

УДК 519.876.5

doi: 10.18698/0536-1044-2023-1-42-51

# Сравнительно-сопоставительное исследование программных комплексов трехмерного численного моделирования путем анализа результатов топологической оптимизации изделий ракетно-космической техники

А.Л. Галиновский, А.С. Филимонов, Ю.В. Баданина, А.И. Долгих

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Comparative Correlation Study of Software Systems for Three-Dimensional Numerical Simulation by Analyzing Results of the RST Product Topological Optimization

A.L. Galinovsky, A.S. Filimonov, Yu.V. Badanina, A.I. Dolgikh

Bauman Moscow State Technical University

Исследованы вопросы технологии верификации программных комплексов трехмерного численного моделирования путем проведения топологической оптимизации изделия и ее влияния на эффективность деталей определенного типа. С помощью численного моделирования построена твердотельная модель кронштейна с заданием граничных условий в нескольких программных комплексах для автоматизированных инженерных расчетов. Создана конечно-элементная модель для каждого этапа расчета. Выполнено сравнение результатов топологической оптимизации, проведенной разными цифровыми продуктами. Выделены достоинства и недостатки выбранных программных комплексов.

**Ключевые слова:** трехмерное численное моделирование, верификация программных комплексов, топологическая оптимизация, ложемент, кронштейн, опора

The paper studies technology issues of verification processes in regard to the software systems 3D numerical simulation using topological optimization of the particular product and its influence on the efficiency of a certain kind of components. Numerical simulation made it possible to construct a solid model of the selected component with the set boundary conditions in several of the most popular analysis programs in the automated engineering calculations environment. A finite element model was created for each stage of the calculation. Results of topological optimization were compared with various digital products. Advantages and disadvantages of the selected software systems were highlighted.

**Keywords:** 3D numerical simulation, software systems verification, topological optimization, lodgment, bracket, support

Аддитивное производство занимает все большую долю в различных областях машиностроительного производства. Аддитивные техноло-

гии обладают значительными преимуществами перед классическими методами изготовления деталей. К ним можно отнести возможность

изготовления деталей сложной геометрической формы и высокий коэффициент использования материала.

Немаловажное значение в оптимизации производства имеет грамотный выбор программного комплекса (ПК) трехмерного численного моделирования.

К изделиям, подлежащим разработке и перепуску с помощью аддитивного производства, относится широкая номенклатура деталей, в которых можно реализовать топологическую оптимизацию (ТО). Наиболее распространенными в этом направлении являются детали типа опоры, кронштейна, ложементы и т. п., где ТО обеспечит существенный эффект по снижению массы [1–3].

Цель работы — исследование возможностей оптимизации топологии изделий ракетно-космической техники для снижения массы конструкции с минимизацией внутренних напряжений.

**Расчет на прочность исходной детали.** Верификация ПК трехмерного численного моделирования необходима для проверки и подтверждения достоверности результатов на соответствие математическим вычислениям и реальным наблюдениям, позволяя внедрить ПК в производственный процесс [4, 5].

В качестве тестируемой детали для проведения ТО выбран кронштейн. Так как он относится к ракетно-космической технике, его масса уже минимизирована конструкторами, вследствие чего последующая ТО не даст разительных результатов по снижению массы [6–8].

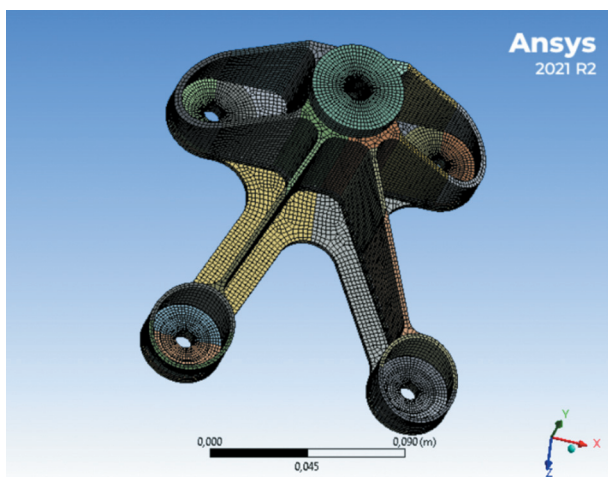
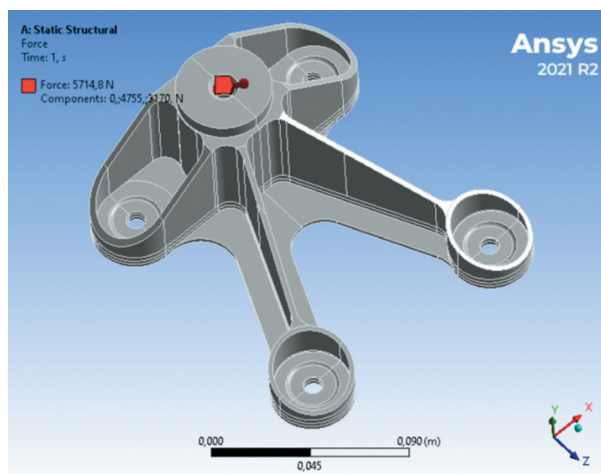
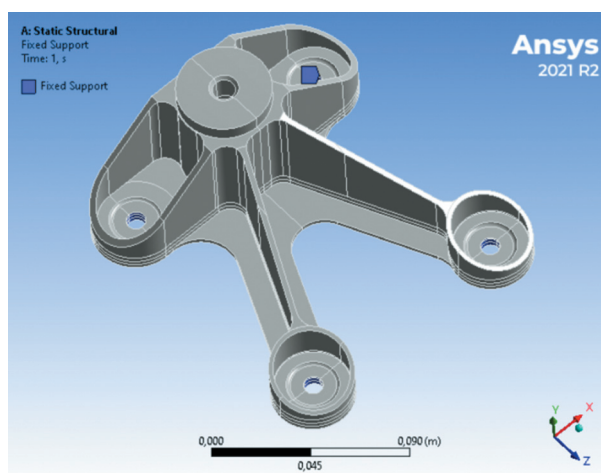


Рис. 1. КЭМ кронштейна



а



б

Рис. 2. Схемы приложения силы к цилиндрической поверхности отверстия в бобышке (а) и задания граничных условий (б) для модели исходного кронштейна

Конечно-элементная модель (КЭМ) детали состоит из 40 861 гексагональных конечных элементов с линейным размером 2 мм (рис. 1).

К цилиндрической поверхности отверстия в бобышке кронштейна в плоскости  $YZ$  приложена сила, отрывная составляющая  $F_Y$  которой равна 4755 Н, а сдвиговая  $F_Z$  — 3170 Н.

Граничные условия — перемещения отверстий на четырех ушках вдоль осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ :  $U_X = 0$ ;  $U_Y = 0$ ;  $U_Z = 0$ . Схемы приложения силы к цилиндрической поверхности отверстия в бобышке и задания граничных условий для модели исходного кронштейна приведены на рис. 2.

После задания граничных условий и приложенных нагрузок проведен расчет напряженно-деформированного состояния кронштейна с использованием метода статического прочностного

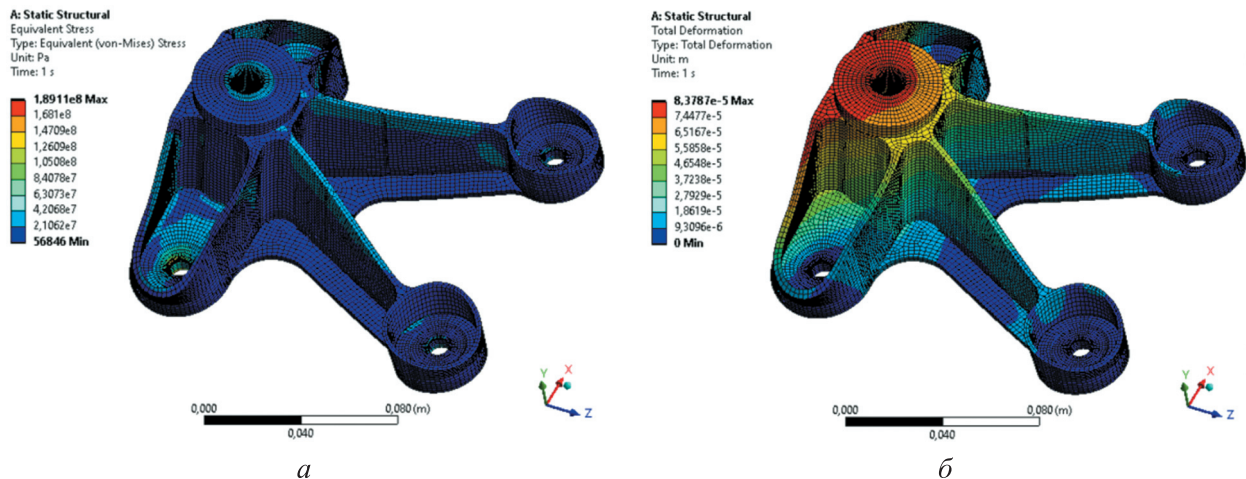


Рис. 3. Распределения эквивалентных напряжений, Па, (а) и перемещений, м, (б) в исходном кронштейне

анализа. Распределения напряжений по Мизесу (эквивалентных напряжений) и перемещений в исходном кронштейне приведены на рис. 3.

**Топологическая оптимизация.** ТО — процесс оптимизации распределения материала в области проектирования при заданных нагрузках с удовлетворением критериям и ограничениям оптимизации.

В выбранных ПК использован наиболее популярный метод SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization). Он прогнозирует оптимальное распределение материала в пределах указанного проектного пространства для выбранных нагрузок, граничных условий, ограничений и требований к производительности.

Деталь разбивают на конечные элементы, которые образуют сетку, называемую изотропной сплошной микроструктурой. Каждый ее элемент либо заполнен материалом, если он

необходим, либо не содержит материала, где его можно удалить. Распределение плотности материала в рамках проектного домена  $\rho_{(e)}$  является дискретным, а каждый элемент имеет двоичное значение [9, 10]:

- если требуется материал, то  $\rho_{(e)} = 1$ ;
- если материал можно удалить, то  $\rho_{(e)} = 0$ .

Например, на рис. 4 показана область проектирования  $\Omega$  — оптимизированный макет нагруженного материала. Твердые элементы с плотностью  $\rho_{(e)} = 1$  обозначены черными точками, пустые элементы с плотностью  $\rho_{(e)} = 0$  удалены.

Целевая функция — минимизация массы кронштейна. Ограничения: эффективные напряжения  $\sigma_{\max}$  и симметричность относительно плоскости YZ.

**Топологическая оптимизация в ПК ANSYS.** Одним из универсальных и популярных ПК анализа конструкций методом конечных элементов в среде автоматизированных инженерных расчетов является ANSYS. Подготавливаемая к ТО модель содержала 108 254 конечных элементов. КЭМ детали с областью ТО приведена на рис. 5, а. Зоны приложения граничных условий и сил показаны на рис. 5, б. Там же изображены области, доступные для ТО (выделенные синим цветом), и зоны, которые необходимо исключить из расчетной области (отмеченные красным цветом).

Процедура ТО, включавшая в себя 20 итерационных этапов, заняла 60 мин. КЭМ оптимизированного кронштейна с различными значениями коэффициента удаляемого материала приведены на рис. 6.

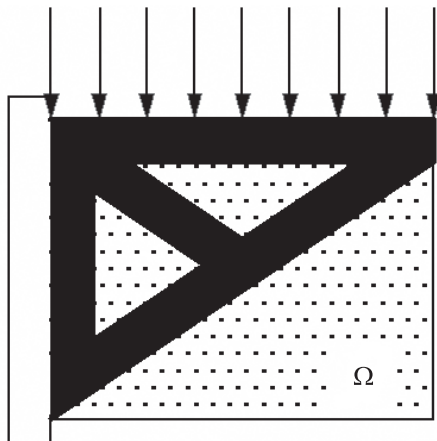
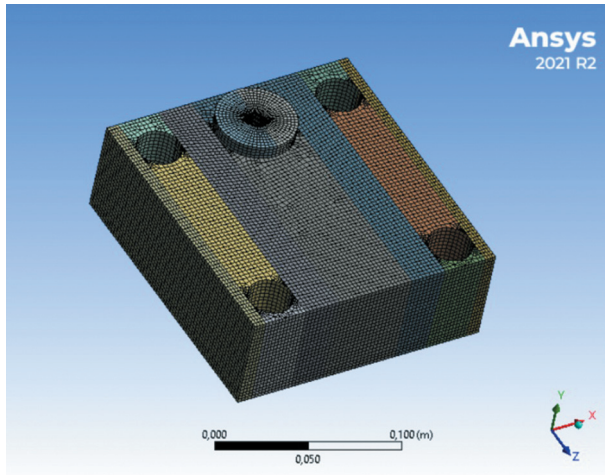
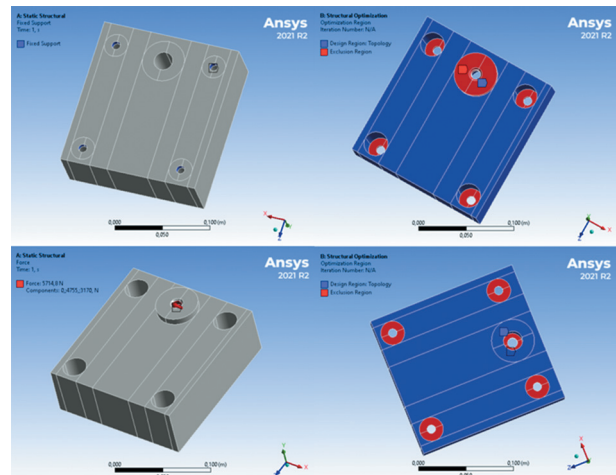


Рис. 4. Пример использования SIMP-метода для оптимизированного кронштейна

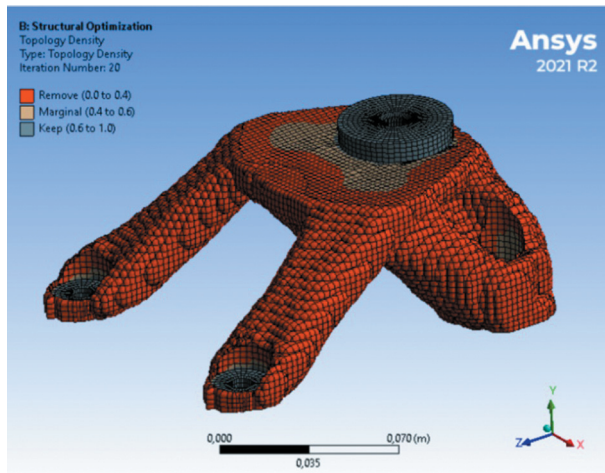


*a*

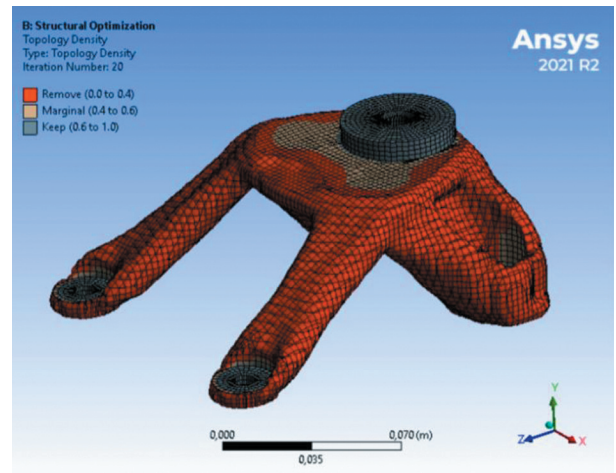


*б*

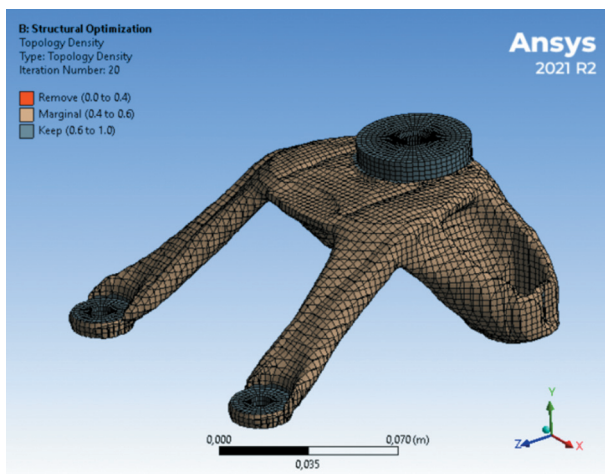
Рис. 5. Моделирование детали в ПК ANSYS:  
*a* — КЭМ детали; *б* — задание области оптимизации и граничных условий



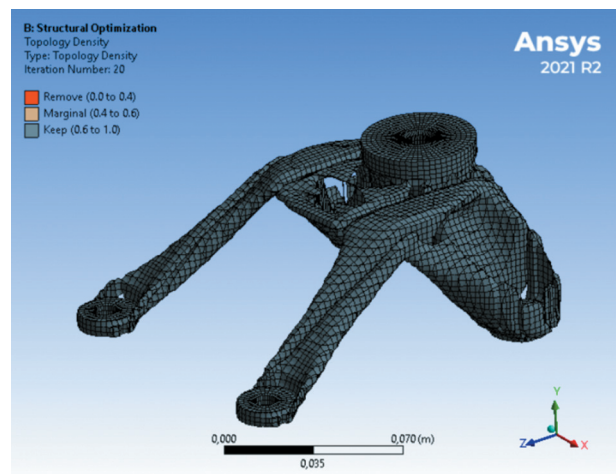
*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 6. КЭМ оптимизированного кронштейна с коэффициентом удаляемого материала, равным 0 (*a*), 0,15 (*б*), 0,50 (*в*) и 0,80 (*г*)

Важным этапом, определяющим качество конечного изделия, изготовленного с применением аддитивных технологий, является постобработка полученной в процессе ТО фасетированной геометрической формы (в формате STL). Эта процедура, выполненная в графическом препроцессоре ANSYS SpaceClaim, включала в себя следующие этапы:

- оборачивание;
- удаление лишнего объема материала;
- сшивание зазоров между фасетами;
- сглаживание;
- преобразование в твердое тело;
- объединение и исправление неточных граней и ребер.

Окончательный вариант твердотельной модели кронштейна, полученной в ПК ANSYS, приведен на рис. 7 [11].

После ТО и подготовки трехмерной модели к дальнейшей работе необходимо выполнить проверочный расчет. Деталь состояла из 68 186 конечных элементов.

Анализ результатов ТО, выполненной в ПК ANSYS, позволяет заключить следующее:

- модель обладает относительно простой формой, нет излишнего объема материала, не задействованного в статическом нагружении;
- поверхности кронштейна характеризуются умеренной кривизной, отсутствуют явные концентраторы напряжений;
- благодаря оптимальному распределению напряжений деталь стала менее нагруженной, чем в исходном варианте;
- модель имеет гораздо меньшие перемещения, чем исходная деталь даже при отсутствии ребер жесткости.

Результаты проверочного расчета в виде распределений эквивалентных напряжений и пере-

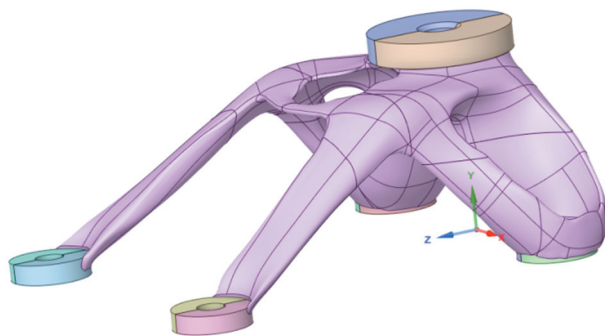


Рис. 7. Окончательный вариант твердотельной модели кронштейна, созданной в ПК ANSYS

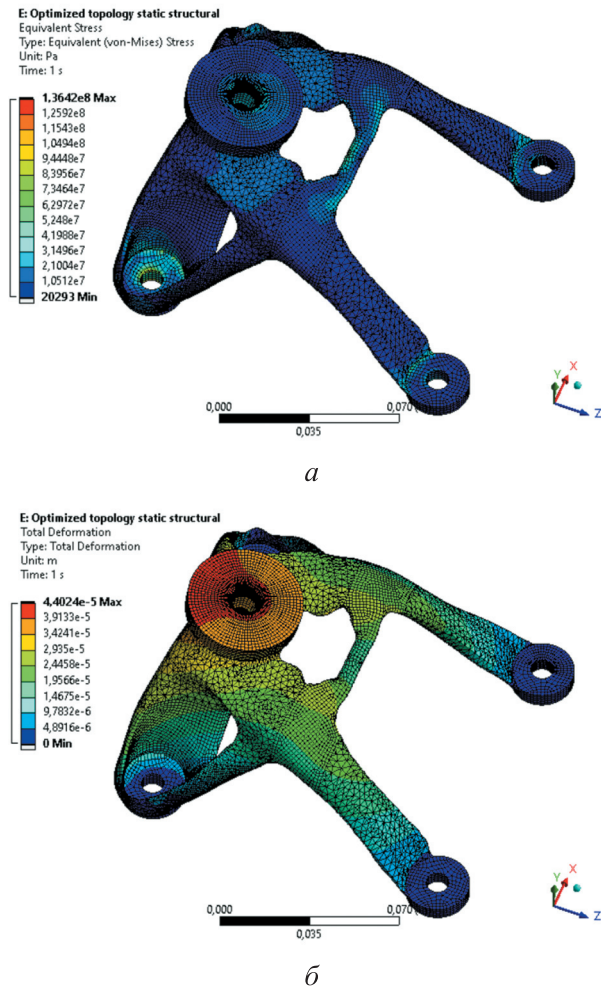


Рис. 8. Распределения эквивалентных напряжений, Па, (а) и перемещений, м, (б) в оптимизированном кронштейне, полученные в ПК ANSYS

мещений в оптимизированном кронштейне приведены на рис. 8.

Топологическая оптимизация в ПК SolidWorks. Еще одним инструментом, используемым для систем автоматизированного проектирования и 3D-моделирования, является ПК SolidWorks.

Деталь разбивали сеткой размером 2 мм в ПК SolidWorks. КЭМ детали содержала 205 558 тетрагональных конечных элемента (рис. 9).

Процедура ТО, включавшая в себя 80 итерационных этапов, заняла 2,5 ч. Трехмерные модели оптимизированного кронштейна с коэффициентом оставляемого материала, равным 45 и 25 % расчетного количества массы, приведены на рис. 10.

Так как в ПК SolidWorks нельзя продемонстрировать отдельные итерации, окончательно-

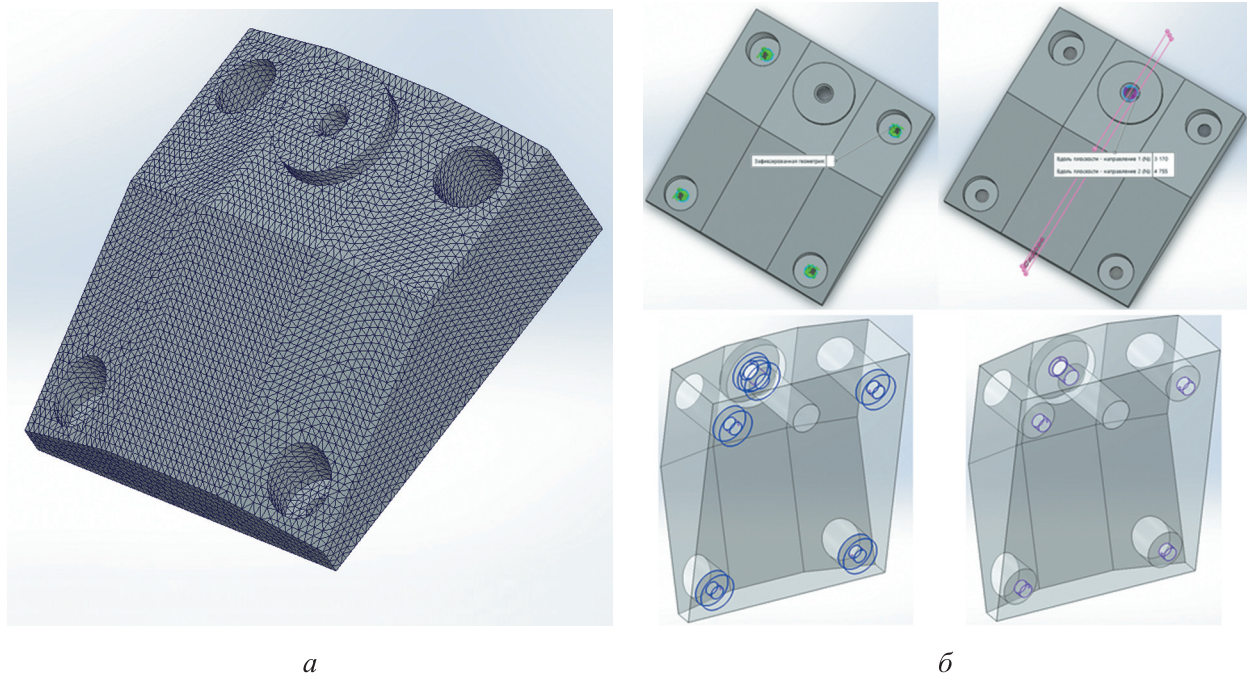


Рис. 9. Моделирование детали в ПК SolidWorks:  
 а — КЭМ детали; б — задание области оптимизации и граничных условий

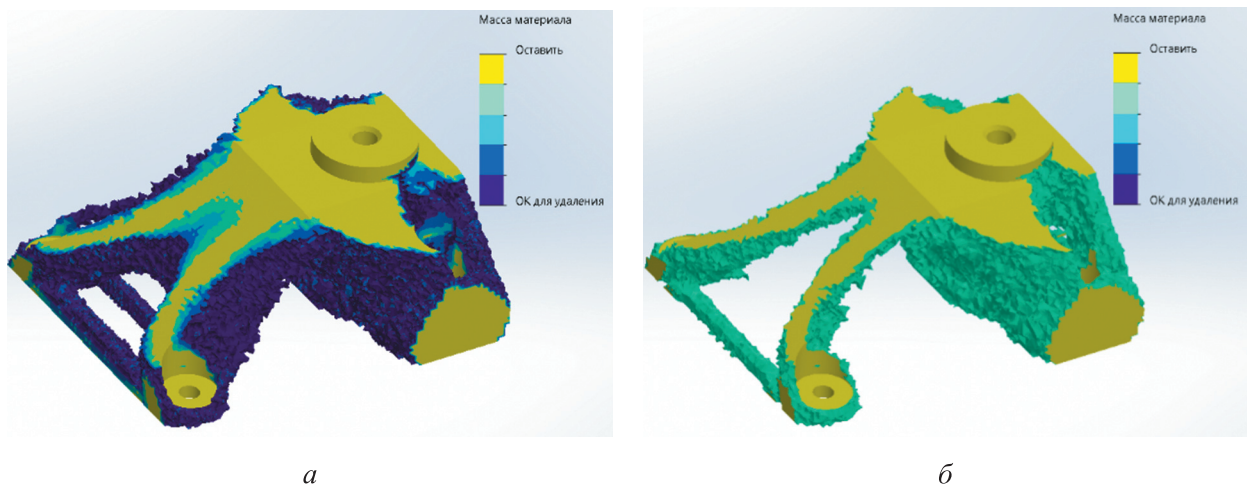


Рис. 10. Трехмерные модели оптимизированного кронштейна  
 с коэффициентом оставляемого материала,  
 равным 45 (а) и 25 % расчетного количества массы (б)

ным вариантом твердотельной модели кронштейна стала деталь с минимальным коэффициентом оставляемого материала. Несмотря на установленные ограничения в исследовании ТО, минимальная масса оптимизированной модели составила 0,59 кг, что оказалось даже больше, чем исходный кронштейн. Часть материала никак не соединена с основным объемом получившейся детали, в остальных местах он избыточен [12–15].

Окончательный вариант твердотельной модели кронштейна, полученный в ПК SolidWorks, показан на рис. 11.

Деталь состояла из 55 675 конечных элементов. Результаты проверочного расчета приведены на рис. 12.

Анализ результатов ТО кронштейна, выполненной в ПК SolidWorks, показал следующее:

- по форме модель значительно отличается от детали, полученной в ПК ANSYS;

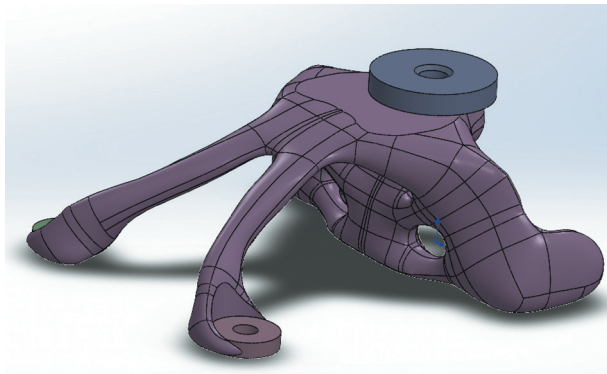


Рис. 11. Окончательный вариант твердотельной модели кронштейна, созданный в ПК SolidWorks

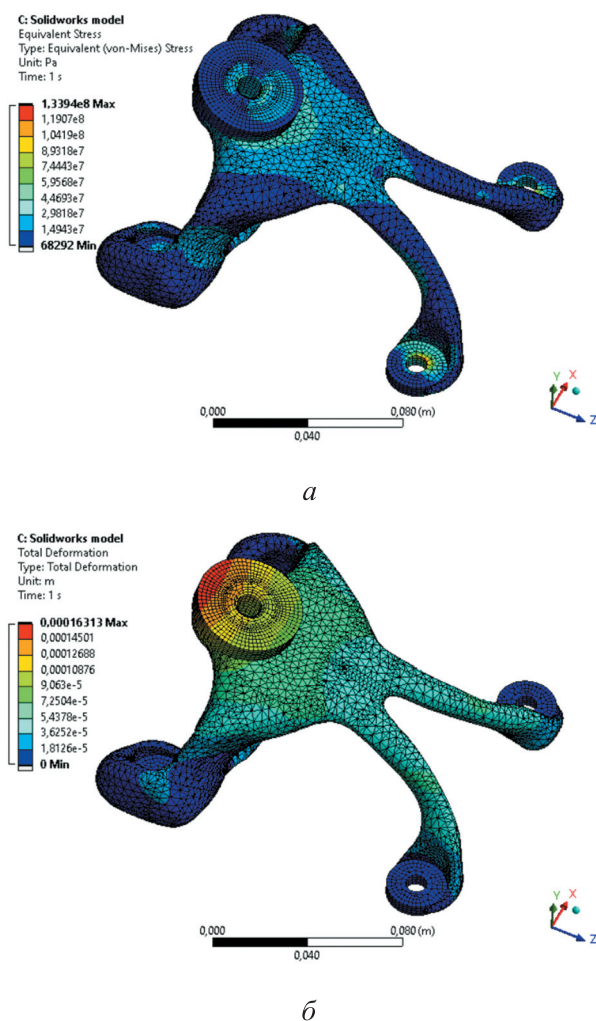


Рис. 12. Распределения эквивалентных напряжений, Па, (а) и перемещений, м, (б) в оптимизированном кронштейне, полученные в ПК SolidWorks

- в модели сгенерированы области излишка материала, на которые статическая нагрузка оказывает минимальное влияние;

- модель гораздо менее жесткая по сравнению с исходным вариантом;

### Результаты ТО кронштейна, полученные в ПК ANSYS и SolidWorks

Вариант кронштейна	$m$ , кг	$\sigma_{\max}$ , МПа	$U_{\max}$ , мм
Исходный	0,450	189,1	0,084
Оптимизированный в ПК ANSYS	0,367	136,4	0,044
Оптимизированный в ПК SolidWorks	0,550	133,9	0,160

- модель обладает большим запасом прочности и является менее нагруженной, чем исходный вариант; однако ее масса не удовлетворяет первоначальным требованиям.

**Обсуждение результатов.** Наиболее удачным вариантом оказалась модель оптимизированного кронштейна, полученная в ПК ANSYS (см. таблицу). По сравнению с исходной деталью у наилучшего варианта кронштейна масса  $m$  уменьшилась на 18,4 %, эквивалентные напряжения  $\sigma_{\max}$  — на 27,9 %, а перемещения  $U_{\max}$  — на 47,6 %.

Следует отметить, что результаты получены при использовании материала AlSi10Mg, уступающего в некоторых механических характеристиках первоначально применявшемуся сплаву АК6Т1.

### Выводы

1. На основании полученных данных, можно заключить, что ТО в ПК ANSYS проведена успешно. Полученная деталь полностью работоспособна и удовлетворяет всем предъявляемым к ней требованиям. Однако модель, созданная путем ТО в ПК SolidWorks, по многим показателям уступает даже исходному варианту кронштейну.

2. Несмотря на неплохие показатели эквивалентных напряжений, деталь оказалась на 100 г тяжелее и гораздо более подвержена деформациям. Очевидно, что разработчики ПК, совершенствуя расчетные методы, продолжают их адаптировать к решению новых конструкторско-технологических задач, связанных с изготовлением деталей аддитивными методами. Но на сегодняшний день для решения задач ТО можно рекомендовать ПК ANSYS.

Авторы выражают благодарность Р.С. Роголёву и А.С. Свешникову за помощь в некоторых аспектах проведенного исследования и оформлении статьи.

## Литература

- [1] Shi G., Guan C., Quan D. et al. An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing. *Chinese J. Aeronaut.*, 2020, vol. 33, no. 4, pp. 1252–1259, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.09.006>
- [2] Журавлев А.В., Мозгалин В.Л., Смоленцев Е.В. Преимущества аддитивных технологий и производства. В: *Современные технологии производства в машиностроении*. Воронеж, Научная книга, 2021, с. 148–152.
- [3] Wong K.V., Hernandez A. A review of additive manufacturing. *Int. Sch. Res. Notices*, 2012, vol. 2012, art. 208760.
- [4] Штаничев Р.А., Яблоков А.М., Садовский Н.И. Верификации результатов численного моделирования малорасходной ступени центробежного компрессора с экспериментальными данными с помощью программных комплексов Numeca Fine/Turbo и Ansys CFX. *Вестник Международной академии холода*, 2021, № 3, с. 32–38, doi: <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2021-20-3-32-38>
- [5] Thacker B.H., Doebling S.W., Hemez F.M. et al. *Concepts of model verification and validation*. Los Alamos National Laboratory. 2004.
- [6] Пнева М.А., Усова К.С., Курохтин В.Ю. Расчет элементов строительных конструкций на прочность с использованием программных комплексов и аналитических методов. *III Межд. конф. молодых ученых по современным проблемам материалов и конструкций*. Улан-Удэ, БГУ, 2019, с. 377–382.
- [7] Бирюк В.В., Горшкалев А.А., Каюков С.С. и др. Расчет на прочность элементов ДВС с помощью ANSYS с учетом тепловых процессов в камере сгорания. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2015, т. 14, № 2, с. 35–43, doi: <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2015-14-2-35-43>
- [8] Shevtsov S., Oganeyan P. Оптимизация топологии конструкций в пакете ABAQUS. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2014, т. 16, № 6–2, с. 543–549.
- [9] Боровиков А.А., Леонов А.Г., Тушев О.Н. Методика определения расположения межпанельных кронштейнов корпуса космического аппарата с использованием топологической оптимизации. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 4, с. 4–19, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2019-4-4-19>
- [10] Боровиков А.А. Модифицированный алгоритм топологической оптимизации на основе метода SIMP. *Королевские чтения*. Москва, 2022, с. 507–510.
- [11] Li X., Zhao L., Liu Z. Topological optimization of continuum structure based on ANSYS. *MATEC Web Conf.*, 2017, vol. 95, art. 07020, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179507020>
- [12] Мягков Л.Л., Чирский С.П. Реализация топологической оптимизации методом BESO в среде ANSYS APDL и ее применение для оптимизации формы шатуна тепловозного дизеля. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 11, с. 38–48, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-11-38-48>
- [13] Куркин Е.И., Спирина М.О., Азизов Р.Д. Опыт использования методов и программных продуктов топологической оптимизации при проектировании кронштейнов аэрокосмического назначения, изготавливаемых по аддитивным технологиям. *Аддитивные технологии: настоящее и будущее. Мат. IV Межд. конф.* Москва, ВИАМ, 2018, с. 249–255.
- [14] Boldyrev G., Muzyemnek A.J. The modelling of deformation process in soils with use of Ansys and Ls-Dyna programs. *6<sup>th</sup> Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 2008, pp. 1–10.
- [15] Istablaev F.F., Atakulov L.N. Решение задач методом конечных элементов с помощью программного комплекса Ansys. *Горный вестник Узбекистана*, 2015, № 2, с. 53–56, doi: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.34114.91841>

## References

- [1] Shi G., Guan C., Quan D. et al. An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing. *Chinese J. Aeronaut.*, 2020, vol. 33, no. 4, pp. 1252–1259, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.09.006>



- [2] Zhuravlev A.V., Mozgalin V.L., Smolentsev E.V. Preimushchestva additivnykh tekhnologiy i proizvodstva [Advantages of additive technologies and production]. V: *Sovremennyye tekhnologii proizvodstva v mashinostroenii* [In: Modern production technologies in machine building]. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2021, pp. 148–152. (in Russ.).
- [3] Wong K.V., Hernandez A. A review of additive manufacturing. *Int. Sch. Res. Notices*, 2012, vol. 2012, art. 208760.
- [4] Shtanichev R.A., Yablokov A.M., Sadovskiy N.I. Verification of numerical simulation results for low-flow centrifugal compressor stage with experimental data by Numeca fine/turbo and ANSYS CFX software packages. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda* [Journal of International Academy of Refrigeration], 2021, no. 3, pp. 32–38, doi: <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2021-20-3-32-38> (in Russ.).
- [5] Thacker B.H., Doebling S.W., Hemez F.M. et al. *Concepts of model verification and validation*. Los Alamos National Laboratory, 2004.
- [6] Pneva M.A., Usova K.S., Kurokhtin V.Yu. [Strength calculation of structural elements using software packages and analytical methods]. *III Mezhd. konf. molodykh uchenykh po sovremennym problemam materialov i konstruksiy* [III Int. Conf. of Young Scientists on Modern Problems of Materials and Constructions]. Ulan-Ude, BGU Publ., 2019, pp. 377–382. (In Russ.).
- [7] Biryuk V.V., Gorshkalev A.A., Kayukov S.S. et al. Strength analysis of internal combustion engine elements by using ANSYS with taking into account heat processes in the combustion chamber. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering], 2015, vol. 14, no. 2, pp. 35–43, doi: <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2015-14-2-35-43> (in Russ.).
- [8] Shevtsov S., Oganesyanyan P. Topology designs optimization in ABAQUS package. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia RAS SamSC], 2014, vol. 16, no. 6–2, pp. 543–549. (In Russ.).
- [9] Borovikov A.A., Leonov A.G., Tushev O.N. Technique employing topology optimisation to determine panel-to-panel support bracket positions in a spacecraft body. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2019, no. 4, pp. 4–19, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2019-4-4-19> (in Russ.).
- [10] Borovikov A.A. Modified algorithm for topology optimization based on the SIMP method. *Korolevskie chteniya* [Korolev Readings]. Moscow, 2022, pp. 507–510. (in Russ.).
- [11] Li X., Zhao L., Liu Z. Topological optimization of continuum structure based on ANSYS. *MATEC Web Conf.*, 2017, vol. 95, art. 07020, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179507020>
- [12] Myagkov L.L., Chirskiy S.P. The implementation of the BESO method for topology optimization in ANSYS APDL and its application for optimization of the connecting rod shape of a locomotive diesel engine. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2018, no. 11, pp. 38–48, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-11-38-48> (in Russ.).
- [13] Kurkin E.I., Spirina M.O., Azizov R.D. [Experience of using methods and software products of topological optimization in the design of aerospace brackets made by additive technologies]. *Additivnyye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee. Mat. IV Mezhd. konf.* [Additive Technologies: Present and Future. Proc. IV Int. Conf.]. Moscow, VIAM Publ., 2018, pp. 249–255. (In Russ.).
- [14] Boldyrev G., Muzyemnek A.J. The modelling of deformation process in soils with use of Ansys and Ls-Dyna programs. *6<sup>th</sup> Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 2008, pp. 1–10.
- [15] Istablaev F.F., Atakulov L.N. Solving problems using finite elements method with Ansys software. *Gornyy vestnik Uzbekistana*, 2015, no. 2, pp. 53–56, doi: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.34114.91841>

## Информация об авторах

**ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: a\_galinovskiy@bmstu.ru).

**ФИЛИМОНОВ Алексей Сергеевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: alexf@bmstu.ru).

**БАДАНИНА Юлия Владимировна** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: badanina@bmstu.ru).

**ДОЛГИХ Анна Игоревна** — кандидат философских наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: a.dolgikh@bmstu.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Галиновский А.Л., Филимонов А.С., Баданина Ю.В., Долгих А.И. Сравнительно-сопоставительное исследование программных комплексов трехмерного численного моделирования путем анализа результатов топологической оптимизации изделий ракетно-космической техники. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 1, с. 42–51, doi: 10.18698/0536-1044-2023-1-42-51

### Please cite this article in English as:

Galinovsky A.L., Filimonov A.S., Badanina Yu.V., Dolgikh A.I. Comparative Correlation Study of Software Systems for Three-Dimensional Numerical Simulation by Analyzing Results of the RST Product Topological Optimization. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 1, pp. 42–51, doi: 10.18698/0536-1044-2023-1-42-51

## Information about the authors

**GALINOVSKY Andrey Leonidovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Technology of Rocket and Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: a\_galinovskiy@bmstu.ru).

**FILIMONOV Alexey Sergeevich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Technology of Rocket and Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: alexf@bmstu.ru).

**BADANINA Yulia Vladimirovna** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Technology of Rocket and Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: badanina@bmstu.ru).

**DOLGIKH Anna Igorevna** — Candidate of Science (Philosophy), Associate Professor, Technology of Rocket and Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: a.dolgikh@bmstu.ru).