

## Расчет машиностроительных конструкций

### МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСОЛЬНОГО КАБЕЛЕДЕРЖАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.А. ФРОЛОВ\*, канд. техн. наук, доц.,  
Е.Ю. ВЕРХОВ\*, канд. техн. наук, доц.,  
Ю.А. МОРОЗОВ\*, канд. техн. наук, доц.,  
М.А. ОРЛОВ\*\*, руководитель лаборатории преформинга, аспирант МАМИ,  
М.С. МИХАЙЛОВ\*\*, студент

\*Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)  
111250, Москва, Б. Семеновская, 38, т. 8(916)877-66-96; [akafest@mail.ru](mailto:akafest@mail.ru)

\*\*Межотраслевой инженеринговый центр композиционных материалов  
МГТУ им. Баумана

С использованием комплекса программ «Ansys» рассматриваются результаты расчетов напряженно-деформированного состояния чугунных кабеледержателей (консолей) типа ККЧ, применяемых при прокладке кабелей в проходящих колодцах. Теоретически подтверждена возможность уменьшения ряда характерных размеров (толщина ложа, толщина и форма ребра жесткости) при сохранении стандартных прочностных характеристик детали, что позволяет существенно уменьшить массу изделия, а, следовательно, и себестоимость их изготовления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кабеледержатель; метод конечных элементов; конечно-элементная сетка; программный комплекс МКЭ; оптимизация размеров.

В работе [1], посвященной экспериментальному исследованию нагруженности кабеледержателей (консолей) типа ККЧ, используемых в качестве опор при прокладке кабелей в проходящих колодцах, было получено, что применяемые в настоящее время чугунные консоли имеют чрезмерно большие размеры (толщину ребра и ложа, а также форму ребра жесткости). Все это приводит к излишним затратам материала и, как следствие, завышенной стоимости изделий. Было отмечено, что с использованием теоретических методов расчета нагружения консоли имеется возможность подобрать указанные выше размеры сечений, позволяющие существенно уменьшить их массу при сохранении прочностных параметров, оговоренных в нормативных документах. Для пояснения сути проблемы коротко напомним схему нагружения и условия эксплуатации рассматриваемых деталей.



Рис. 1. Общий вид одно-, двух- и трехрубчевых консолей

При прокладке кабелей в типовых проходящих колодцах их внутренние стенки оснащаются кронштейнами. К кронштейнам при помощи специальных консольных болтов крепятся чугунные (СЧ-20) кабеледержатели, имеющие в

зависимости от необходимости от 1-го до 6-ти ручьев – лож (на рис. 1 показан общий вид одно-, двух- и трехручьевого консолей, а на рис. 2 – крепление консоли к кронштейну с помощью специального консольного болта). Консоли с одной стороны имеют ребро жесткости, позволяющее существенно снизить риск разрушения при приложении вертикальных нагрузок [2-5].

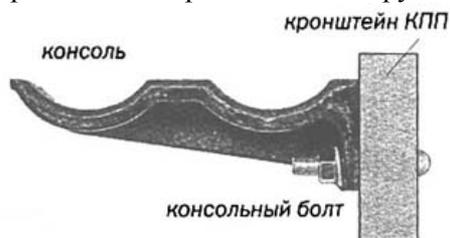


Рис. 2. Крепление консоли к кронштейну:

1 – консоль; 2 – консольный болт; 3 – кронштейн КПП

При приемных испытаниях, закрепленная на кронштейне консоль, согласно действующим нормативам, должна выдерживать нагрузку в 1570 Н (160 кг), приложенную к крайнему ручью. Эксперименты показали, что даже самые нагруженные шестиручьевые консоли (они имеют наибольшие напряжения в опасных сечениях), не разрушаются и имеют большой запас по прикладываемой нагрузке. Таким образом, имеется возможность уменьшить основные параметры, влияющие на прочность детали, а именно: толщину ребра жесткости и ложа, а также изменить форму ребра жесткости.

Решение этой задачи было проведено с использованием программного комплекса по методу конечных элементов [6].

В качестве базовой детали использовалась двухручьева консоль, как наиболее применяемая. Ее конфигурация была смоделирована с помощью программы Siemens NX9 Unigraphics. Прежде всего, была упрощена геометрическая форма консоли за счет устранения некоторых элементов конструкции, которые, с нашей точки зрения, не влияют на полученные далее результаты, а именно, из модели были исключены все технологические фаски, скругления, литейные уклоны и т.д. Данная аппроксимация позволила построить качественную конечно-элементную (КЭ) сетку, а также упростить и минимизировать время расчета в дальнейшем [7, 8].

Для генерации сетки были использованы методы протяжки и Body Sizing [9-11]. С помощью метода протяжки на одной из граней была сформирована 2D сетка, протянутая затем вдоль тела с помощью шага, тем самым формируя 3D сетку. Body Sizing формирует сетку, калибруя рассматриваемое тело консоли. Благодаря этим методам построения была сгенерирована упорядоченная структурированная КЭ сетка с регулярным расположением элементов, с минимальным количеством диспропорциональных включений и размером элемента 5 мм, что позволило провести в дальнейшем достаточно точный расчет (рис. 3).

Расчеты напряженно-деформированного состояния детали под действием приложенной изгибающей нагрузки проводились с применением конечно-элементного пакета ANSYS 16.1. При этом были заданы граничные условия и ограничения (жесткая заделка на торцевой крепежной поверхности и сосредоточенная на первом ручье нагрузка 1570 Н (160 кг)). В качестве материала задавались свойства серого чугуна марки СЧ-20 (предел прочности 200 МПа согласно ГОСТ 1412-85).

На следующем этапе были проведены расчеты напряженно- деформированного состояния консоли, при этом варьировались значения двух параметров

(толщины ребра жесткости и толщины ложа) в соответствии с приведенными в табл.1 данными, форма ребра жесткости сохранялась неизменной и соответствующей исходному состоянию.

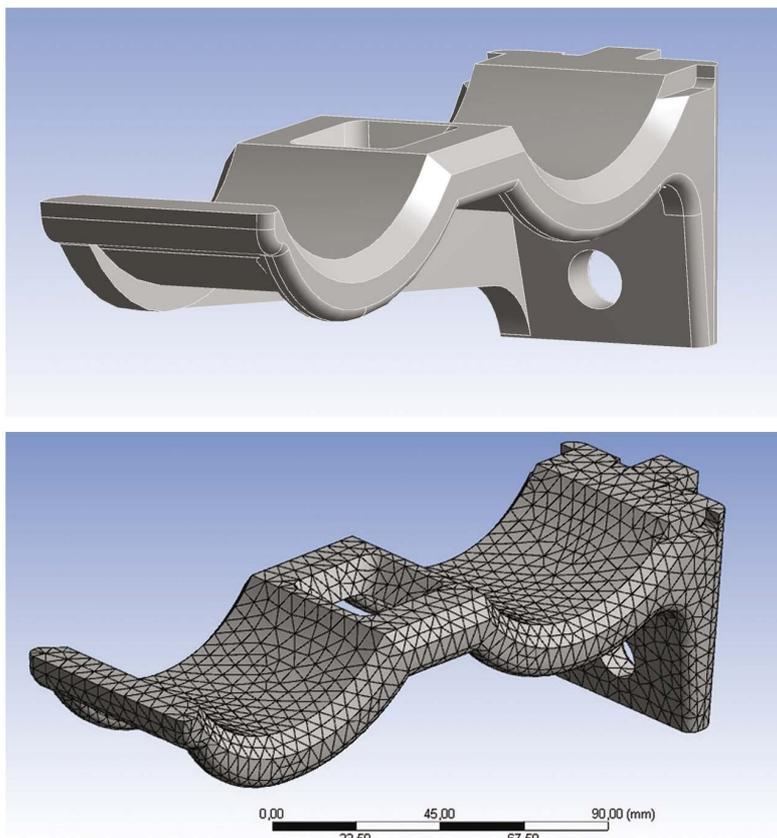


Рис. 3. Вид консоли и сгенерированная на ней конечно-элементная сетка

Таблица 1. Значения параметров для проведения расчетов напряженно-деформированного состояния консоли

№ расчета	Материал консоли	Нагрузка, Н	Толщина	
			ребро, мм	ложе, мм
1	СЧ-20	1570	8,0	8,0
2	СЧ-20	1570	6,0	8,0
3	СЧ-20	1570	4,0	8,0
4	СЧ-20	1570	6,0	6,0
5	СЧ-20	1570	6,0	4,0
6	СЧ-20	1570	4,0	6,0
7	СЧ-20	1570	4,0	4,0

На рис. 4; 5 приведены картины напряженного и деформированного состояния для двух резко различающихся вариантов расчетов.

Проведенные расчеты показали следующие основные тенденции.

1. Минимальные значения деформаций находятся в зоне у заделки, затем они постепенно возрастают и максимальных значений достигают в зоне крайнего ручья со стороны, противоположной ребру жесткости.

2. Напряжения имеют минимальные значения в крайнем ручье, затем постепенно возрастают и достигают максимальных значений в центральной зоне

внутреннего ручья, а затем по мере приближения к заделке они снова уменьшаются.

3. Численные значения деформаций малы и как ограничивающий фактор в дальнейшем могут не рассматриваться.

4. С точки зрения прочности, а это – основной параметр по которому определяется пригодность консоли, наиболее опасными являются центральные сечения ручья, расположенного у заделки.

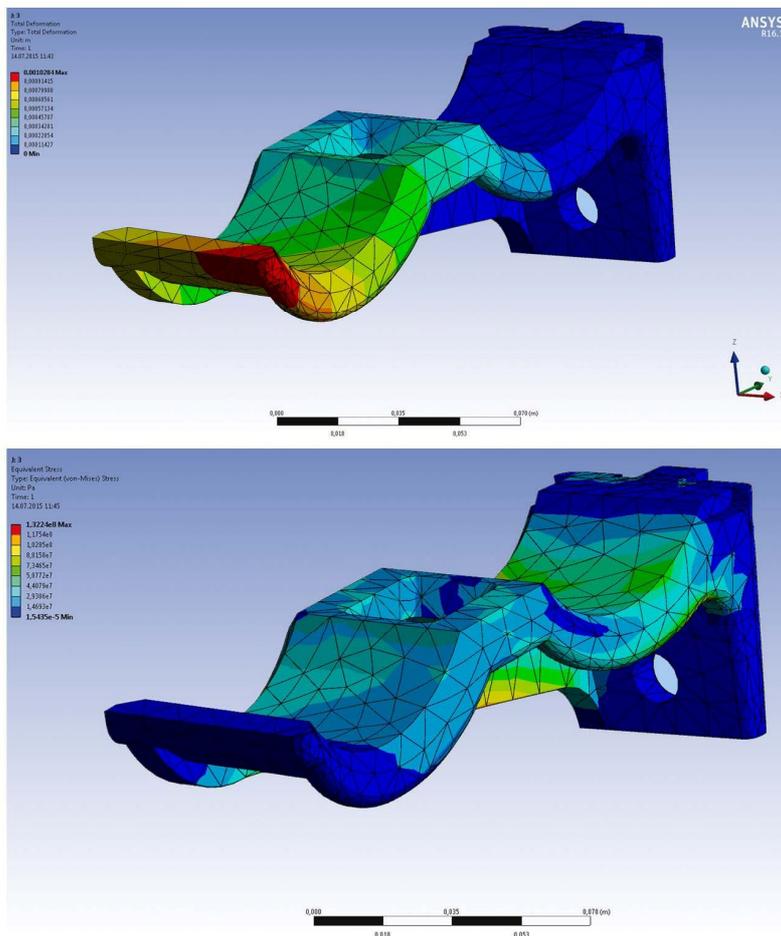


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние двухручьевой консоли ( $P = 1570 \text{ Н}$ ,  $\delta = 8 \text{ мм}$ ,  $\lambda = 8 \text{ мм}$ )

В табл. 2 приведены основные результаты проведенных расчетов, по которым можно сделать следующие выводы.

1. Для двухручьевой консоли найдены минимально возможные значения толщин ребра жесткости и ложа ( $\delta = 4 \text{ мм}$ ,  $\lambda = 4 \text{ мм}$ ), при которых напряжения в опасном сечении консоли достигают предела прочности для чугуна марки СЧ-20, равного 200 МПа.

2. Очевидно, что дальнейшее уменьшение толщин ребра жесткости и ложа нежелательно, так как это может привести к превышению действующих напряжений над прочностными свойствами чугуна СЧ-20.

3. Уменьшение массы двухручьевой консоли в лучшем из просчитанных вариантов составляет 0,3 кг или 23,4%.

4. По нашей оценке уменьшение массы для трех-, четырех- и шестиручьевых консолей будет еще более значительным, что однако требует проведения дополнительных расчетов [12].

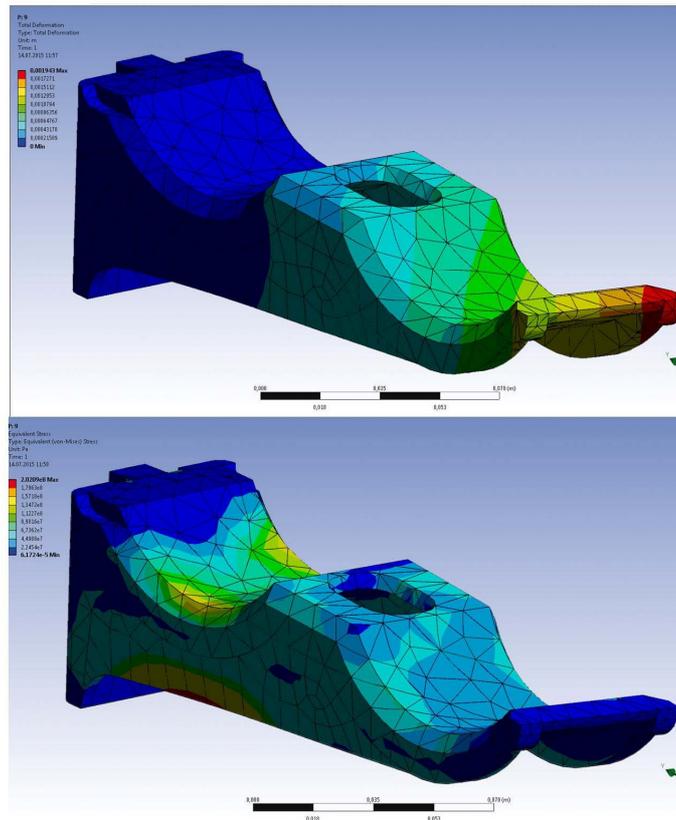


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние двухручьевой консоли ( $P = 1570 \text{ Н}$ ,  $\delta = 4 \text{ мм}$ ,  $\lambda = 4 \text{ мм}$ )

Таблица 2. Результаты расчетов двухместной консоли (чугун марки СЧ-20, нагрузка 1570 Н)

№ расч.	Нагрузка, Н	Особенность конструкции		$\epsilon_{\max}$ , мм	$\sigma_{\max}$ , МПа	m, кг	$\Delta m$ , кг
		ребро, мм	ложе, мм				
1	1570	8,0	8,0	0,91	132	1,3075	0
2	1570	6,0	8,0	1,17	148	1,2689	0,0386
3	1570	4,0	8,0	1,37	179	1,2324	0,0751
4	1570	6,0	6,0	1,37	152	1,1558	0,1517
5	1570	6,0	4,0	1,66	171	1,0378	0,2697
6	1570	4,0	6,0	1,61	186	1,1194	0,1881
7	1570	4,0	4,0	1,94	202	1,0013	0,3062

В заключении укажем, что основные направления дальнейших исследований по данной тематике с нашей точки зрения должны заключаться в следующем.

1. Проведение аналогичных расчетов с целью определения возможностей уменьшения массы для трех-, четырех- и шестиручьевых консолей.

2. Проведение подтверждающих экспериментальных исследований, аналогичных опубликованным в работе [1] для консолей с измененными геометрическими параметрами.

3. Учитывая, что применяемые в настоящее время кабели имеют значительно меньшую массу, чем ранее – внесение обоснованных изменений в технические условия на консоли в сторону уменьшения предельных нагрузок при их приемке.

4. На основе полученных результатов переход при изготовлении консолей к новым материалам (пластикам, композитам) с целью повышения их эксплуатационных свойств, существенного снижения массы и уменьшении стоимости.

Л и т е р а т у р а

1. Фролов А.А., Верхов Е.Ю., Морозов Ю.А. Экспериментальное исследование напряженного состояния конструкции консольного кабеледержателя // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2015. – Вып. 4. – С. 71-75.

2. Консоли [электронный ресурс] / ЗАО «Связьстройдеталь». Каталог. – Электрон. дан. (1 файл). – М.: ЗАО «Связьстройдеталь», 2014. – Режим доступа: <http://www.ssd.ru/catalog/tile.php?ID=4172>, свободный. – Загл. с экрана.

3. Хруничева Т.В. Детали машин. Типовые расчеты на прочность. – М.: Инфра-М, 2009. – 224 с.

4. Буланов Э.А., Шинкин В.Н. Механика. Вводный курс. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 172 с.

5. Шинкин В.Н. Механика сплошных сред для металлургов. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2014. – 628 с.

6. Tamarozzi T., Heirman G.H.K., Desmet W. An on-line time dependent parametric model order reduction scheme with focus on dynamic stress recovery// Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. –1 January 2014. – Vol. 268. – P. 336-358.

7. Коробко А.В., Прокуров М.Ю., Чернышев А.А. Развитие технической теории расчета пластинчатых конструкций на основе методов геометрического моделирования их формы // Строительство и реконструкция. – 2015. – № 1. – С. 17-21.

8. Packo P., Bielak T., Spencer A.B., Uhl T., Staszewski W.J., Worden K., Barszcz T., Russek P., Wiatr K. Numerical simulations of elastic wave propagation using graphical processing units-Comparative study of high-performance computing capabilities// Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 15 June 2015. – Vol. 290. – P. 98-126.

9. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А. и др. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учебное пособие. – Самара: Самар. Гос. Техн. ун-т, 2010. – 271 с.

10. Морозов Ю.А., Верхов Е.Ю. Компьютерное моделирование: учебное пособие. – М.: МГОУ, 2011. – 81 с.

11. Мусаев В.К., Дикова Е.В., Акатьев С.В., Стародубцев В.В., Самойлов С.Н. Оценка точности результатов численного моделирования при решении задач о распространении импульсного воздействия в виде треугольника в упругой полуплоскости // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. -2015. – №6. – С. 8-12.

12. Морозов Ю.А., Верхов Е.Ю., Шульгин А.В. Моделирование процессов и объектов в металлургии: учебное пособие. – М.: МГОУ, 2010. – 121 с.

R e f e r e n c e s

1.Frolov, A.A., Verkhov, E.Yu., Morozov, Yu.A. (2015). Experimental study of a stress state of the structure of the console cable holder, *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, No. 4, pp. 71-75.

2.Konsoli [elektronnyy resurs], ZAO «Svyaz'stroydetal'», Katalog, Elektron. dan. (1 fayl), Moscow: ZAO «Svyaz'stroydetal'», 2014, Rezhim dostupa: <http://www.ssd.ru/catalog/tile.php?ID=4172>, svobodniy (Zagl. s ekrana).

3.Khrunichева T.V. *Detali mashin. Tipovye raschety na prochnost'* [Machine parts. Typical strength calculations]. Moscow: Infra-M, 2009. 224 p.

4.Bulanov, E.A., Shinkin, V.N. (2013). *Mekhanika. Vvodnyy kurs* [Mechanics. Introductory course]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 172 p.

5.Shinkin, V.N. (2014). *Mekhanika Sploshnykh Sred dlya Metallurgov* [Continuum Mechanics for metallurgists], Moscow: Izd. Dom MISiS, 628 p.

6.Tamarozzi, T., Heirman, G.H.K., Desmet, W. (2014). An on-line time dependent parametric model order reduction scheme with focus on dynamic stress recovery, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 268, 1 January 2014, pp. 336-358.

7.Korobko, A.V., Prokurov, M.Yu., Chernyaev, A.A. (2015). Development of the technical theory of calculation of plate structures based on the methods of geometrical modeling of their shape, *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*, Orel, No. 1, pp. 17-21.

8.Packo, P., Bielak, T., Spencer, A.B., Uhl, T., Staszewski, W.J., Worden, K., Barszcz, T., Russek, P., Wiatr, K. (2015). Numerical simulations of elastic wave propagation using graphical processing units-Comparative study of high-performance computing capabilities, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 290, 15 June 2015, pp. 98-126.

9. Bruyaka, V.A., Fokin, V.G., Soldusova, E.A. et al. (2010). *Inzhenernyy Analiz v ANSYS Workbench: Uchebnoe posobie* [Engineering analysis in ANSYS Workbench], Samara: Samar. Gos. Tekhn. Un-t, 271 p.

10. Morozov, Yu.A., Verkhov, E.Yu. (2011). *Komp'yuternoe Modelirovanie: uchebnoe posobie* [Computer simulation], Moscow: MGOU, 81 p.

11. Musaev, V.K., Dikova, E.V., Akat'ev, S.V., Starodubtsev, V.V., Samoylov, S.N. (2015). Evaluation of the accuracy of the results of numerical modeling in solving the problem of impulse excitation in the form of a triangle in an elastic half-plane, *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, № 6, pp. 8-12.

12. Morozov, Yu.A., Verkhov, E.Yu., Shul'gin, A.V. (2010). *Modelirovanie Protseessov i Ob'ektov v Metallurgii* [Modelling of Processes and Facilities in Industry]. Moscow: MGOU, 121 p.

#### **SIMULATION OF STRESS-STRAIN STATE OF CONSOLE CABLE HOLDER BY FINITE ELEMENTS METHOD**

A.A. Frolov, E.Yu. Verkhov, Yu.A. Morozov, M.A. Orlov, M.S. Mikhaylov  
*Moscow State Machine-Building University (MAMI), Moscow*

The results of calculations of the stress-strain state of iron Cable holder (console) type of CCHI used in the cabling to pass wells with the use of a complex of programs «Ansys». Theoretically, the possibility of reducing the number of characteristic size (thickness of the bed, the thickness and shape of ribs) while retaining the strength characteristics of standard parts, which can significantly reduce the weight of the product, and therefore the cost of manufacture is confirmed.

KEY WORDS: Cable holder; finite element method; finite element mesh; FEM software package; optimization sizes.

