

УДК 621.863

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КАНАТА,
НАВИВАЕМОГО НА БАРАБАН, МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

©Фидровская Н. Н., Ломакин А. А., Писарцов А. С.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Фідровська Наталія Миколаївна: ORCID: 0000-0002-5248-273X; nfidrovskaya@mail.ru; доктор технічних наук; професор кафедри металоріжучого обладнання і транспортних систем; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська 16, м.Харків, 61003, Україна.

Ломакін Андрій Олександрович: ORCID 0000-0001-6729-3168; delgadokh@gmail.com; лаборант кафедри практичної психології; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Писарцов Олександр Сергійович: ORCID: 0000-0003-4661-5441; alex.pisartsov@gmail.com; старший викладач кафедри металоріжучого обладнання і транспортних систем; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська 16, м.Харків, 61003, Україна.

В статье рассмотрен анализ напряженно-деформированного состояния каната, навиваемого на барабан, методом конечных элементов.

Проведен анализ 26 литературных источников зарубежных и отечественных исследователей, работы которых посвящены вопросам исследования канатов, напряженно-деформированного состояния, метода конечных элементов, моделированию и исследованию в полях программ SolidWorks и ANSYS.

В поле программы SolidWorks 2015 построены геометрические модели каната и барабана, в качестве прототипов которых были использованы канат и барабан, применявшиеся в экспериментальных исследованиях, с соблюдением их геометрических размеров и физических свойств материалов из которых они изготовлены.

В поле программы ANSYS 17 проведено исследование трехмерной модели $\frac{1}{4}$ витка каната при изгибе на сегменте оболочки барабана. А также исследование трехмерной модели при навивке 14 витков каната на барабан. При исследовании моделей были применены наименьшие элементарные фигуры при построении разбивочной сетки. Приведен график сходимости решения при расчете модели.

Сделано графическое сравнение результатов, полученных из расчетных формул данных экспериментальных исследований и данных, полученных методом конечных элементов.

Ключевые слова: витки каната; барабан; SolidWorks; ANSYS; модель; напряженно-деформированное состояние; метод конечных элементов.

Фідровська Н. М., Ломакін А. О., Писарцов О. С. «Аналіз напружено-деформованого стану каната, що навивається на барабан, методом кінцевих елементів».

У статті розглянуто аналіз напружено-деформованого стану каната, що навивається на барабан, методом кінцевих елементів.

Проведено аналіз 26 літературних джерел зарубіжних і вітчизняних дослідників, роботи яких присвячені питанням дослідження канатів, напружено-деформованого стану, методу скінченних елементів, моделювання та дослідження в полях програм SolidWorks і ANSYS.

В полі програми SolidWorks 2015 побудовані геометричні моделі каната і барабана, прототипами яких були використані канат і барабан застосовувалися в експериментальних дослідженнях, з дотриманням їх геометричних розмірів і фізичних властивостей матеріалів з яких вони виготовлені.

В полі програми ANSYS 17 проведено дослідження тривимірної моделі $\frac{1}{4}$ витка каната при вигині на сегменті оболонки барабана. А також дослідження тривимірної моделі при намотуванні 14 витків каната на барабан. При дослідженні моделей були застосовані найменші елементарні фігури при побудові розбивочної сітки. Наведено графік збіжності рішення при розрахунку моделі.

Зроблено графічне порівняння результатів, отриманих з розрахункових формул даних експериментальних досліджень і даних отриманих методом кінцевих елементів.

Ключові слова: витки каната; барабан; SolidWorks; ANSYS; модель; розбивна сітка; напружено-деформований стан; метод кінцевих елементів.

Fidrovskaya N., Lomakin A., Pisartsov A. “Analysis of stress-strain state of a steel rope wound on a drum using finite element method”.

In the article the analysis of the stress-strain state of a steel rope wound on a drum using finite element method.

The analysis of 26 literature of foreign and domestic researchers, whose work is devoted to the study of ropes, the stress-strain state, finite element method, modeling and research in SolidWorks and ANSYS software fields.

In the program SolidWorks 2015 constructed geometric model of the rope drum and, as a prototype of which was used the rope drum and applied in experimental studies, in accordance with their geometric dimensions and physical properties of the materials from which they are made.

In the program ANSYS 17 carried out a study of three-dimensional models $\frac{1}{4}$ rope coil in bending on a segment of the drum shell. As well as the study of three-dimensional model with 14 coiling coils of rope on the drum. In the study of the smallest models have been applied in the construction of elementary figures staked grid. An convergence graph of the solution in the calculation model.

It made a graphical comparison of the results obtained from the calculation formulas and data of experimental research data obtained by finite element method.

Key words: turns of rope; drum; SolidWorks; ANSYS; model; stress-strain state; finite element method.

1. Актуальность

Для исследования напряженно-деформированного состояния каната навиваемого на барабан используется широко распространенная, универсальная система инженерного анализа ANSYS. Система ANSYS базируется на решении дифференциальных уравнений методом конечных элементов (МКЭ).

Данный метод используется для термического анализа, анализа напряженно-деформированного состояния конструкции и сооружений, для решения задач электродинамики, гидродинамики и газодинамики. Кроме того МКЭ можно использовать для решения сопряженных, комплексных задач [1].

МКЭ зародился на базе методов сил и перемещений, используемых в строительной механике и механике деформируемого твердого тела [2]. В 1943 г. Рихард Курант впервые использует идеи и алгоритмы МКЭ для решения задачи о кручении стрежня [3]. Сам термин «конечный элемент» введен Р. Клафом в 1960 году [4]. Широко использоваться МКЭ стал после применения для его обоснования метода наименьших квадратов и взвешенных невязок Галёркина [5, 6].

Динаміка та міцність машин

2. Анализ литературных источников и формулировка цели

Вопрос исследования напряженно-деформированного состояния канатов с использованием различных программных средств инженерного анализа освещался российскими [7, 8] и исследователями из Турции [9-13], Китая [14-16], Бразилии [17], Германии [18, 19] и др. Однако, эти работы не отличаются необходимой общностью, кроме того в этих работах не рассмотрена проблема напряжений возникающих в проволоках каната, при навивке каната на барабан.

3. Основной материал

Для создания расчетной геометрии исследуемого объекта используется одна из распространенных в инженерной практике систем твердотельного трехмерного проектирования, SolidWorks 2015.

Для построения геометрической модели барабана в качестве прототипа воспользуемся барабаном, который был использован в экспериментальных исследованиях, с выдержанными, его геометрическими размерами.

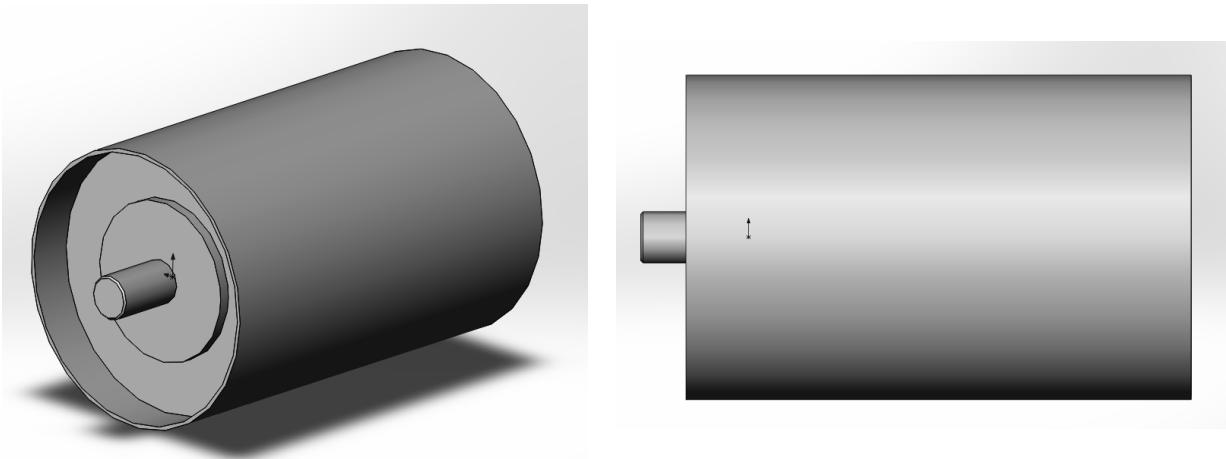


Рис. 1 – Трехмерная модель барабана в поле программы SolidWorks 2015

Для построения геометрической модели каната в качестве прототипа воспользуемся канатом, который был использован в экспериментальных исследованиях, с выдержанными, его геометрическими размерами.

Данные модели исследовались совместно в сборке, под влиянием сил создаваемых канатом навивающегося в пятнадцать витков в один слой.

Объектом исследования является с канат стальной двойной свивки типа ЛК-О конструкции 6x19(1+9+9) + 1 о.с. 6,4-ГЛ-В-Н-Р-1770. Общее количество проволок в канате – 114 шт; диаметр сердечника пряди $D_1=0,6$ мм; диаметр внутренних проволок пряди $D_2=0,28$ мм; диаметр наружных проволок пряди. $D_3=0,5$ мм; угол свивки проволок в прядь $\lambda=6^\circ$; угол свивки прядей в канат $\beta=17,2^\circ$; шаг свивки прядей в канат $H=45$ мм; диаметр каната $d=6,4$ мм.

Материалом модели каната определена конструкционная сталь Ст20 по ГОСТ 1050-88* со следующими физическими свойствами: плотность $\rho=7860$ кг/м³, модуль упругости $E = 2,10 \cdot 10^{-5}$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,26$.

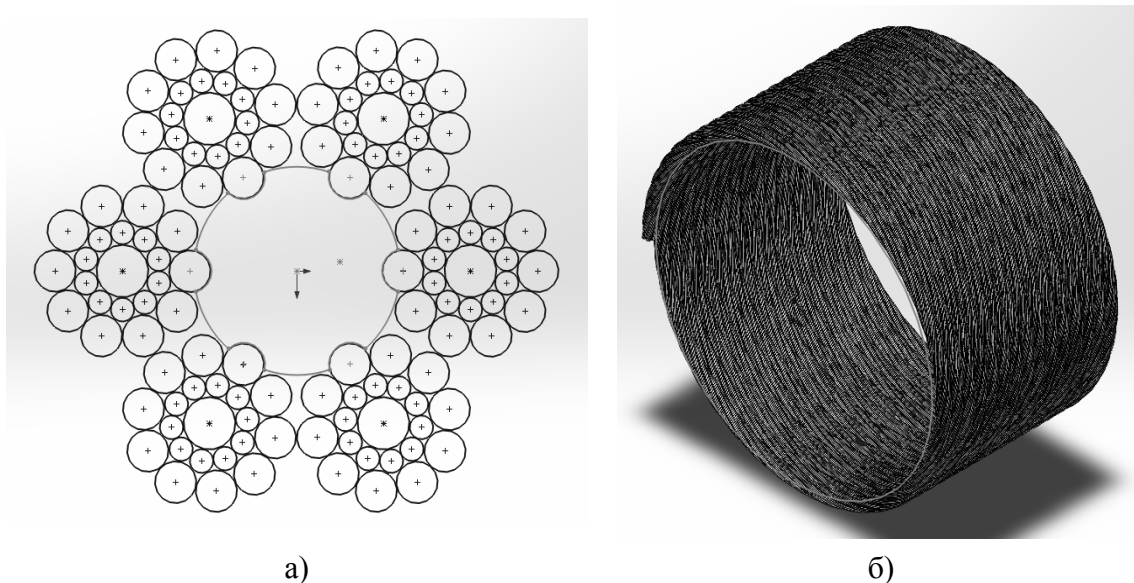


Рис. 2 – Модель досліджуваного каната: а - ескіз профіля досліджуваного каната; б - трьохмерна модель каната в полі програми SolidWorks 2015

Матеріалом моделі барабана определена сталь конструкційна углеродистая обыкновенного качества ВСт3сп со следующими физическими свойствами: плотность $\rho=7850$ кг/м³, модуль упругости $E=1,94 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,26$.

Задача расчета напряженно-деформированного состояния каната решается как задача контактного взаимодействия с учетом трения проволок, находящихся в напряженном состоянии.

Целью расчета является определение следующих характеристик напряженно-деформированного состояния каната: продольного перемещения, интенсивности напряжений, контактных давлений в зонах взаимодействия и изменение температуры.

На рис. 3 приведена общая схема проведения исследования моделей, на примере упрощенных геометрически схожих образцов.

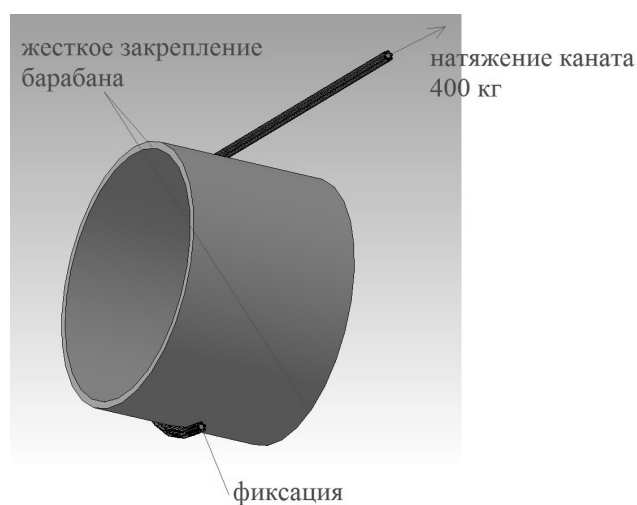


Рис. 3 - Схема проведения исследования моделей, на примере упрощенных геометрически схожих образцов

Создание разбивочной сетки, в значительной степени, определяет точность дальнейших исследований. Чем меньше элементарная фигура исследуемого элемента, тем больше точность полученных результатов [20-24].

Детально исследуем модель для сравнения с результатами, полученными в эксперименте и теории (рис. 5, 6).

По данным исследований построим графики анализа результатов полученных в эксперименте [25], теории [26] и методом конечных

элементов. График включает в себя 3 кривые в соответствии с исследуемыми методами.

Динаміка та міцність машин

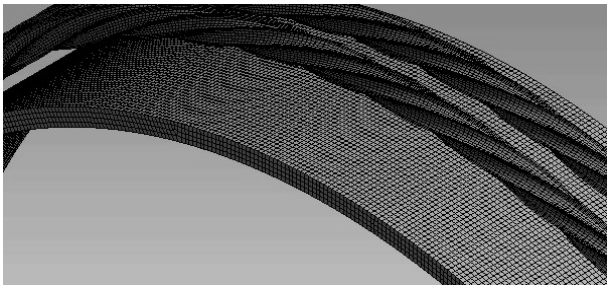


Рис. 4 - Разбивочная сетка исследуемых образцов

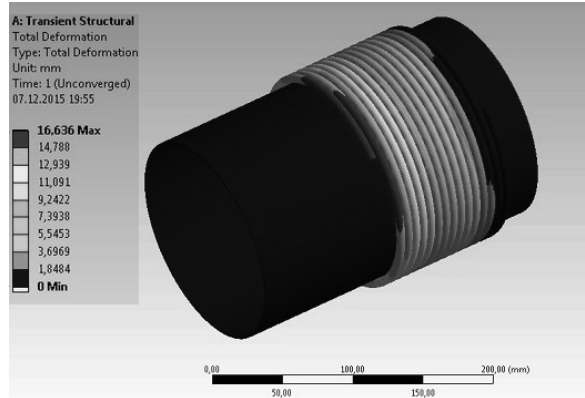
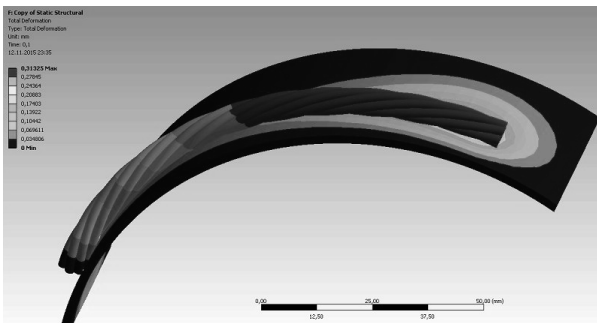
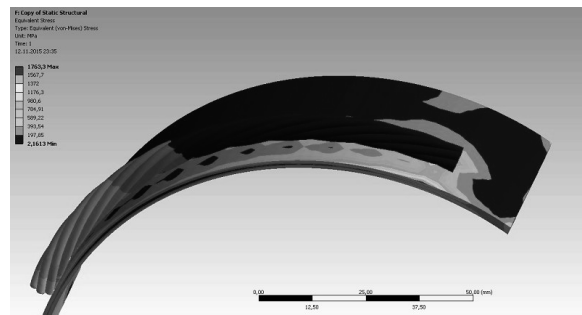


Рис. 6 - Исследование трехмерной модели при навивке 14 витков каната на барабан в поле программы ANSYS 17



а)



б)

Рис. 5 – Исследование трехмерной модели ¼ витка каната в поле программы ANSYS 17: а – исследование деформаций; б - исследование напряженности

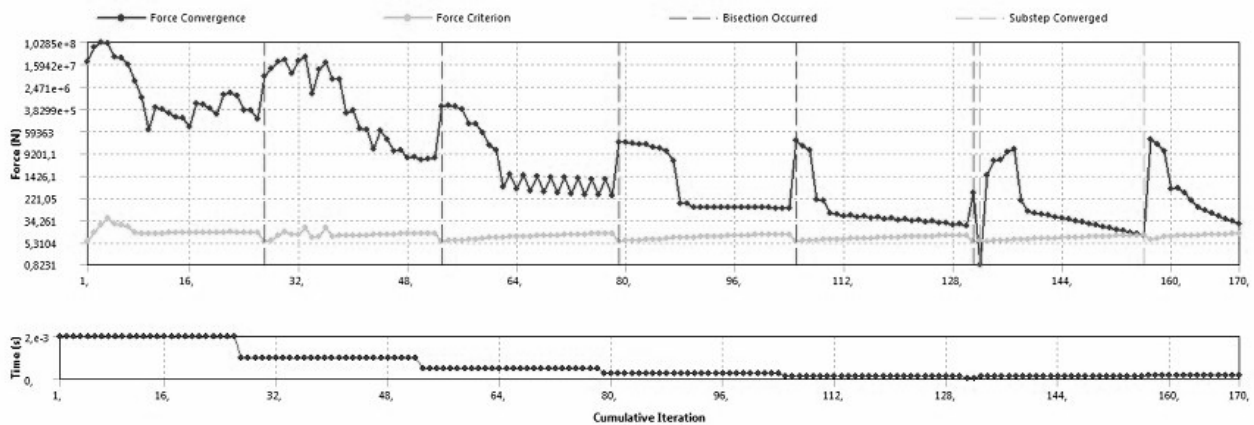


Рис. 7 – График сходимости решения при расчете модели в поле программы ANSYS 17

Выводы

Приведенное сравнение результатов теории, эксперимента и моделирования показало что, расходимость результатов составило не более 7 % в самых расходящихся частях кривых. Средняя расходимость результатов не превышает 5% (рис. 8).

Кривая МКЭ включает интерполяцию данных по максимальным значениям в каждом этапе эксперимента и аппроксимацию результатов между этапами эксперимента. Кривая эксперимента отображает усредненные данные, полученные из 50 циклов подъема и опускания груза.

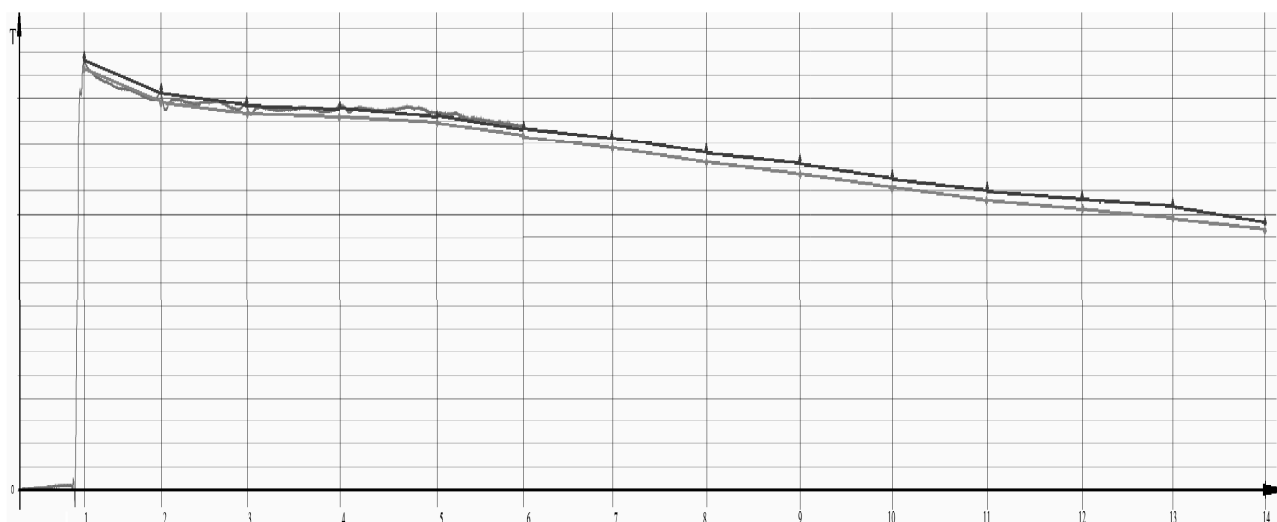


Рис. 8 – Сравнение результатов полученных различными способами:
 - усреднённые данные полученные экспериментальным путём
 - данные полученные теоретическим путём
 - данные полученные методом конечных элементов

Список использованных источников:

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике : пер. с англ. / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 541 с.
2. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы : пер. с англ. / Р. Галлагер. – М. : Мир, 1984. – 428 с.
3. Courant R. Variational Method for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibration / R. Courant // *Bulletin of the American Mathematical Society*. – 1943. – № 49. – P. 1-43.
4. Clough R. W. The finite element method in plane stress analysis / R. W. Clough, J. Struct // *Proceedings of the ASCE 2nd Conference on Electronic Computation, American Society of Civil Engineers, Pittsburg, Sept. 1960. – Pittsburg, 1960. – P. 345-378.*
5. Норри Д. Введение в метод конечных элементов : пер. с англ. / Д. Норри, Ж. де Фриз. – М. : Мир, 1981. – 304 с.
6. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред : пер. с англ. / Дж. Оден. – М. : Мир, 1976. – 464 с.
7. Боровков А. И. Конечно-элементное вычисление эффективных механических характеристик стального каната на основе моделирования микроструктуры и множественного контактного взаимодействия / А. И. Боровков, Д. В. Клиштин // *Фундаментальные исследования в технических университетах*. – СПб : Изд-во СПбГПУ, 2005. – С. 232-233.
8. Конечно-элементное моделирование множественного 3-D контактного взаимодействия и исследование механических свойств стального каната специального назначения. КЭ LS-DYNA-моделирование обрыва стального троса с последующими "раскруткой и распушением" // *FEA.RU | CompMechLab*. – Режим доступа : <http://fea.ru/project/70> (дата обращения 24.05.2016).
9. Erdonmez C. Characterizing the finite element analysis of nested helical geometry and test procedure for wire ropes / C. Erdonmez, O. Salman, C. Imrak // *IV European Conference on Computational Mechanics Palais des Congres, Paris, France, May 16-21, 2010. – Paris, 2010.*
10. Erdonmez C. Modeling and numerical analysis of the wire strand / C. Erdonmez, Erdem C. Imrak // *J. of Naval Science and Engineering*. – 2009. – V. 5, N. 1, – P. 30-38.
11. Erdonmez C. Modeling Techniques of Nested Helical Structure Based Geometry for Numerical Analysis / C. Erdonmez, Erdem C. Imrak // *Strojnicki vestnik - Journal of Mechanical Engineering*. – 2011. – № 57(2011)4. – P. 283-292.
12. Imrak C. E. On the problem of wire rope model generation with axial loading / Imrak C. Erdem, C. Erdonmez // *Mathematical and Computational Applications*. – 2010. – Vol. 15, No. 2. – P. 259-268
13. Erdönmez C. Advances in 3D Wire Rope Modeling and Numerical Analysis / C. Erdonmez, Erdem C. Imrak // *The International Journal of Transport & Logistics*. – 2010. – Vol. 10. – P. 57-61.
14. Sun J.-F. Elasto-plastic contact problem of laying wire rope using FE analysis / J.-F. Sun, G.-L. Wang, H.-O. Zhang // *Int J Adv Manuf Technol*. – 2005. – № 26. – P. 17-22.
15. Sun J.-F. FE analysis of contact problem for laying wire rope / J.-F. Sun, G.-L. Wang, H.-O. Zhang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – № 202. – P. 170-178.
16. Sun J.-F. FE analysis on the laying process of wire rope based on parametric design // J.-F. Sun, G.-L. Wang, Z. Haiou // *Wire Journal International*. – 2005. – № 38(6). – P. 60-64.
17. Jose R. Numerical Analysis of Wire Ropes Considering Coupled Extensional and Torsional Behaviour / R. Jose, Q. Marcos, B. Gilberto, M. Lea, M. Marcio, C. Luis // *Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference Stavanger, Norway, June 17-22, 2010. – Norway. – 2010. – P. 281-287.*
18. Leng M. Parametrische Modellierung eines einlagigen Rundlitzenseils mit Kunststoffmantel / M. Leng // *Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal*. – 2010. – № 35. – P. 83-88.
19. Ziegler S. ANSYS auf Draht. Erstmaliger Einsatz der FEM in der Seiltechnik / S. Ziegler // *Infoplaner FEM: Software Schulung Entwicklung Berechnung im Auftrag*. – 2004. – № 1. – P. 24-25.
20. Alawadhi E. M. Finite Element Simulations Using ANSYS / E. M. Alawadhi. – NY : RC Press, Taylor & Francis Group, 2010. — 408 p.

Динаміка та міцність машин

21. Bucalem M. L. *The Mechanics of Solids and Structures - Hierarchical Modeling and the Finite Element Solution* / M. L. Bucalem, K.-J. Bathe. – Berlin, Heidelberg : Springer, 2011. – 612 p.
22. Dill E. H. *The Finite Element Method for Mechanics of Solids with ANSYS Applications* / E. H. Dill. – Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. — 482 p.
23. Lee H.-H. *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 12* / H.-H. Lee. – Taiwan : Schroff Development Corporation, 2010. – 586 p.
24. Бруйка В. А. *Инженерный анализ в ANSYS Workbench : учеб. пособие* / В. А. Бруйка, В. Т. Фокин, Я. В. Кураева. — Самара, 2013. — 149 с.
25. Ломакин А. А. *Изменение напряжений в витках каната при навивке на барабан* / А. А. Ломакин // *Машинобудування : зб. наук. праць / Укр. інж.-пед. акад.* – Харків, 2014. – № 13. – С. 24-29.
26. Фидровская Н. Н. *Давление витков каната на оболочку барабана* / Н. Н. Фидровская, А. А. Ломакин // *Машинобудування : зб. наук. праць / Укр. інж.-пед. акад.* – Харків, 2014. – № 14. – С. 44-53.

References

1. Zenkevich, O 1975, *Metod konechnykh elementov v tekhnike*, Mir, Moskva.
2. Gallager, R 1984, *Metod konechnykh elementov. Osnovy*, Mir, Moskva.
3. Courant, R 1943, 'Variational Method for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibration', *Bulletin of the American Mathematical Society*, no. 49, pp. 1-43.
4. Clough, R 1960, 'The finite element method in plane stress analysis', *Proceedings of the ASCE 2nd Conference on Electronic Computation, September*, American Society of Civil Engineers, Pittsburg, pp. 345-378.
5. Norri, D & De Friz, Zh 1981, *Vvedeniye v metod konechnykh elementov*, Mir, Moskva.
6. Oden, Dzh 1976, *Konechnyye elementy v nelineynoy mekhanike sploshnykh sred*, Mir, Moskva.
7. Borovkov, A & Klimshin, D 2005, 'Konechno-elementnoye vychisleniye effektivnykh mekhanicheskikh kharakteristik stalnogo kanata na osnove modelirovaniya mikrostruktury i mnozhestvennogo kontaktnogo vzaimodeystviya', *Fundamentalnyye issledovaniya v tekhnicheskikh universitetakh*, pp. 232-233.
8. Konechno-elementnoye modelirovaniye mnozhestvennogo 3-D kontaktnogo vzaimodeystviya i issledovaniye mekhanicheskikh svoystv stalnogo kanata spetsialnogo naznacheniya. KE LS-DYNA-modelirovaniye obryva stalnogo trosas s posleduyushchimi "raskrutkoy i raspusheniem" n. d., *Inzhiniringovyy tsentr "Tsentri kompyuternogo inzhiniringa" (CompMechLab®) Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta Petra Velikogo*, viewed 24 May 2016, <<http://fea.ru/project/70>>.
9. Erdonmez, C, Salman, O & Imrak, C 2010, 'Characterizing the finite element analysis of nested helical geometry and test procedure for wire ropes', *Proceedings of the IV European Conference on Computational Mechanics Palais des Congres*, Computational Mechanics Palais des Congres, 16-21 May, Paris, France.
10. Erdonmez, C & Imrak, C 2009, 'Modeling and numerical analysis of the wire strand', *Journal of Naval Science and Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 30-38.
11. Erdonmez, C & Imrak, C 2011, 'Modeling Techniques of Nested Helical Structure Based Geometry for Numerical Analysis', *Strojniski vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, no. 57(2011)4, pp. 283-292, doi:10.5545/sv-jme.2009.006.
12. Imrak, C & Erdonmez, C 2010, 'On the problem of wire rope model generation with axial loading', *Mathematical and Computational Applications*, vol. 15, no. 2, pp. 259-268.
13. Erdonmez, C & Imrak, C 2010, 'Advances in 3D Wire Rope Modeling and Numerical Analysis', *The International Journal of Transport & Logistics*, vol. 10, pp. 57-61.
14. Sun, J, Wang, G & Zhang, H 2005, 'Elasto-plastic contact problem of laying wire rope using FE analysis', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 26, iss. 1, pp. 17-22. doi:10.1007/s00170-004-2120-9.
15. Sun, J, Wang, G & Zhang, H 2008, 'FE analysis of contact problem for laying wire rope', *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 202, pp. 170-178.
16. Sun, J, Wang, G & Zhang, H 2005, 'FE analysis on the laying process of wire rope based on parametric design', *Wire Journal International*, no. 38(6), pp. 60-64.
17. Jose, R, Marcos, Q, Gilberto, B, Lea, M, Marcio, M & Luis, C 2010, 'Numerical Analysis of Wire Ropes Considering Coupled Extensional and Torsional Behaviour', *Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, International Society of Offshore and Polar Engineers, Stavanger, Norway, 17-22 June, pp. 281 -287.
18. Leng, M 2010, 'Parametrische Modellierung eines einlagigen Rundlitzenseils mit Kunststoffmantel', *Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal*, no. 35, pp. 83-88.
19. Ziegler, S 2004, 'ANSYS auf Draht. Erstmaliger Einsatz der FEM in der Seiltechnik', *Infoplaner FEM: Software Schulung Entwicklung Berechnung im Auftrag*, no. 1, pp. 24-25.
20. Alawadhi, E 2010, *Finite Element Simulations Using ANSYS*, RC Press, Taylor & Francis Group, New York.
21. Bucalem, M & Bathe, K.-J 2011, *The Mechanics of Solids and Structures – Hierarchical Modeling and the Finite Element Solution*, Springer, Berlin, Heidelberg.
22. Dill, E 2011, *The Finite Element Method for Mechanics of Solids with ANSYS Applications*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
23. Lee, H 2010, *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 12*, Schroff Development Corporation, Taiwan.
24. Bruyaka, V, Fokin, V & Kuraeva, Ya 2013, *Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench*, Samarskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet, Samara.
25. Lomakin, A 2014, 'Tension changes in a steel rope turns during winding on the drum', *Mashynobuduvannia*, iss. 13, pp. 24-29.
26. Fidrovskaya, N & Lomakin, A 2014, 'Pressure of turn's wire rope on the drum shell', *Mashynobuduvannia*, iss. 14, pp. 44-53.

Стаття надійшла до редакції 12 травня 2016 р.