

УДК 629.7.022 : 681.5.015.23

doi:10.18720/SPBPU/2/id-167

Г.Б. Крыжевич<sup>1,2</sup>

## КОНСТРУИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ НЕСУЩИХ СВЯЗЕЙ БЛОК-МОДУЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ



Геннадий Брониславович Крыжевич,

<sup>1</sup>Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова. Россия, Санкт-Петербург,

<sup>2</sup>Крыловский государственный научный центр. Россия, Санкт-Петербург.

Тел.: (812)415-4674, E-mail: kryzhevich\_gb@voenmeh.ru

### Аннотация

В работе рассмотрены вопросы численного моделирования напряжённо-деформированного состояния конструкций батареи топливных элементов (БТЭ) универсального функционального модуля (УФМ) водородной энергетической установки (электрохимического генератора) и оптимизации распределения материала в деталях конструкции с учётом нагрузок и креплений. Расчёты НДС конструкций БТЭ выполнялись с помощью метода конечных элементов (МКЭ), а топологическая оптимизация конструкций – с помощью метода SIMP. Результаты показали, что использование топологической оптимизации при конструировании позволяет снизить массу основных элементов БТЭ примерно на 27% (по сравнению с исходной батареей, спроектированной традиционными методами) и снизить в них уровень напряжений ориентировочно на 25%, обеспечив при этом существенное повышение надёжности и эксплуатационной безопасности БТЭ. На основе полученных результатов сформулированы основные положения рациональной технологии сборки БТЭ.

*Ключевые слова:* электрохимический генератор, топливный элемент, силовые элементы батареи топливных элементов, способ конструирования, оптимизация конструкции, технология сборки топливных элементов.

## Введение

В настоящее время активно развивается новая область водородной энергетики - электрохимические генераторы на основе батарей топливных элементов (БТЭ), работающих на водородном топливе (рис. 1) [1, 2]. Батарея состоит из топливных элементов (биполярных холодильных камер – БХК) и двух торцевых крышек (рис. 2) со шпильками, соединяющими всё в единую сборку.

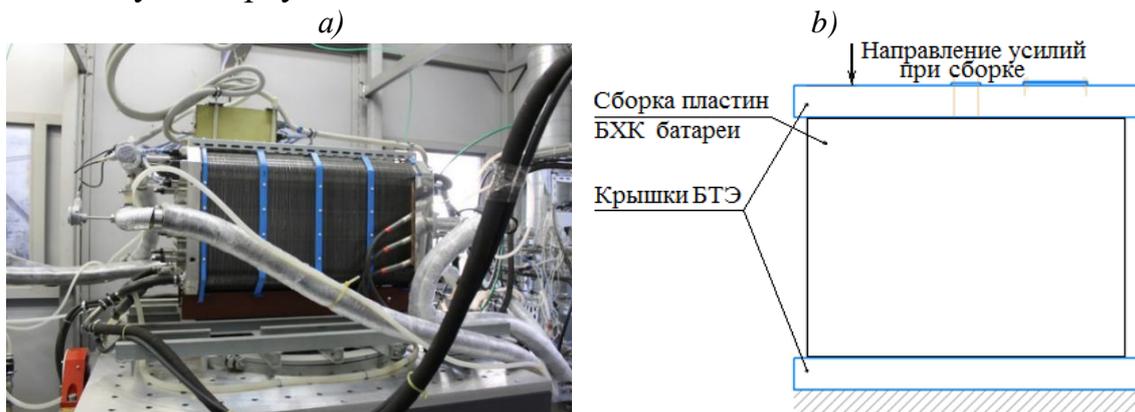


Рис. 1. БТЭ (а), разработанная в Крыловском государственном научном центре [1], и эскиз ее сборки (b)

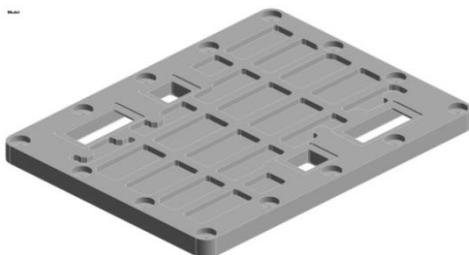


Рис. 2. Крышка БТЭ, спроектированная традиционным методом (без топологической оптимизации )

В процессе затяжки гаек на шпильках происходит, с одной стороны, обжатие уплотнительных резиновых (силиконовых) прокладок между топливными элементами, а с другой – изгиб крышек. При превышении допускаемого прогиба крышек возникает риск разгерметизации топливных элементов и выхода из строя батареи. В этой связи требуется, во-первых, определить моменты затяжки гаек на шпильках, обеспечивающие равномерное обжатие прокладок и БТЭ в целом и, во-вторых, выяснить, не превосходит ли при этом прогиб крышек допускаемого значения, гарантирующего надежность работы батареи.

Целью работы является численное моделирование напряжённо-деформированного состояния (НДС) соединенных между собой

металлических и резиновых конструкций и элементов БТЭ, а также выдача рекомендаций по оптимизации распределения материала в деталях конструкции с учётом нагрузок и закреплений и по рациональной схеме затяжки гаек при сборке батареи.

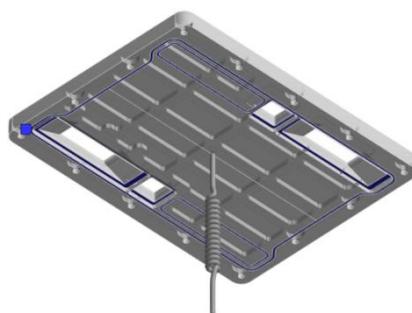
Для достижения поставленной цели выполнены:

- оценка нелинейных упругих характеристик уплотнительных силиконовых прокладок и их моделирование с использованием замены этих упругих элементов пружиной с нелинейной жесткостью;
- численное моделирование НДС крышки методом конечных элементов с учётом шпилек и уплотнительных прокладок, обладающих нелинейными упругими свойствами;
- топологическая оптимизация конструкции крышки с последующей адаптацией полученного решения под технологию её изготовления.

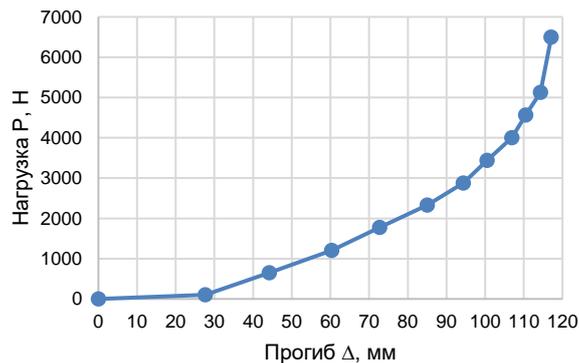
## Методы

Расчеты напряженно-деформированного состояния и перемещений конструкций БТЭ, а также их топологическая оптимизация выполнены на основе конечно-элементного моделирования [3-17]. При рационализации конструкции с помощью метода SIMP [3-8] выполнена топологическая оптимизация (ТО) крышки, обеспечивающая снижение ее массы при условии обеспечения прочности и отсутствия недопустимых прогибов. После ТО выполнена адаптация ее результатов с целью создания возможности изготовления крышки на основе традиционных технологий машиностроения.

Упругость уплотнительных прокладок из резины моделировалась с помощью нелинейного пружинного элемента, соединённого с крышкой (рис. 3). Его характеристика была задана в соответствии с результатами испытаний уплотнительной прокладки (рис. 4).

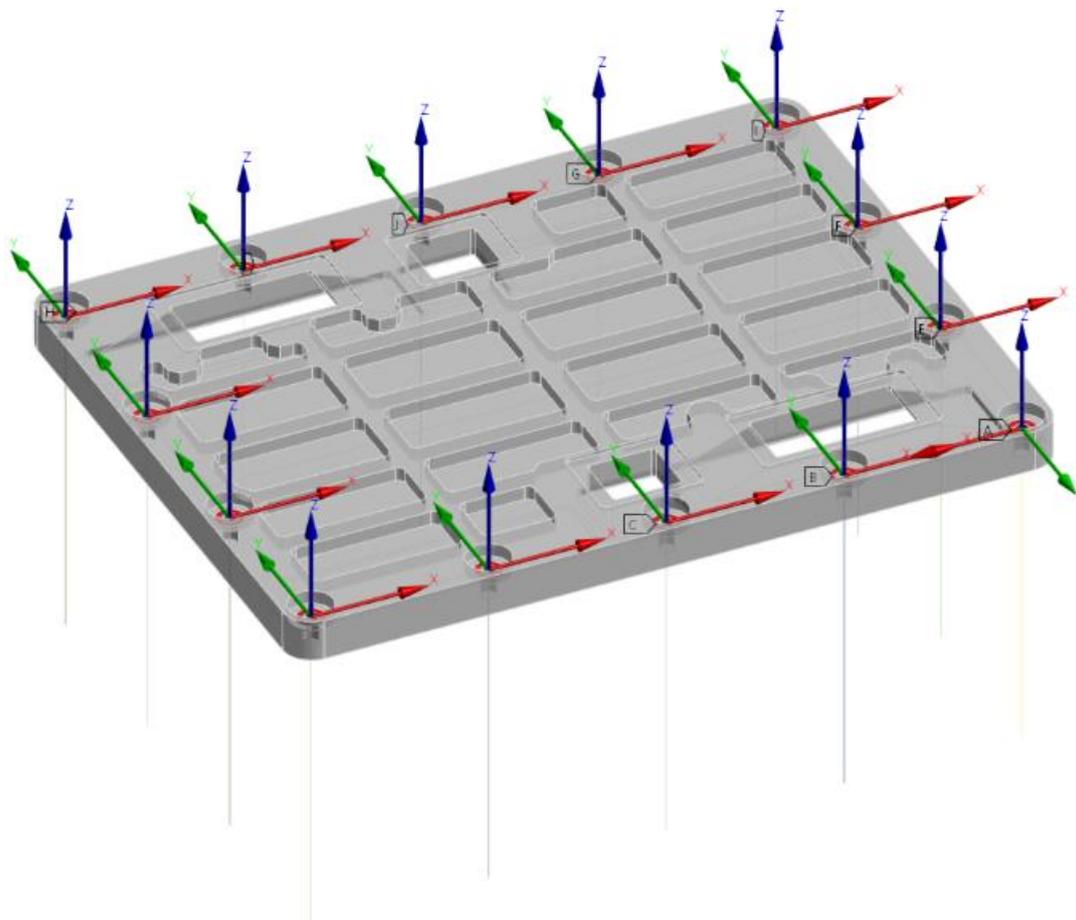


**Рис. 3.** Моделирование уплотнительных прокладок с помощью нелинейного пружинного элемента

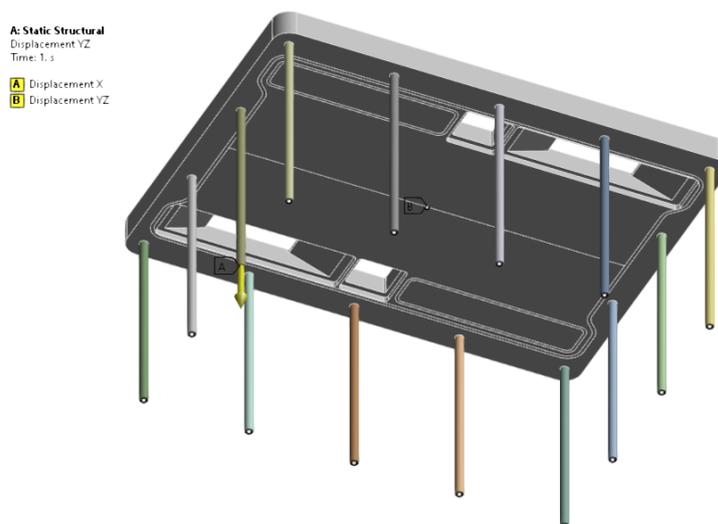


**Рис. 4.** Характеристика нелинейного пружинного элемента

Для моделирования шпилек использовались балочные элементы. Шпильки связывались с отпечатками шайб на крышке посредством жёсткого соединения (см. рис. 5). Нагружение сборки производилось кинематическим способом – путём задания свободным концам шпилек осевого перемещения, соответствующего полному равномерному сжатию всех уплотнительных прокладок БТЭ (см. рис. 6). При этом учитывалась центральная симметрия сборки – отсутствие у точки в центре внутренней поверхности крышки перемещений в плоскости крышки.



**Рис. 5.** Соединение торцов шпилек с отпечатками шайб на крышке



**Рис. 6.** Задание осевого перемещения свободным концам шпилек и учёт центральной симметрии сборки

Для снижения массы крышка выполнена из алюминиевого сплава, а шпильки – из высоколегированной стали. Свойства применяемых материалов приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Модели и свойства материала

|                                      | Крышка           | Шпильки   |
|--------------------------------------|------------------|-----------|
| Материал                             | АМг6             | 12Х18Н10Т |
| Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | 2650             | 7850      |
| Модель                               | Линейная упругая |           |
| Модуль Юнга $E$ , ГПа                | 71               | 214       |
| Коэффициент Пуассона $\nu$           | 0,33             | 0,3       |
| Предел текучести $\sigma_y$ , МПа    | 135              | 785       |

## Результаты

На рис. 7 показаны распределения вертикальных перемещений (прогибов) и эквивалентных напряжений крышки. Максимальный перепад прогибов составляет 0,16 мм, что почти в 2 раза меньше допускаемой величины 0,30 мм. Максимальные напряжения составляют 36 МПа, что существенно ниже предела текучести сплава АМг6 (табл. 1).

На рис. 8 показаны распределения осевые усилий и суммарных напряжений по шпилькам. Как видно, перепад усилий составляет почти 10 раз. При равномерной затяжке всех шпилек крышка вследствие её неравномерной жёсткости получила бы большие прогибы, превосходящие

допускаемые значения. Максимальные же напряжения составляют 42 МПа, что более чем в 18 раз ниже предела текучести 12Х18Н10Т, поэтому оказалось возможным существенно уменьшить диаметр шпилек.

Полученные запасы по прогибам и напряжениям в крышке свидетельствуют о возможности оптимизации её конструкции. В этой связи для поиска более рациональной конструкции с помощью метода SIMP была выполнена топологическая оптимизация (ТО) крышки с последующей адаптацией результатов [3-8]. Начальные этапы решения ТО показана на рис. 9. В качестве области проектирования выбрана сплошная плита толщиной 30 мм за вычетом технологических отверстий (отмечены красным). Кинематическое нагружение и учёт центральной симметрии выполнены аналогично исходной крышке.

Результаты ТО и их адаптация под технологию изготовления крышки показаны на рис. 10.

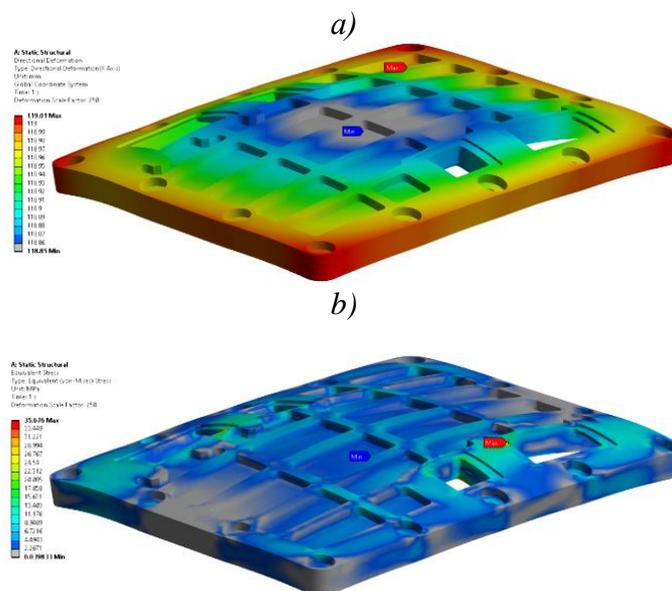


Рис. 7. НДС крышки БТЭ: а) вертикальные перемещения; б) эквивалентные напряжения

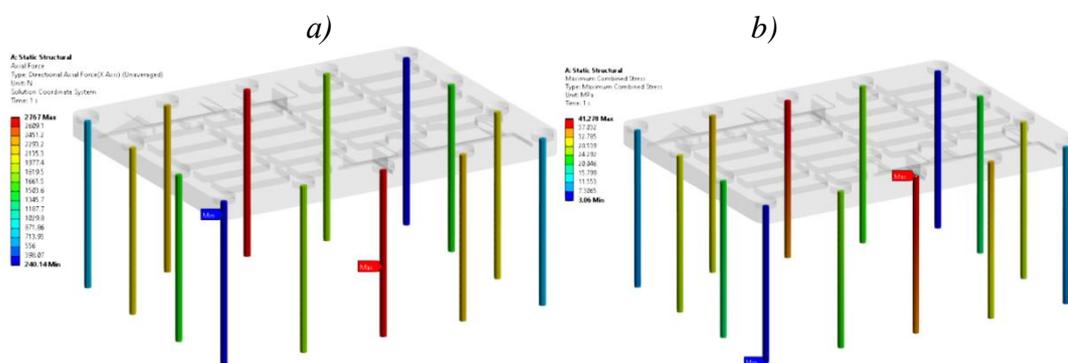
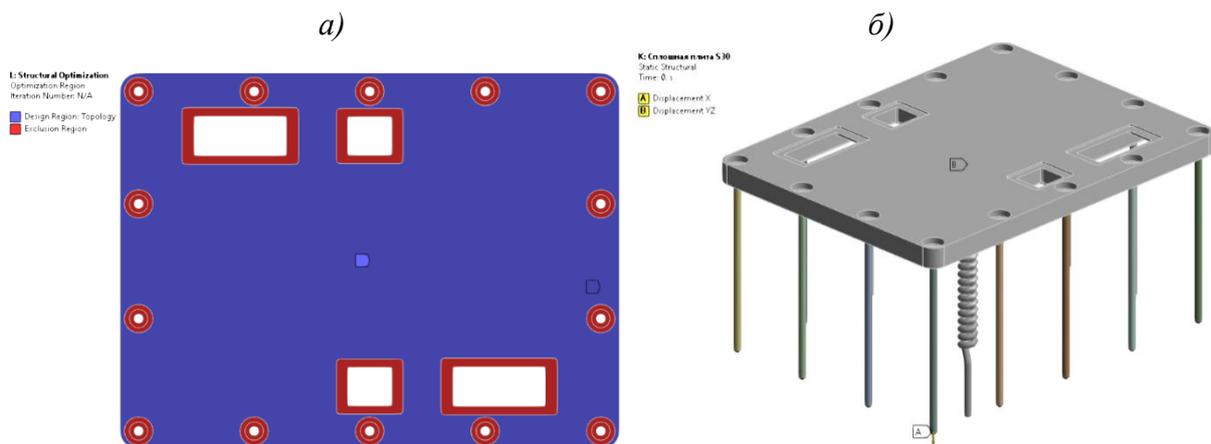
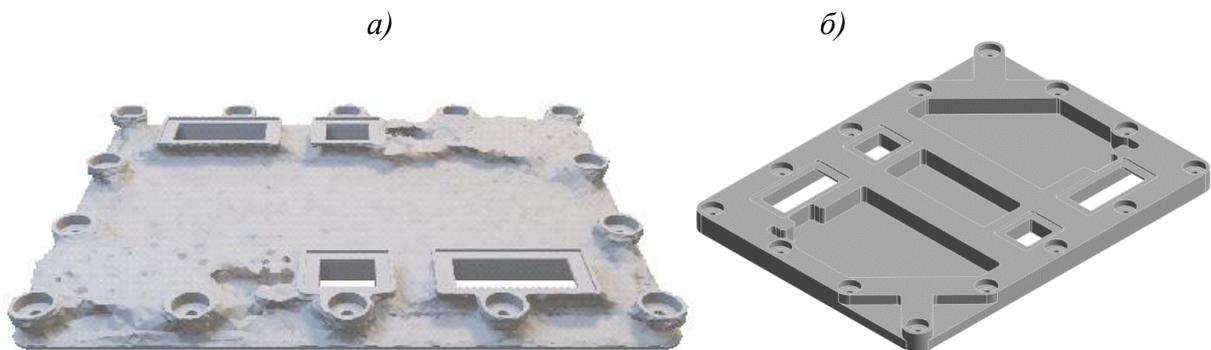


Рис. 8. Осевые усилия (а) и суммарные напряжения (б) в шпильках



**Рис. 9.** Начальные стадии решения задачи ТО: а) выбор области проектирования; б) схема кинематического нагружения



**Рис. 10.** Результаты ТО (а) и их адаптация под технологию изготовления крышки с учетом результатов расчета напряженно-деформированного состояния (б)

Для оптимизированной конструкции крышки был выполнен расчёт НДС аналогично исходной конструкции. Результаты расчёта и их сопоставление с исходной конструкцией приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Сопоставление результатов расчётов конструкций крышек

|  | Исходная | Оптимизированная |
|--|----------|------------------|
| Масса                                    | 100%     | 73%              |
| Прогиб, мм                               | 0,16     | 0,19             |
| Напряжения, МПа                          | 36       | 27               |
| Максимальное осевое усилие в шпильках, Н | 2767     | 2915             |
| Минимальное осевое усилие в шпильках, Н  | 240      | 289              |

Как видно, оптимизированная крышка имеет чуть больший прогиб (по сравнению с прототипом), оставаясь при этом в пределах допустимых значений. Также у оптимизированной крышки выросли значения осевых усилий в шпильках, а напряжения, наоборот, упали.

## Обсуждение

Из таблицы 2 следует, что масса оптимизированной конструкции крышки получилась на 27% ниже массы исходной конструкции. Кроме того, эффективность проделанной работы подтверждается, в частности тем, что в оптимизированной конструкции крышки (по сравнению с исходной) ниже на 25% действующие напряжения. Благодаря этому обеспечено повышение уровней надежности и эксплуатационной безопасности БТЭ.

В итоге расчетных исследований значительно уменьшена масса крепежа БТЭ. К важным результатам относятся полученные в работе рациональные значения усилий в шпильках, расположенных по периметрам крышек, а также по размерам и жесткости пружин, расположенных на этих шпильках под гайками.

## Заключение

В обеспечение создания принципиально нового объекта судовой водородной энергетики в работе предпринято численное моделирование напряжённо-деформированного состояния конструкции, содержащей металлические и резиновые элементы, а также БХК, генерирующие электроэнергию. Решена обратная задача механики твердого деформируемого тела – определены оптимальная конфигурация нелинейной упругой системы и усилия в соединительных элементах, обеспечивающие допустимые деформации системы в целом и в основных силовых элементах (крышках). Выданы рекомендации по оптимизации распределения материала в элементах нелинейной упругой системы с учётом нагрузок и закреплений, обеспечивающие минимизацию массы БТЭ. Расчёты НДС конструкций БТЭ выполнялись с помощью метода конечных элементов (МКЭ), а топологическая оптимизация конструкций – с помощью метода SIMP. В результате работы даны рекомендации по оптимальным усилиям сжатия, назначенным дифференцированно для различных шпилек, уплотняющих топливные элементы и обеспечивающих сборку БТЭ в целом. Рациональные моменты затяжки для разных гаек отличаются на порядок от использованных в прототипе. Выполнена проверка статической прочности крышки БТЭ с учетом нелинейной жесткости многослойных силиконовых элементов и определены диаметры шпилек и моменты затяжки гаек БТЭ.

В итоге накоплен большой опыт конечно-элементного моделирования и эффективной топологической оптимизации с помощью метода SIMP нелинейных упругих систем, представляющих собой инновационные

энергетические установки, и обеспечено создание электрохимического генератора для морского транспорта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Крыловский центр провел государственные испытания батареи топливных элементов БТЭ-50К на стенде филиала «ЦНИИ СЭТ». ФГУП «Крыловский государственный научный центр». URL: <https://krylov-centre.ru/press/news/199/> (дата обращения 01.11.2022).
- [2] Юшков А.В., Дядик А.Н. Блок-модуль электрохимического генератора с твердополимерным электролитом. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2023. № 72/73. С. 108-114.
- [3] Боровиков А.А., Тушев О.Н. Методика определения расположения межпанельных кронштейнов корпуса космического аппарата с использованием модифицированного метода SIMP топологической оптимизации. Инженерный журнал: наука и инновации. 2024. № 1 (145). С. 51-62.
- [4] Сорокин Д.В., Бабкина Л.А., Бразговка О.В. Проектирование элементов конструкций различного назначения на основе топологической оптимизации. Космические аппараты и технологии, 2022. Том 6, № 2(40). С. 61-82.
- [5] Косых П.А., Азаров А.В. Теория и анализ методов топологической оптимизации. Инженерный журнал: наука и инновации. 2023. № 4 (136). С. 11-30.
- [6] Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Комплексный подход к топологической и параметрической оптимизации судовых конструкций. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. 1(391): С. 95-108.
- [7] Крыжевич Г.Б., Норьков Е.С., Филатов А.Р. Принципы и современные методы оптимального проектирования крупногабаритных судовых перекрытий. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. Специальный выпуск 2. С. 83-89.
- [8] Tang, T.; Wang, L.; Zhu, M.; Zhang, H.; Dong, J.; Yue, W.; Xia, H. Topology Optimization: A Review for Structural Designs Under Statics Problems. *Materials*. 2024. 17, 5970, pp. 21-45.
- [9] Gandhi Y., Minak G. A Review on Topology Optimization Strategies for Additively Manufactured Continuous Fiber-Reinforced Composite Structures. *Appl. Sci.*, 2022, vol. 12, pp. 239–249.
- [10] Huang, J.; Liu, J.K. Strength constrained topology optimization of hyperelastic structures with large deformation-induced frictionless contact. *Appl. Math. Model.* 2024, 126, 67–84.

- [11] Wang, L.; Yue, W.; Zhu, M. An Improved Evolutionary Structure Optimization Method for Smooth Topology Design of Structures. *Int. J. Comput. Methods.* 2023, 20, 2250061.
- [12] Huang, J.; Liu, J.K. Strength constrained topology optimization of hyperelastic structures with large deformation-induced frictionless contact. *Appl. Math. Model.* 2024, 126, 67–84.
- [13] Li S., Zhang Y., Liu S., Wu S. Topology optimization of thermoelastic structures under transient thermal loads limited to stress constraints. *Struct Multidiscip Optim.* 2023, 66 (1) , p. 9-25.
- [14] Garaigordobil A., Ansola R., Canales J., Borinaga R. Addressing topology optimization with overhang constraints for structures subjected to self-weight loads. *Struct Multidiscip Optim.* 2022, 65 (12), p. p. 341-358.
- [15] Gao J., Xiao M., Zhou M., Gao L. Isogeometric topology and shape optimization for composite structures using level- sets and adaptive Gauss quadrature. *Composite Structures.* 2022, vol. 285, 115263, p. p. 211-227.
- [16] Huang Y., Tian X., Zheng Z., Li D., Malakhov A. V, Polilov A. N. Multiscale concurrent design and 3D printing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites with optimized fiber trajectory and topological structure. *Composite Structures.* 2022, vol. 285, 115241, p. p. 68-81.
- [17] Bohara R. P., Linforth S., Nguyen T., Ghazlan A., Ngo T. Novel lightweight high-energy absorbing auxetic structures guided by topology optimization. *International Journal of Mechanical Sciences.* 2021, vol. 211. 106793, pp. 83-92.

G.B. Kryzhevich <sup>1,2</sup>

## **DESIGN OF MAIN LOAD-BEARING CONNECTIONS OF BLOCK-MODULE OF ELECTROCHEMICAL GENERATOR BASED ON TOPOLOGICAL OPTIMIZATION**

<sup>1</sup>Baltic State Technical University "Voenmech" named after D.F. Ustinov,  
Russia;

<sup>2</sup>Krylov State Research Center, Russia

### **Abstract**

The paper considers the issues of numerical modeling of the stress-strain state of fuel cell stack (FCS) structures of the universal functional module (UFM) of a hydrogen power plant (electrochemical generator) and optimization of material distribution in structural parts taking into account loads and

fastenings. Calculations of the stress-strain state of the FCS structures were performed using the finite element method (FEM), and topological optimization of the structures was performed using the SIMP method. The results showed that the use of topological optimization in design allows to reduce the weight of the main elements of the BFC by approximately 27% (compared to the original battery designed by traditional methods) and reduce the stress level in them by approximately 25%, while ensuring a significant increase in the reliability and operational safety of the BFC. Based on the obtained results, the main provisions of the rational technology of BFC assembly are formulated.

*Key words:* electrochemical generator, fuel cell, power elements of a fuel cell battery, design method, design optimization, fuel cell assembly technology.

## REFERENCES

- [1] Krylov Center conducted state tests of the BTE-50K fuel cell battery at the test bench of the TsNII SET branch. Krylov State Research Center. URL: <https://krylov-centre.ru/press/news/199/> (accessed on November 1, 2022).
- [2] Yushkov AV, Dyadik AN. Block module of an electrochemical generator with solid polymer electrolyte. Scientific and technical collection of the Russian Maritime Register of Shipping. 2023. No. 72/73. P. 108-114.
- [3] Borovikov AA, Tushev ON. Methodology for determining the location of interpanel brackets of the spacecraft body using the modified SIMP method of topological optimization. Engineering journal: science and innovation. 2024. No. 1 (145). S. 51-62.
- [4] Sorokin D.V., Babkina L.A., Brazgovka O.V. Design of structural elements for various purposes based on topological optimization. Spacecraft and Technologies, 2022. Vol. 6, No. 2(40). S. 61-82.
- [5] Kosykh P.A., Azarov A.V. Theory and analysis of topological optimization methods. Engineering Journal: Science and Innovation. 2023. No. 4 (136). S. 11-30.
- [6] Kryzhevich G.B., Filatov A.R. An integrated approach to topological and parametric optimization of ship structures. Proceedings of the Krylov State Research Center. 2020. 1(391): S. 95-108.
- [7] Kryzhevich G.B., Norkov E.S., Filatov A.R. Principles and modern methods of optimal design of large-sized ship floors. Proceedings of the Krylov State Research Center. 2020. Special issue 2. P. 83-89. Tang, T.; Wang, L.; Zhu, M.; Zhang, H.; Dong, J.; Yue, W.; Xia, H. Topology Optimization: A Review for Structural Designs Under Statics Problems. Materials. 2024. 17, 5970, pp. 21-45.
- [8] Tang, T.; Wang, L.; Zhu, M.; Zhang, H.; Dong, J.; Yue, W.; Xia, H. Topology Optimization: A Review for Structural Designs Under Statics Problems. Materials. 2024. 17, 5970, pp. 21-45.

- [9] Gandhi Y., Minak G. A Review on Topology Optimization Strategies for Additively Manufactured Continuous Fiber-Reinforced Composite Structures. *Appl. Sci.*, 2022, vol. 12, pp. 239–249.
- [10] Huang, J.; Liu, J.K. Strength constrained topology optimization of hyperelastic structures with large deformation-induced frictionless contact. *Appl. Math. Model.* 2024, 126, 67–84.
- [11] Wang, L.; Yue, W.; Zhu, M. An Improved Evolutionary Structure Optimization Method for Smooth Topology Design of Structures. *Int. J. Comput. Methods.* 2023, 20, 2250061.
- [12] Huang, J.; Liu, J.K. Strength constrained topology optimization of hyperelastic structures with large deformation-induced frictionless contact. *Appl. Math. Model.* 2024, 126, 67–84.
- [13] Li S., Zhang Y., Liu S., Wu S. Topology optimization of thermoelastic structures under transient thermal loads limited to stress constraints. *Struct Multidiscip Optim*, 2023, 66 (1) , p. 9-25.
- [14] Garaigordobil A., Ansola R., Canales J., Borinaga R. Addressing topology optimization with overhang constraints for structures subjected to self-weight loads. *Struct Multidiscip Optim*, 2022, 65 (12), p. p. 341-358.
- [15] Gao J., Xiao M., Zhou M., Gao L. Isogeometric topology and shape optimization for composite structures using level- sets and adaptive Gauss quadrature. *Composite Structures.* 2022, vol. 285, 115263, p. p. 211-227.
- [16] Huang Y., Tian X., Zheng Z., Li D., Malakhov A. V, Polilov A. N. Multiscale concurrent design and 3D printing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites with optimized fiber trajectory and topological structure. *Composite Structures.* 2022, vol. 285, 115241, p. p. 68-81.
- [17] Bohara R. P., Linforth S., Nguyen T., Ghazlan A., Ngo T. Novel lightweight high-energy absorbing auxetic structures guided by topology optimization. *International Journal of Mechanical Sciences.* 2021, vol. 211. 106793, pp. 83-92.