

DOI: 10.24412/2077-8481-2026-2-23-32

УДК 004.94, 691.175

И. А. ЛЕОНОВИЧ¹, канд. техн. наук, доц.

Д. Д. АДИНЦОВ²

¹Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

²ОАО «Могилевлифтмаш» (Могилев, Беларусь)

ПЕРСПЕКТИВЫ ЗАМЕНЫ СТАЛЬНОГО ЛИТЬЯ ЩИТА ПОДШИПНИКОВОГО МАРКИ ТАД56 АДДИТИВНОЙ ПЕЧАТЮ ABS-ПЛАСТИКОМ

Аннотация

Представлены результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов работоспособности щита подшипникового с целью замены литейной технологии из стали на аддитивную технологию из ABS-пластика.

Ключевые слова:

компьютерное моделирование, оптимизационное проектирование, напряженно-деформированное состояние, ABS-пластик.

Для цитирования:

Леонович, И. А. Перспективы замены стального литья щита подшипникового марки ТАД56 аддитивной печатью ABS-пластиком / И. А. Леонович, Д. Д. Адинцов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2026. – № 2 (91). – С. 23–32.

Введение

Металлические детали машиностроительного профиля часто имеют сложную форму и выполняются методом литья с последующей обработкой. Часть из этих деталей, такие как кожухи, корпуса, запорные крышки и щиты, несут существенной нагрузки, а служат для ограждения работающих механизмов и могут выполняться из менее прочных материалов. В таких случаях будет эффективно аддитивное производство, в частности 3D-печать из полимерных материалов.

Объект исследования – щит подшипниковый задний ТАД56, входящий в конструкцию тягового асинхронного электродвигателя ТАД72-4-БМУ1, который является частью подвижного механизма в поворотной тележке трамвая 71-931М «Витязь М».

Щит выполняет важную роль в конструкции, поскольку является не только элементом корпуса, защищающим внутреннее пространство двигателя

от попадания влаги, грязи и пыли, но и обеспечивает дополнительную жесткость всей конструкции, передачу мощности и движения, т. к. в центральное отверстие в щите устанавливается подшипник, запрессованный на валу. Для лучшего отведения тепла от двигателя щиты проектируются с ребрами или другими элементами, увеличивающими площадь поверхности. В конструкцию щитов также входят вентиляционные отверстия, что обеспечивает постоянный поток воздуха от вентилятора двигателя к подшипникам, предотвращая их перегрев.

Щит имеет специальные места крепления электромеханической тормозной системы, места крепления защитной крышки вала, а также места соединения заземления со станиной электродвигателя.

В итоге щит подшипниковый имеет сложную форму и изготавливается из стали 25Л методом литья в песчано-глинистые формы на ОАО «Могилевлифтмаш». После отвердения отливка проходит

определенное количество операций, на которых удаляются элементы литниковой системы, обрабатываются поверхности согласно заданной шероховатости.

Учитывая вышеперечисленные конструктивные и функциональные особенности щита, в данной работе поставлена цель на основе имитационного моделирования его работоспособности доказать возможность замены литейной стали на ABS-пластик с применением аддитивного производства.

Разработка твердотельной модели щита подшипникового

Для создания трехмерной модели (рис. 1) использовался программный

комплекс SolidWorks 2024 (SP 0.1) [1]. Щит крепится к корпусу электродвигателя четырьмя болтами, поэтому для проведения компьютерного моделирования условия закрепления назначены как «зафиксированное крепление» по внутренней поверхности болтовых отверстий.

Щит, являясь опорой для вала двигателя через подшипник, воспринимает реактивное усилие величиной 2741 Н, которое определено исходя из сил, действующих на муфте и тормозном устройстве при скорости передвижения трамвая 40 км/ч и крутящем моменте на валу двигателя 1135 Н·м, веса вала и ротора.

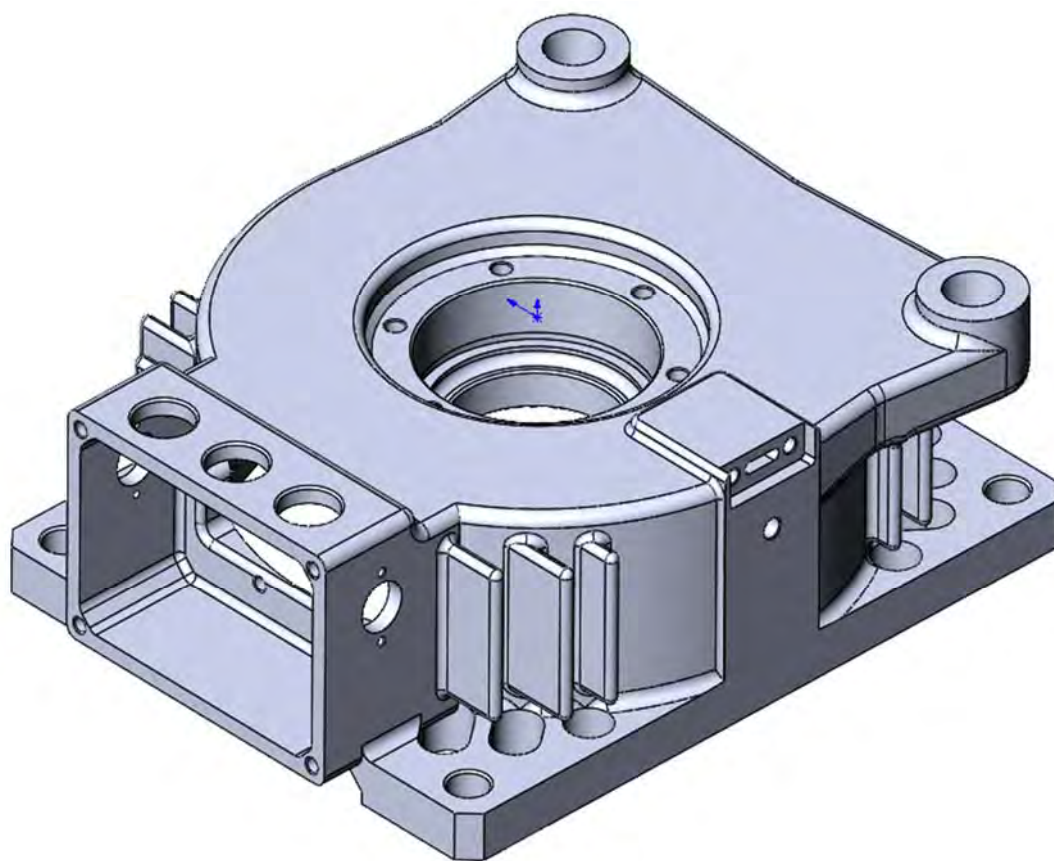


Рис. 1. Изометрия щита подшипникового заднего ТАД56

Указанное усилие распределяется по цилиндрической поверхности отк-

тия под посадку подшипника неравномерно, с положительным градиентом на

нижнюю часть от весовой нагрузки. Так как щит не является несущим элементом, весовая нагрузка постоянна, а цикличность приложения тормозного усилия неизвестна, решено провести только статический анализ его напряженно-деформированного состояния.

Конечно-элементная модель щита с указанием мест закрепления и приложения нагрузки показана на рис. 2.

Статический анализ напряженно-деформированного состояния щита

С помощью пакета SolidWorks Simulation был проведен статический анализ напряженно-деформированного состояния детали, выполненной из материала «Литая углеродистая сталь», свойства которого указаны на рис. 3.

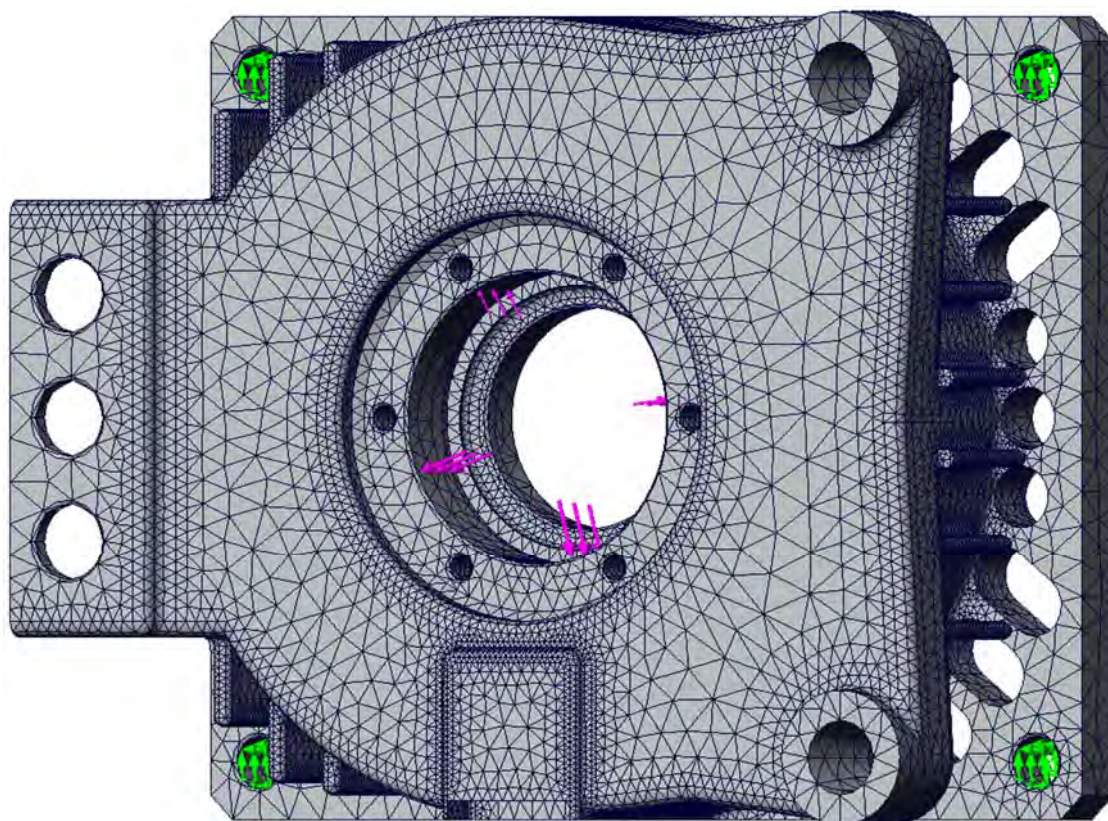


Рис. 2. Конечно-элементная модель щита ТАД56

Расчет показал незначительные максимальные напряжения для стальной детали: 3,318 МПа при значении предела текучести стали $\sigma_T = 248,168$ МПа. На рис. 4 приведена эпюра распределения напряжений Von Mises по наружной поверхности изделия.

На эпюре перемещений точек детали от действия заданной нагрузки (рис. 5) видно, что максимальные перемещения не превышают 0,002 мм, что

было вполне предсказуемо для стальной детали.

Так как деталь имеет сложную форму и в значительной степени недогружена, то следует рассмотреть вопрос о замене стали на пластик, литейной технологии производства – на аддитивную, например FFF/FDM-технологию.

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2e+11	Н/м ²
Коэффициент Пуассона	0.32	Не применимо
Модуль сдвига	7.6e+10	Н/м ²
Массовая плотность	7800	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	482549000	Н/м ²
Предел прочности при сжатии		Н/м ²
Предел текучести	248168000	Н/м ²
Коэффициент теплового расширения	1.2e-05	/К
Теплопроводность	30	W/(м·К)
Удельная теплоемкость	500	J/(кг·К)
Коэффициент демпфирования материала		Не применимо

Рис. 3. Механические свойства материала «Литая углеродистая сталь»

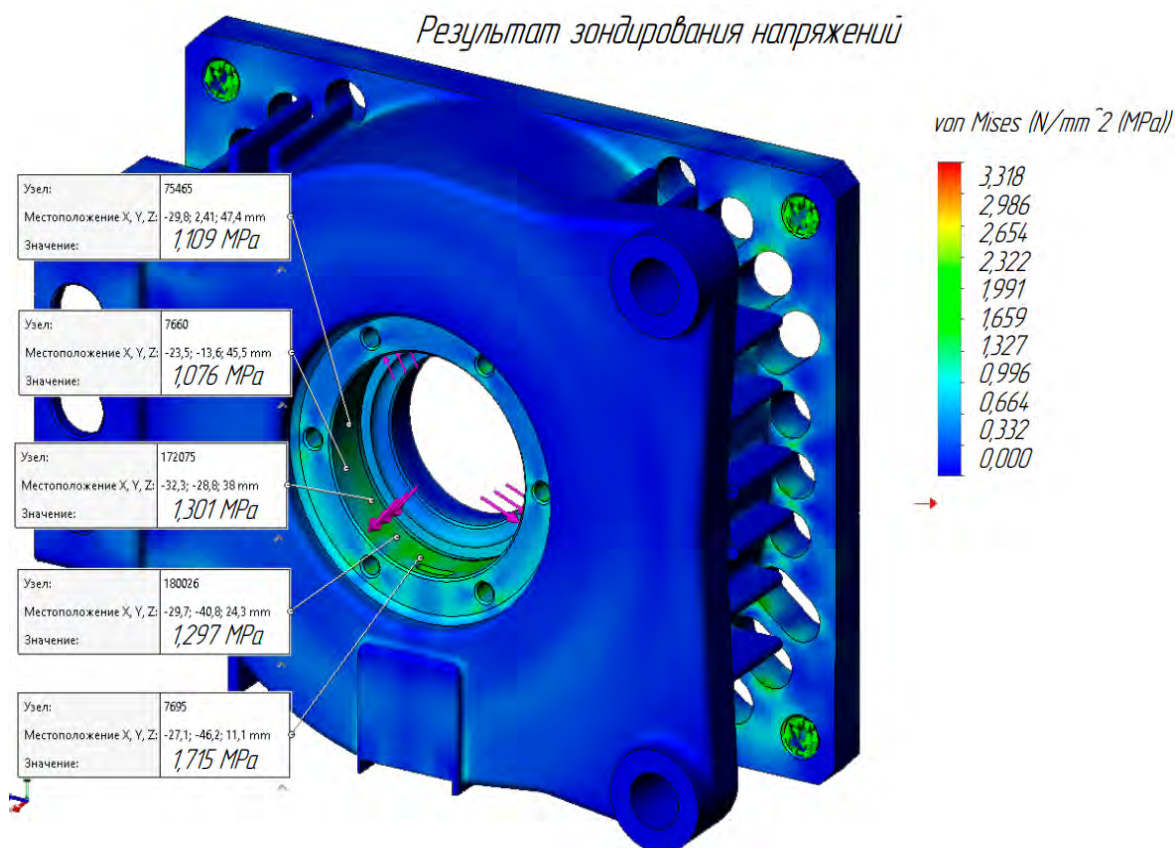


Рис. 4. Распределение напряжений Von Mises по поверхности щита из литой углеродистой стали

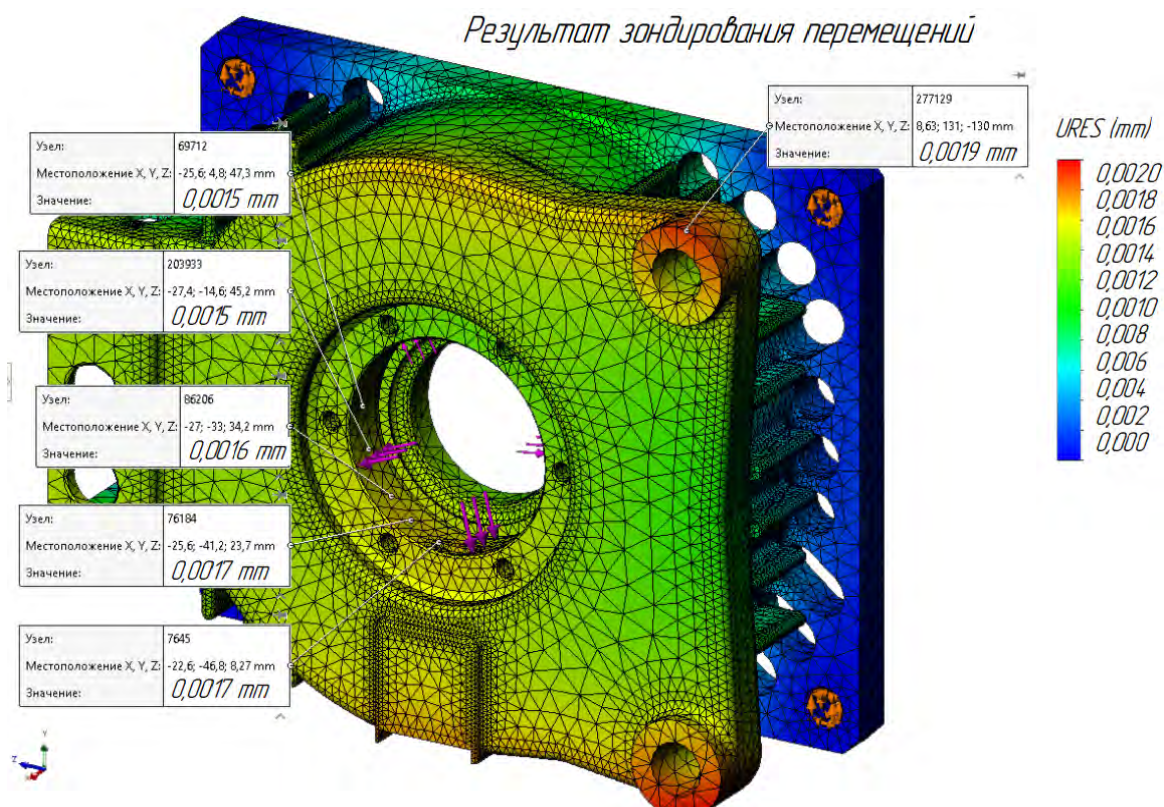


Рис. 5. Перемещения точек щита из литой углеродистой стали

Для материала щита вполне может подойти ABS-пластик с характеристиками, полученными экспериментальным путем в предыдущих исследованиях [2]. На принтере VSHAPER PRO при

100-процентном заполнении объема получены предел прочности при растяжении $\sigma_{pm} = 36,1$ МПа, модуль продольной упругости $E_p = 739$ МПа. Эти характеристики введены вручную в исходные данные расчета (рис. 6).

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	739000000	Н/м ²
Коэффициент Пуассона	0.36	Не применимо
Модуль сдвига	318900000	Н/м ²
Массовая плотность	1000	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	36100000	Н/м ²
Предел прочности при сжатии		Н/м ²
Предел текучести	35000000	Н/м ²
Коэффициент теплового расширения		/К
Теплопроводность	0.2256	W/(м·К)
Удельная теплоемкость	1386	J/(кг·К)
Коэффициент демпфирования материала		Не применимо

Рис. 6. Механические свойства ABS-пластика

На рис. 7 показано распределение напряжений по поверхности пластикового щита, которое мало отличается от распределения напряжений по поверхности стального щита: максимальное напряжение составило 3,335 МПа. Учитывая характеристики прочности ABS-пластика (см. рис. 6), деталь имеет большой запас прочности, что нивелирует неточность определения внешней

нагрузки ввиду особенностей эксплуатации подвижного транспорта.

В результате замены материала «Литая углеродистая сталь» на АВС-пластик была существенно снижена масса детали с 18,4 до 2,16 кг, т. е. на 88,26 %.

Однако, по сравнению со стальной деталью, значительно выросли деформации (эпюра перемещений в пластиковом щите показана на рис. 8).

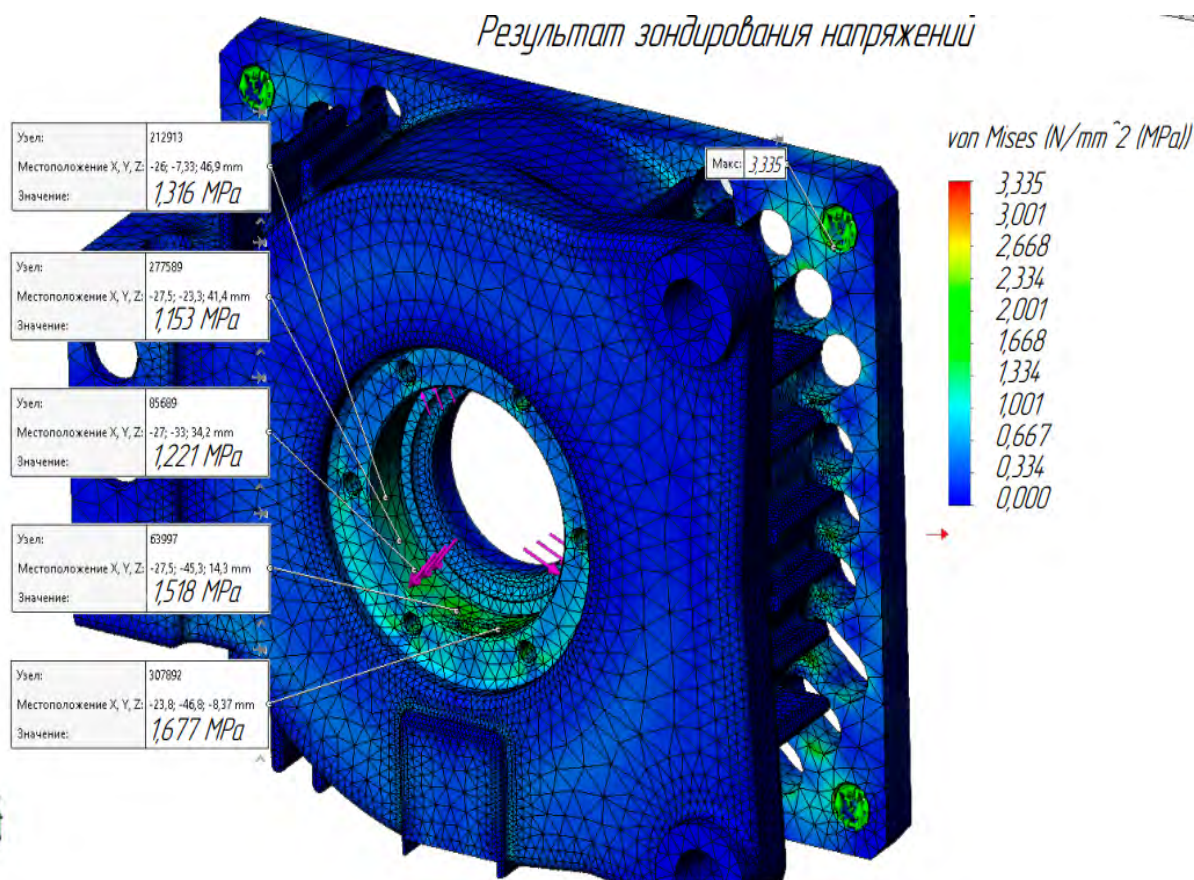


Рис. 7. Распределение напряжений Von Mises по поверхности щита из ABS-пластика

Максимальные перемещения составили 0,543 мм, что в 270 раз больше, чем в стальной детали. Многократный рост деформаций ABS-пластика, по сравнению со сталью, объясняется его низким модулем упругости (739 МПа) по сравнению с показателем стали (200000 МПа). В наибольшей степени деформировались места для крепления

тормозной системы, что может быть небезопасно.

Оптимизация конструкции щита подшипникового

Изменение конструкции щита производилось с целью увеличения его жесткости для исключения эффекта

биения в работе двигателя и надежности крепления тормозной системы. Снижение напряжений не имеет первосте-

пенного значения, т. к. результаты расчетов показали большой запас прочности ABS-пластика при действующей на щит нагрузке.

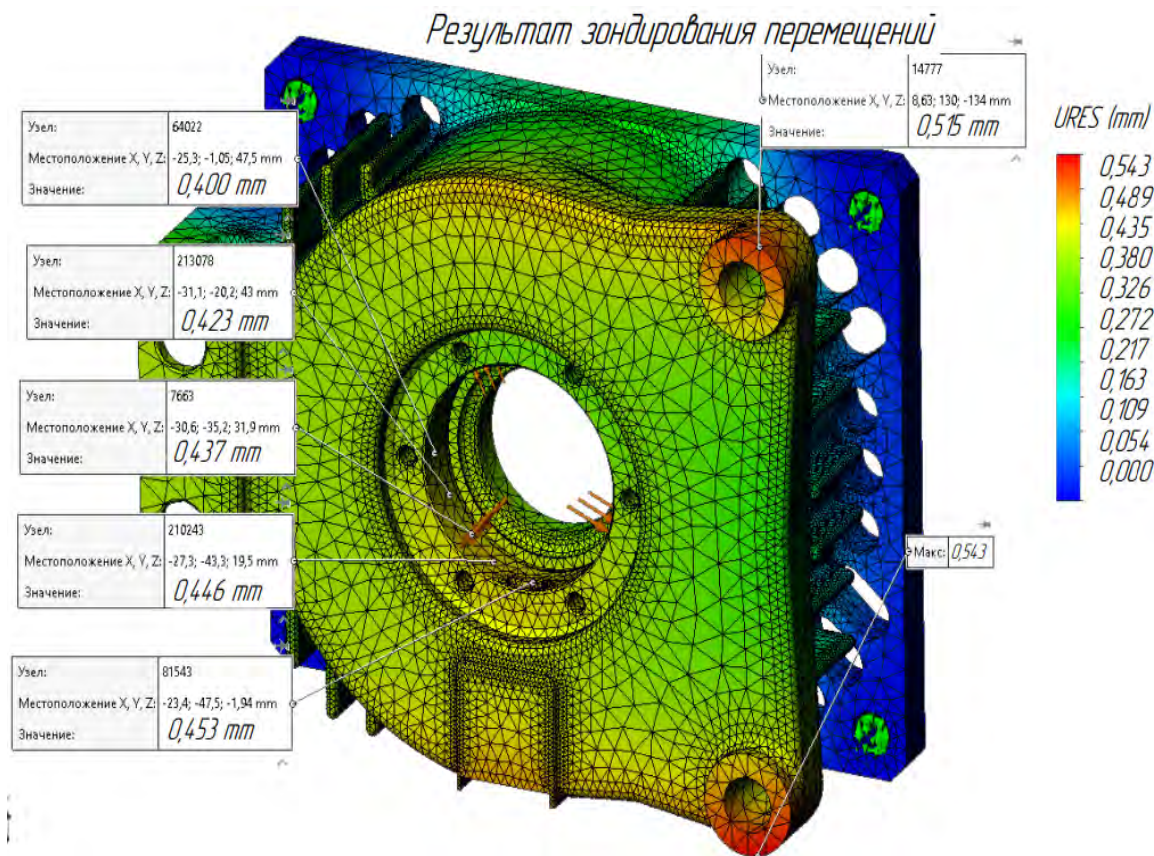


Рис. 8. Распределение перемещений в щите из ABS-пластика

На рис. 9 показана твердотельная модель оптимизированной конструкции щита подшипникового. С целью увеличения жесткости ребра охлаждения были удлинены до слияния с нижней плитой, вокруг отверстия под подшипник добавлено шесть ребер жесткости. Для более лаконичной формы, которую позволяет создать 3D-печать, удалена часть материала, которая не несет силовой нагрузки. На базе разработанной конечно-элементной модели произведен расчет и определены данные о напряженно-деформированном состоянии спроектированной детали.

На рис. 10 приведена эпюра распределения напряжений Von Mises по

поверхности изделия, согласно которой максимальные напряжения составили 2,547 МПа, что меньше, чем у базового варианта (3,335 МПа).

На рис. 11 приведена эпюра распределения перемещений от заданной нагрузки. Максимальные перемещения обнаружались на нижней поверхности центрального отверстия и составили 0,317 мм, что на 50 % меньше, чем в исходной детали из ABS-пластика (0,453 мм). Самые высокие деформации ранее наблюдались в области отверстий под крепление электромеханической тормозной системы. В результате оптимизации конструкции их значения удалось снизить с 0,543 до 0,154 мм,

т. е. на 71,6 %.

При плотности АВС-пластика 1000 кг/м³ масса щита уменьшилась

с 2,16 до 1,99 кг, при этом площадь поверхности увеличилась с 0,47 до 0,5 м².

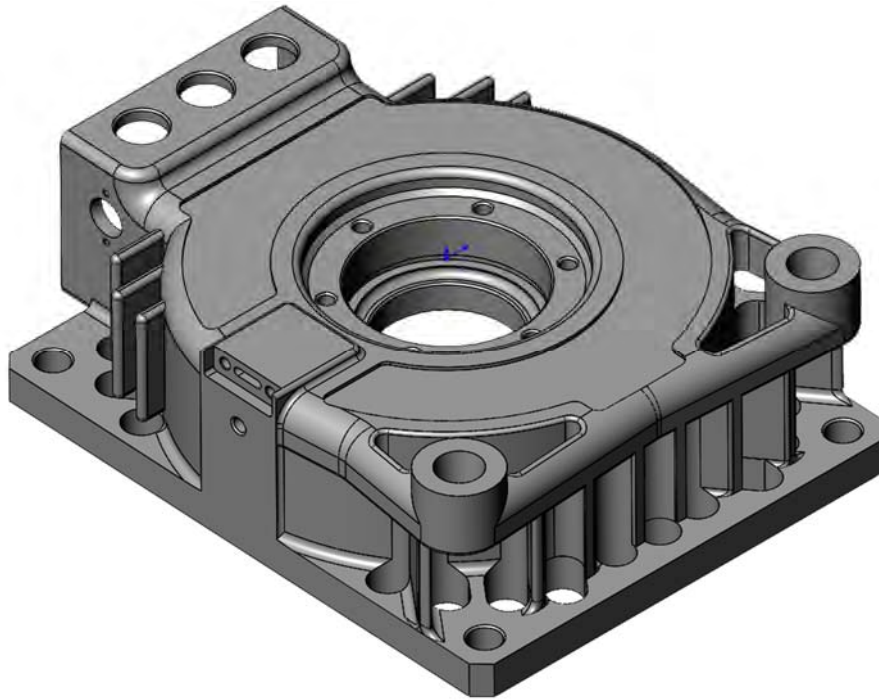


Рис. 9. Изометрия оптимизированного варианта щита подшипникового

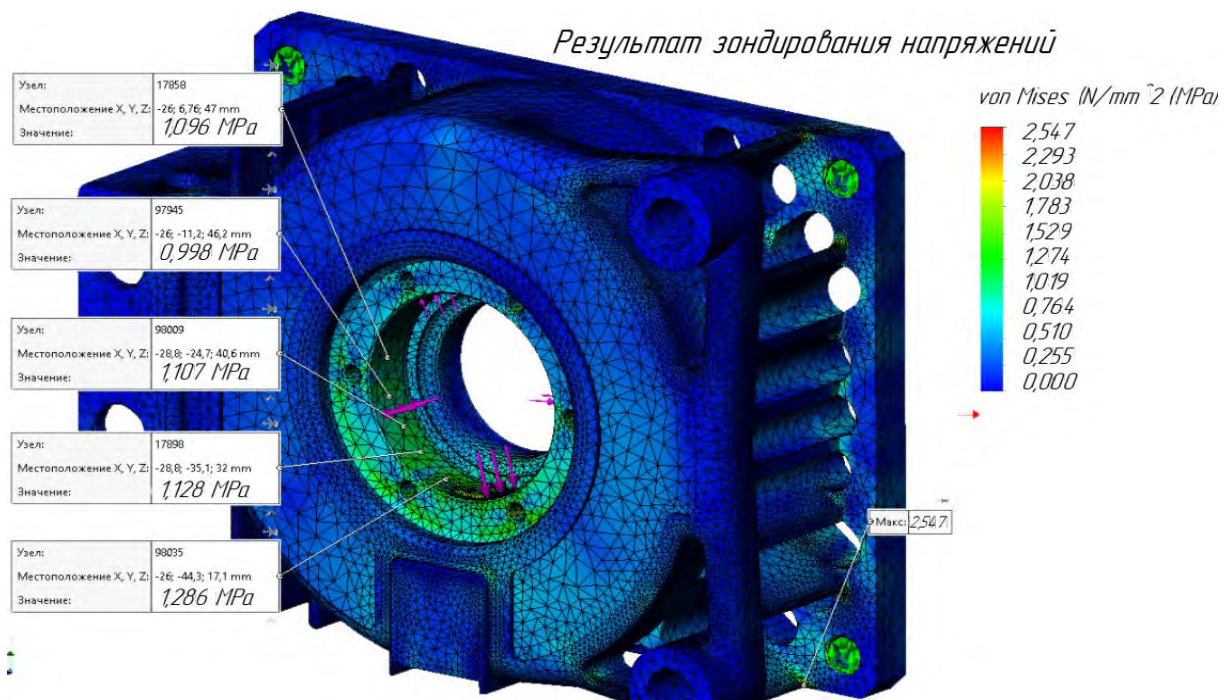


Рис. 10. Распределение напряжений Von Mises по поверхности оптимизированного щита из АВС-пластика

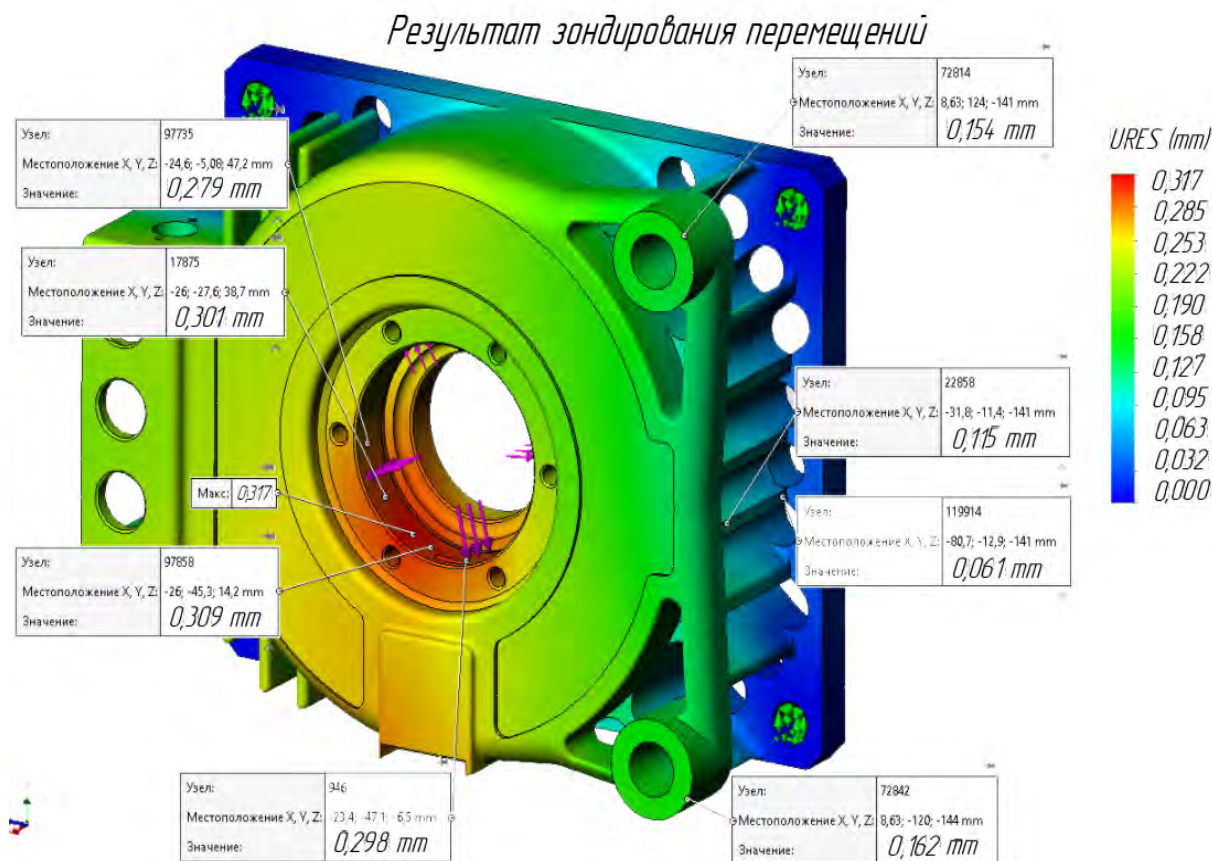


Рис. 11. Распределение перемещений в оптимизированном щите из ABS-пластика

Сравнение расчетных величин базового и оптимизированного вариантов щита из ABS-пластика показало существенный выигрыш по основным параметрам. Напряжения удалось снизить по максимальному значению на 23,6 %, по наиболее нагруженной нижней точке центрального отверстия этот показатель достигает 27,5 %. Максимальные перемещения снизились на 41,6 % (0,317 мм вместо 0,543 мм) и переместились, что важно, в менее ответственные части конструкции.

Заключение

1. Проведено компьютерное моделирование щита подшипникового заднего ТАД56 в программном комплексе SolidWorks 2024.

2. С учетом действующей нагрузки и условий закрепления создана конечно-

элементная модель и проведен статический анализ напряженно-деформированного состояния стального щита в среде SolidWorks Simulation. Расчет показал, что стальной щит обладает слишком большим запасом прочности: максимальные напряжения составили 3,318 МПа при значении предела текучести стали $\sigma_T = 248,168$ МПа.

3. Рассмотрена возможность замены литейной стали на ABS-пластик, механические характеристики которого получены в результате ранее проведенных исследований. Проведенный статический анализ напряженно-деформированного состояния пластикового щита показал, что деталь обладает также большим запасом прочности (максимальные напряжения составили 3,335 МПа при значении предела текучести пластика $\sigma_T = 35$ МПа), но ввиду низкой модульности материала ($E_p = 739$ МПа)

максимальные перемещения составили значительную величину в области крепления тормозной системы: 0,543 мм.

4. Параметрическая оптимизация конструкции щита позволила увеличить его жесткость при одновременном уменьшении веса с 2,16 до 1,99 кг (вес стального щита составлял 18,4 кг). Существенно изменилась конструкция щита: добавлены и увеличены ребра жесткости, убран «лишний» материал, не влияющий на передачу нагрузки и целостность детали. В области крепления подшипника перемещения точек уменьшились на 50 %, в отверстиях для

крепления тормозной системы перемещение уменьшилось на 71,6 %. На поверхности контакта с подшипником максимальное напряжение составило 1,286 МПа, что незначительно для ABS-пластика.

5. ABS-пластик обладает достаточной прочностью и жесткостью для изготовления щита подшипникового, удобен для производства деталей сложной формы методом FFF/FDM-технологии. Вес щита при замене стали на пластик в оптимизированном варианте конструкции уменьшится на 89,2 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алямовский, А. А.** SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2015. – 562 с. : ил.
2. **Леонович, И. А.** Исследование свойств ABS-пластика в образцах, полученных по технологии FFF-печати / И. А. Леонович, Д. Д. Адинцов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 1. – С. 13–21.

Статья сдана в редакцию 2 февраля 2026 года

Контакты:

loleonia@gmail.com (Леонович Ирина Анатольевна);
adintsov.daniil@mail.ru (Адинцов Даниил Дмитриевич).

I. A. LEANOVICH, D. D. ADZINTSOV

PROSPECTS FOR REPLACING STEEL CASTING OF THE TAD56 BEARING SHIELD WITH ABS PLASTIC ADDITIVE PRINTING

Abstract

The results of finite element computer simulation of the bearing shield performance are presented with the aim of replacing steel casting technology with ABS plastic additive manufacturing.

Keywords:

computer modeling, optimization design, stress-strain state, ABS plastic.

For citation:

Leanovich, I. A. Prospects for replacing steel casting of the TAD56 bearing shield with ABS plastic additive printing / I. A. Leanovich, D. D. Adzintsov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2026. – № 2 (91). – P. 23–32.