12 проволок наружного слоя контактируют с блоком. Таким образом, общее количество контактных областей в рассматриваемой задаче составляет 54. Кон-

тактные области определяются следующим образом: цилиндрическая поверхность всех проволок разбивается на две полуповерхности, и в зависимости от их формы задействована либо вся цилиндрическая поверхность проволок, либо только одна из цилиндрических полуповерхностей. При этом контакт между проволоками имеет симметричный характер.

Далее выполняется настройка первоначального взаимодействия контактной пары, а именно, вводится дополнительный сдвиг контактной поверхности за счет добавления некоторого смещения. Величина этого смещения выбирается для каждой контактной пары индивидуально исходя из ее геометрии, а именно, существующих первоначальных зазоров и проникновений. Введение этой функции позволяет снизить степень влияния дискретизации сетки, особенно на криволинейных поверхностях, а также привести контактные поверхности в первоначальный контакт.

Для математического описания контактных взаимодействий воспользуемся расширенным методом Лагранжа, который является основным алгоритмом решения подобных задач. Он базируется на итерационной процедуре метода штрафных функций. Согласно методу штрафных функций для определения контактной области между двумя поверхностями вводится понятие контактной «пружины». Жесткость такой искусственно введенной в алгоритм «пружины» называется контактной жесткостью k и является параметром штрафной функции. Если статус контакта «открытый», т. е. поверхности не пришли в соприкосновение, «пружина» неактивна, при соприкосновении поверхностей она активируется и включается в алгоритм расчета. «Пружина» растягивается на величину Δ , в области контакта наступает равновесие, так как величина контактного усилия $F = k\Delta$ становится равной величине внешних нагрузок. Для обеспечения равновесия внешних и внутренних сил величина Δ должна быть больше нуля. В реальности проникание одной контактирующей поверхности в другую не происходит, а в ANSYS, для успешной генерации контактной пары, проникание вводится искусственно. Основные параметры контакта (контактное давление и напряжение трения) увеличиваются в процессе выполнения дополнительных итераций таким образом, чтобы конечное проникание было меньше, чем задаваемая величина допуска на внедрение. К преимуществам расширенного метода Лагранжа следует отнести то, что алгоритм на его основе минимизирует проникание одной контактной поверхности в другую, обладает меньшей чувствительностью к величине контактной жесткости, имеет лучшие условия сходимости, чем непосредственно метод штрафных функций [11].

Напряженно-деформированное состояние каната при работе на блоке

Рассмотрим некоторые результаты проведенного исследования. На рис. 7–8 изображены поля перемещений и распределение интенсивности напряжений в модели в целом.

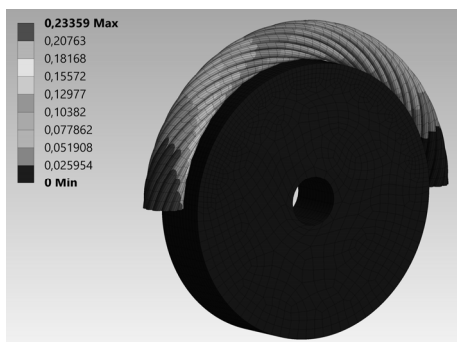


Рис. 7. Поле перемещений модели, мм

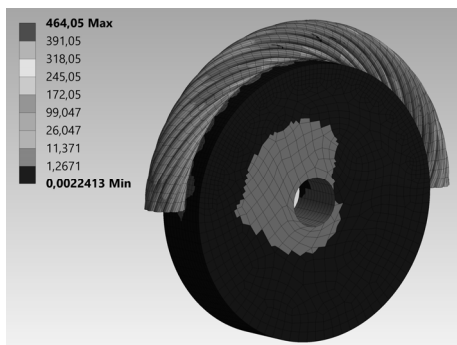


Рис. 8. Поле интенсивности напряжений, МПа

При приложении вышеуказанного нагружения происходит удлинение каната по направлению действия усилия и растяжение по окружности блока. Интенсивность напряжений распределена неравномерно между элементами каната. Это хорошо видно

на рис. 9 и на графике изменения интенсивности напряжений вдоль вертикального отрезка, проходящего по диаметру каната и расположенного в поперечном сечении модели (рис. 10).

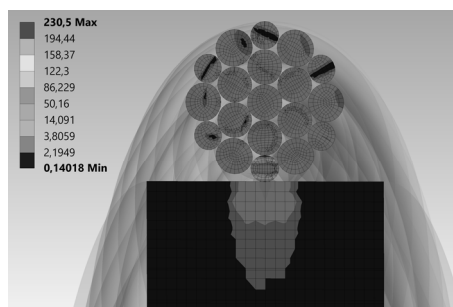


Рис. 9. Распределение интенсивности напряжений по сечению модели, МПа

Видно, что наиболее нагруженным элементом в этом сечении является нижняя, контактирующая с блоком проволока каната, имеющая два локальных максимума интенсивности напряжений: первый со стороны контакта с проволокой внутреннего слоя и второй в точке контакта с поверхностью блока.

Рассмотрим распределение контактных давлений на поверхности блока, показанных на рис. 11. Хорошо видно чередования локальных максимумов и минимумов контактных давлений, что соответствует поочередному контакту проволок наружного слоя с блоком. Такая последовательность объясняется разными диаметрами проволок наружного слоя каната.

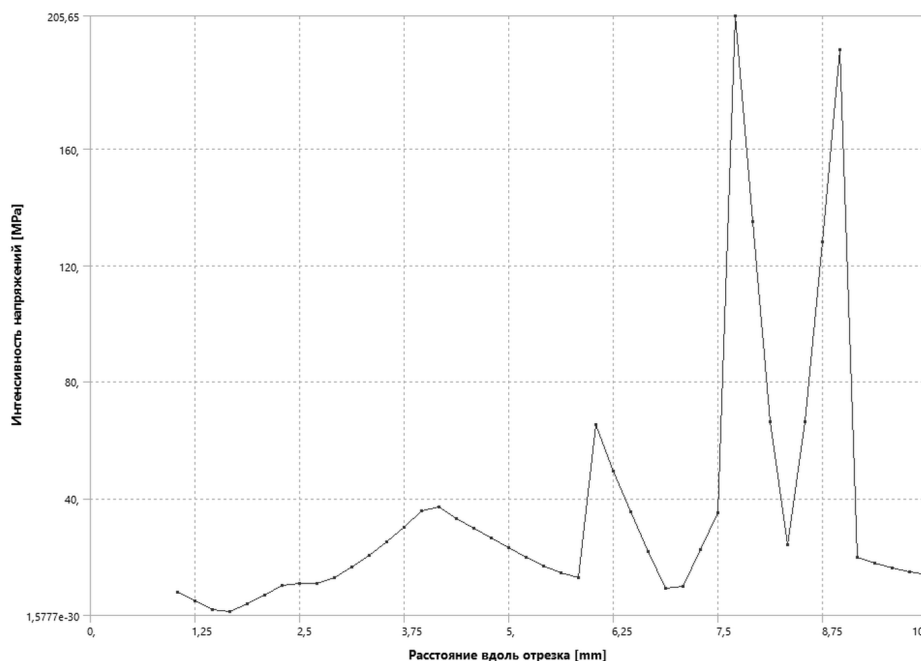


Рис. 10. График интенсивности напряжений

Сравнивая величины контактных давлений при работе каната на блоке со случаем простого растяжения прямолинейного каната, рассмотренным в работе [12], можно отметить их резкое возрастание, что объясняется в том числе точечным контактом проволок с блоком.

Также отметим рост интенсивности напряжений при сравнении данных случаев работы каната. Таким образом, это хорошо подтверждает тот факт, что основной причиной износа и выхода из строя канатов является их работа на блоках различных подъемных механизмов.

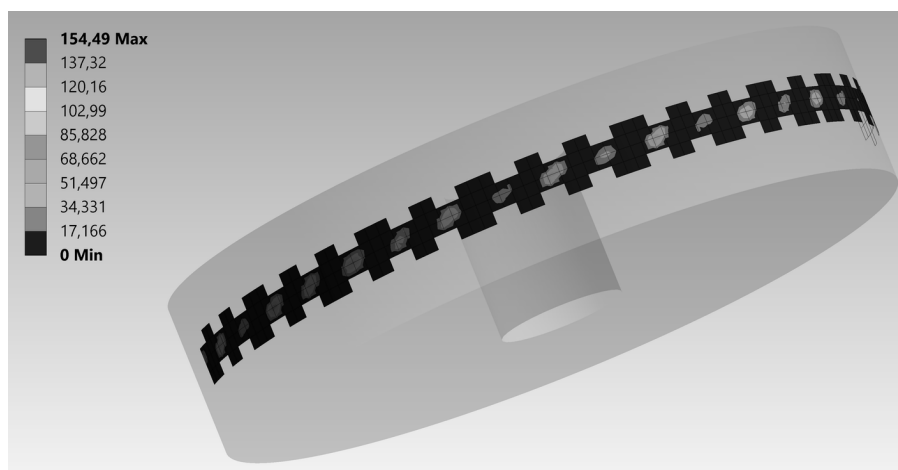


Рис. 11. Контактные давления на поверхности блока, МПа

Выводы

Приведенная в работе методика численного анализа напряженно-деформированного состояния позволяет исследовать поведение каната с линейным касанием проволок при его работе на блоке, определять контактные взаимодействия между проволоками и блоком, может использоваться как вспомогательный инструмент в технических приложениях.

Информация о параметрах контактного взаимодействия проволок в канате и с поверхностью блока позволит перейти к построению методик расчета каната на долговечность.

Библиографические ссылки

1. Глушко М. Ф. Стальные подъемные канаты. – Киев : Техника, 1966. – 327 с.
2. Талтыкин В. С. Обоснование метода повышения долговечности шахтных канатов с учетом контактного взаимодействия проволок : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2009. – 23 с.
3. Cengiz Erdonmez C. Erdem İmrak. A finite element model for independent wire rope core with double helical geometry subjected to axial loads // Indian Academy of Sciences. 2011. Vol. 36. № 6. P. 995–1008.
4. Cengiz Erdonmez C. Erdem İmrak. Advances in 3D wire rope modeling and numerical analysis // The International Journal of TRANSPORT & LOGISTICS. 2010. Vol. 10. P. 57–62.

5. Gordana M. Kastratović, Nenad D. Vidanović. Some Aspects of 3D Finite Element Modeling of Independent Wire Rope Core // FME Transactions (2011) 39, 37–40.

6. Vu Thanh Do, Durville Damien, Davies Peter. Finite element simulation of the mechanical behaviour of synthetic braided ropes and validation on a tensile test // International Journal of Solids and Structures April 2015, Vol. 58, Pages 106–116.

7. Juan Wu. The finite element modeling of spiral ropes // Int J Coal Sci Technol (2014) 1(3): 346–355.

8. Fontanari V., Monelli B. D., Degasperi F., Dallago A. Structural behaviour of steel ropes subjected to heavy thermal transients simulating fire scenarios // O.I.T.A.F. CONGRESS 2011, Cableways : safe, environmentally friendly, with success in the future. Rio de Janeiro – Brazil, October, 2011, 24–27.

9. Cengiz Erdonmez, Cevat Erdem İmrak. Numerical model for an IWRC bending over sheave problem and its finite element solution // Recent Advances in Computers, Communications, Applied Social Science and Mathematics. Barcelona, Spain, September 15–17, 2011.

10. Rakesh Sidharthan, Gnanavel B K. Numerical Analysis of Independent Wire Strand Core (IWSC) Wire Rope // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). Vol. 3. Issue 12, December-2014, 335–339.

11. Кабанов Ю. Контактные технологии в действии. – Ч. 2 // ANSYS Solutions. Инженерно-технический журнал. Русская редакция. – Осень 2007. – С. 5–10.

12. Калентьев Е. А., Тарасов В. В. Численный анализ напряженно-деформированного состояния пряди каната с линейным касанием при растяжении и кручении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3, № 4. – С. 16–28.

E. A. Kalentyev, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU

V. V. Tarasov, DSc in Engineering, Professor, Institute of Mechanics of UB RAS

Yu. V. Puzanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

Numerical Analysis of Stress-Strain State of Rope During its Work on Block

The paper presents the results of numerical analysis of the stress-strain state of the rope during its work on the block. The results are analyzed and conclusions are made about the possibility of using the developed technique in the practice of engineering calculations.

Keywords: wire rope, numerical analysis, block.

Получено: 15.08.16