

Н.С. Горбунова<sup>1</sup>, Е.Ю. Дульский<sup>1</sup>, П.Ю. Иванов<sup>1</sup>, А.А. Хамнаева<sup>1</sup>, Н.Н. Новиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

## ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ АВТОТОРМОЗНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Аннотация.** В статье описан опыт применения аддитивных технологий, в частности, использование 3D-печати при проектировании и разработке автотормозного оборудования на примере корпуса стабилизатора крана машиниста условный № 395. Отмечены значения и эффективность современного применения систем компьютерного моделирования и аддитивных технологий. Рассмотрена возможность применения аддитивных технологий на основе расчетов с использованием метода конечных элементов в программе Autodesk Inventor. Представленные результаты расчетов дают возможность выбора типа пластика для промышленной 3D-печати. Проведенный анализ МКЭ показывает, что рассматриваемые термoplastики, учитывая возникающие в них напряжения и максимальные деформации, в дальнейшем будущем могут быть использованы на железнодорожном производстве при оперативной замене комплектующих.

**Ключевые слова:** автотормозное оборудование, аддитивные технологии, 3D-печать, метод конечных элементов, система автоматизированного проектирования.

N.S. Gorbunova<sup>1</sup>, E.Yu. Dulsky<sup>1</sup>, P.Yu. Ivanov<sup>1</sup>, A.A. Khamaeva<sup>1</sup>, N.N. Novikov<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

## APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE DESIGN AND MANUFACTURE OF AUTO-BRAKE EQUIPMENT

**Abstract.** The article describes the experience of using additive technologies, in particular, the use of 3D printing in the design and development of automatic braking equipment on the example of a crane stabilizer housing for a crane operator, conditional number 395. Values noted the effectiveness of modern application of computer modeling systems and additive technologies. The possibility of using additive technologies based on finite element calculations in Autodesk Inventor is considered. The presented calculation results allow you to choose the type of plastic for industrial 3D printing. FEM analysis shows that the considered thermoplastics, taking into account the stresses and maximum deformations occurring in them, can in the future be used in railway production with the prompt replacement of components.

**Keywords:** auto-brake equipment, additive technologies, 3D printing, finite element method, automated design system.

### Введение

Цифровизация и информатизация в производстве и промышленности в целом в настоящее время является актуальной задачей, знаменующей вступление в новую эпоху индустриализации. Цифровизация обеспечивает предприятиям высокую гибкость в формировании бизнес-моделей и широкий охват потенциальной клиентской базы посредством интеграции киберфизических систем и интернета вещей в производственный процесс. В основе внедрения новых технологий лежит стремление к комплексному повышению эффективности и созданию условий для успешной работы предприятия. Одним из современных цифровых направлений на производстве уже несколько лет являются аддитивные технологии.

В данной статье в качестве примера и объекта исследования выбран корпус стабилизатора крана машиниста №395.

### Аддитивные технологии при изготовлении элементов автотормозного оборудования

Аддитивные технологии используются для создания физических моделей, прототипов, образцов, инструментальной оснастки и производства пластиковых, металлических, керамических, стеклянных, композитных компонентов и компонентов из биоматериалов.

Мировыми лидерами в области аддитивных технологий на сегодняшний день являются США, занимающие более 50% рынка, далее с отставанием идут Япония, Германия, Китай. Россия же находится в этом списке лишь на 11-м месте и только начинает развиваться в этом направлении.

Принцип действия аддитивных установок основан на построении тонких горизонтальных слоев из 3D-моделей, созданных с помощью систем автоматизированного проектирования (САПР) и 3D сканеров.

Одно из преимуществ аддитивных технологий – возможность создания объектов сложной формы и структуры с высокой точностью. Среди других ключевых преимуществ – это снижение числа комплектующих частей создаваемых деталей.

Современная автотормозная техника не претерпевала существенных конструктивных изменений уже много десятков лет [1-2]. Аддитивные технологии в данном случае могут позволить существенно упростить процесс проектирования и испытания новых тормозных приборов, а возможно, в будущем и полностью обеспечить оперативное изготовление комплектующих с низкой себестоимостью [3-5].

### Современные виды пластика для 3D печати

В настоящее время 3D печать используется в первую очередь при прототипировании, однако, уже существует промышленная 3D печать, позволяющая изготавливать высокоточные детали, оптимизируя конструкцию, в том числе и из металла, к примеру, в самолетостроении (рисунок 1).

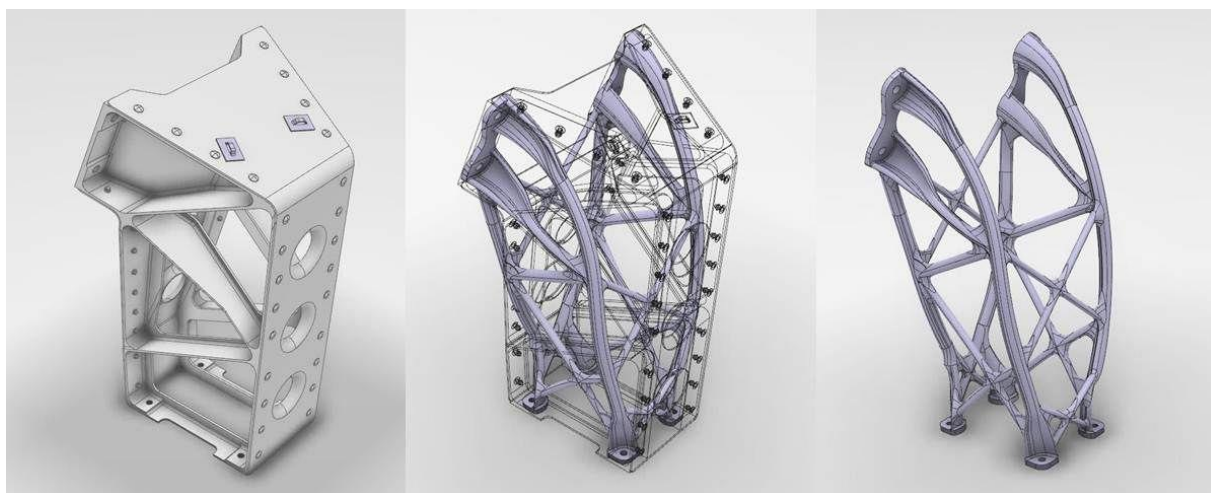


Рис. 1. Пример гибридного проектирования и 3D печати в самолетостроении

Используемые материалы во многом определяют назначение и область применения аддитивных технологий. В настоящее время круг применяемых материалов довольно широк, но больше все применяются разные пластики. В данной статье будут рассматриваться пластики, применяемые в промышленном производстве, такие как: ABS, ПК/ABS, PETG, PLA, HIPS, FLEX, NYLON, POM, ULTEM, PEEK [7-8]. Физические свойства пластиков представлены в таблице 1.

Таблица 1 – физические свойства пластиков.

| Пластик | Модуль упругости, ГПа | Коэффициент Пуассона, бр | Плотность, г/см <sup>3</sup> |
|---------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|
| ABS     | 0,811594              | 0,38                     | 1,06                         |
| ПК/ABS  | 0,992857              | 0,4                      | 0,357                        |
| PETG    | 0,973149              | 0,417                    | 1,541                        |
| PLA     | 0,0033                | 0,38                     | 1,25                         |
| HIPS    | 0,569853              | 0,36                     | 1,05                         |
| FLEX    | 0,964286              | 0,39                     | 1,1                          |

|       |         |      |      |
|-------|---------|------|------|
| NYLON | 1,08519 | 0,35 | 1,13 |
| POM   | 2,6     | 0,38 | 1,39 |
| ULTEM | 2,85    | 0,33 | 1,27 |
| PEEK  | 4,1     | 0,33 | 1,3  |

### Конечно-элементный анализ деталей из разных видов пластика

С целью оценки применимости 3D печати для прототипирования новых элементов тормозного оборудования с помощью 3D сканирования была получена высокоточная 3D модель корпуса стабилизатора крана машиниста условный №395. Для данной модели был проведен конечно-элементный анализ со сравнением результатов при изменении материалов, представленных в таблице 1.

Расчет на прочность – обязательное условие при проектировании и изготовлении ответственных изделий. Важно знать, как поведет себя деталь в реальных условиях эксплуатации под воздействием всех нагрузок.

Одним из наиболее распространённых современных численных методов расчёта является МКЭ, который лежит в основе большинства программных комплексов, служащих для выполнения инженерного проектирования с использованием электронно-вычислительной техники [6]. Он позволяет рассчитать деталь различной формы при любых нагрузках и закреплениях. Поэтому этот метод свободен от большого количества допущений, ограничивающих их точность, при получении аналитических уравнений.

Прочностной расчёт конструкции при помощи метода конечных элементов включает в себя следующие этапы:

- построение трёхмерной твердотельной модели и её последующее разбиение на конечные элементы;
- наделение конструкции свойствами, присущими настоящим материалам;
- определение действующих нагрузок и граничных условий, формируя конечно-элементную модель;
- расчёт для каждого конечного элемента матрицы жёсткости и вектора приведённой к узлам внешней нагрузки;
- формирование разрешающей системы линейных уравнений;
- решение ранее полученной системы, определение перемещений, напряжений, деформаций;
- прочностная оценка конструкции, выводы и рекомендации.

На этом этапе была поставлена задача подобрать оптимальный пластик для прототипирования.

В качестве нагрузок к корпусу стабилизатора было приложено распределенное давление на внутренние стенки, которое соответствует максимальному и равно 0,9 Мпа (рисунок 2).

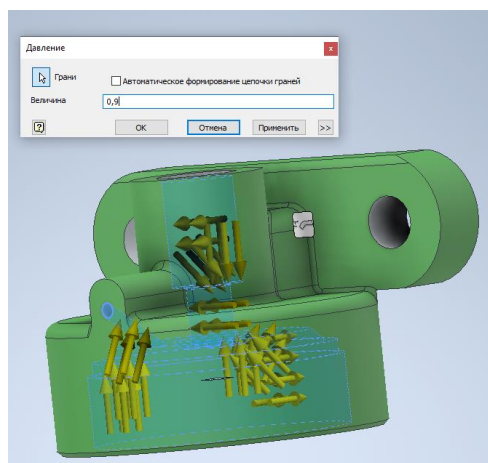


Рис. 2. Конечно-элементная модель с нагрузками и граничными условиями

### Обработка результатов КЭ анализа

На рисунке 3 представлены результаты расчета напряженно-деформируемого состояния корпуса стабилизатора крана машиниста.

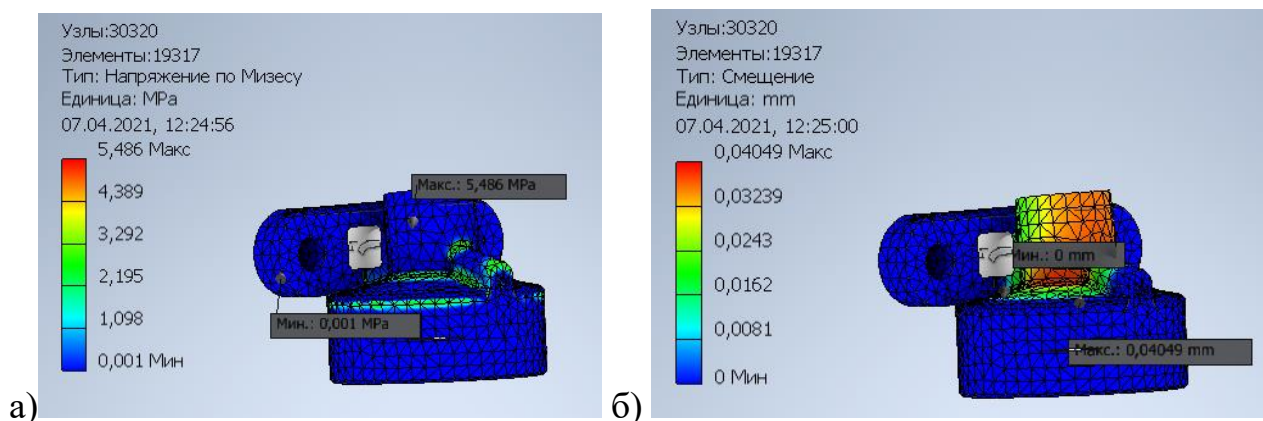


Рис. 3. Визуализация расчета напряженного состояния корпуса стабилизатора для ABS пластика: а – напряжение по Мизесу, МПа; б – смещения, мм

Результаты расчетов для остальных пластиков сведены в таблицу 2 для сравнения между собой.

Таблица 2 – Результаты расчетов

| Материал | Напряжение по Мизесу, МПа | Смещение, мм | Цена за 1 кг, руб |
|----------|---------------------------|--------------|-------------------|
| Алюминий | 5,60915                   | 0,000180409  | -                 |
| ABS      | 5,58578                   | 0,0404931    | 1390              |
| ПК/ABS   | 5,46253                   | 0,0326814    | 1390              |
| PETG     | 5,44253                   | 0,00329764   | 1590              |
| PLA      | 5,43662                   | 1,22352      | 1690              |
| HIPS     | 5,74858                   | 0,0675451    | 1490              |
| FLEX     | 5,33824                   | 0,0328074    | 1990              |
| NYLON    | 5,8991                    | 0,0350035    | 2100              |
| POM      | 5,77392                   | 0,0389631    | 3016              |
| ULTEM    | 7,56737                   | 0,0028765    | 36195             |
| PEEK     | 9,87431                   | 0,0022361    | 52450             |

Расчет показал, что использование пластиков сопоставимо со штатным материалом.

Проведенный расчет позволяет осуществить выбор материала пластика из таких параметров как напряжение по Мизесу и смещение. Анализируя результаты, представленные в таблице 2 можно сделать вывод, что для использования производства корпуса стабилизатора можно использовать такие пластики PEEK, ULTEM, POM, NYLON, HIPS, ABS [7-8].

PEEK, ULTEM – их минус дорогая стоимость за 1 кг пластика, но на данный момент эти пластики широко применяются в транспортном машиностроении (авиация и космос, автомобили, морские суда, поезда), оборонной промышленности, пищевой промышленности, медицинской промышленности в производстве инструментов, газовой и нефтяной промышленности. Они обладают лучшей износостойкостью и устойчивостью к испарению, чем титан и сталь.

POM, NYLON – эти пластики сложны в печати, они требуют контроля не только температуры сопла, но и температуры в камере принтера. Но их так же используют в производстве, зубчатые кольца, подшипники и шестерни с малыми зазорами.

HIPS, ABS – данные пластики очень похожи между собой, у них только незначительная разница в стоимости за 1 кг.

HIPS безопасен для пищевых продуктов и соответствует требованиям FDA для пищевой промышленности. В 3D-печати HIPS в основном используется в качестве вспомогательного материала, поскольку растворяется в d-лимонене, что избавляет пользователей от необходимости удаления лишних деталей с помощью абразивов.

ABS пластик и композиции на его основе нашли широкое применение в автомобилестроении, сюда относят решетки радиаторов, бамперы, облицовка дверей и окон, и другие детали салона. В приборо- и машиностроении, радио- и электротехнике его применяют для изготовления корпусов приборов, электроинструментов, аккумуляторов.

Из всех рассмотренных выше пластиков остановим свой выбор на ABS- пластике, во-первых, учитывая все его плюсы и минусы, приемлемую цену, простоту печати, будем использовать его.

### **3D печать деталей автотормозного оборудования**

В работе для печати использовался принтер DESIGNER PRO250 PICASO, представленный на рисунке 1. Принтеры PICASO 3D создают твердые трехмерные объекты из расплавленной нити термопластика методом послойного наложения.

Расплавленная пластиковая нить через печатающую головку подается на платформу, где послойным наплавлением создается тело модели.

Таким образом, 3D принтер отлично подходит для прототипирования и создания различных моделей на производстве, в офисе или дома.

В заключение получаем напечатанную модель нужного нам объекта.



**Рис. 4. Корпус стабилизатора крана машиниста после печати**

### **Заключение**

В дальнейшем планируется провести полноценные испытания изготовленного корпуса на пневматическом испытательном стенде.

Развитие аддитивных технологий является постоянным трендом во всех передовых странах. Если все эти передовые технологии собрать на одной производственной площадке, мы получим завод нового поколения. На такой «фабрике будущего» можно будет выпускать современную продукцию в разы быстрее и дешевле, чем на традиционных производствах.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов П.Ю. Исследование причин самопроизвольного срабатывания автотормозов грузовых поездов [текст] / П.Ю. Иванов, Н.И. Мануилов, Е.Ю. Дульский, А.М. Худаногов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 2. С. 399-403.
2. Иванов П.Ю. Исследование работы стабилизатора крана машиниста усл. № 395 [текст] / П.Ю. Иванов, Н.И. Мануилов, Е.Ю. Дульский, А.М. Худаногов // В сборнике: Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств. Материалы второй всероссийской научно-технической конференции. Омский государственный университет путей сообщения. 2017. С. 62-69.
3. Гончарова О.Н., Бережной Ю.М., Бессарабьев Е.Н., Кадамов Е.А., Гайнутдинов Т.М., Нагопатьян Е.М., Ковина В.М. Аддитивные технологии- динамично развивающееся производство// Научная электронная библиотека. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnye-tehnologii-dinamichno-razvivayusheesya-proizvodstvo>
4. Развитие 3D печати: от революции к эволюции. URL: <https://vc.ru/flood/43403-razvitie-3d-pechati-ot-revolyucii-k-evolyucii>
5. Рынок 3D печати в России и мире (Аддитивное производство), 2018. URL :<https://www.nanonewsnet.ru/news/2019/rynok-3d-pechati-v-rossii-mire-additivnoe-proizvodstvo-ap-additive-manufacturing-am-2018>
6. Иванов П.Ю. Математическое моделирование процесса нагрева изоляции обмотки статора асинхронной вспомогательной машины электровоза [текст] / // П.Ю. Иванов, В.М. Агафонов, Е.Ю. Дульский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 183-189.
7. Подробное руководство по выбору пластика для 3D печати. URL : <https://top3dshop.ru/blog/podrobnyj-gid-po-vyboru-plastika-dlja-3d-pechati.html>
8. Промышленные пластики для 3D печати: физико-механические характеристики, эксплуатационные свойства, области применения. URL : <https://3dtoday.ru/blogs/3dfirst/promyshlennye-plastiki-dlya-3d-pechati-fdm-fiziko-mekhanicheskie-kharakteristiki-ekspluatatsionnye-svoystva-oblasti-primeneniya>

## REFERENCES

1. Ivanov P.Yu. Investigation of the causes of spontaneous operation of automatic brakes of freight trains [text] / P.Yu. Ivanov, N.I. Manuilov, E.Yu. Dulsky, A.M. Khudonogov // Transport infrastructure of the Siberian region. 2017.Vol. 2.S. 399-403.
2. Ivanov P.Yu. Investigation of the work of the crane operator's stabilizer conv. No. 395 [text] / P.Yu. Ivanov, N.I. Manuilov, E.Yu. Dulsky, A.M. Khudanogov // In the collection: Innovative projects and technologies of machine-building industries. Materials of the second all-Russian scientific and technical conference. Omsk State Transport University. 2017.S. 62-69.
3. Goncharova.O.N., Berezhnoy.Yu.M.,BessaraboevE.N., Kadamov E.A., Gainutdinov T.M., Kovin V.M. Additive technologies- dynamically developing pduction// Scientific electronic library. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnye-tehnologii-dinamichno-razvivayusheesya-proizvodstvo>
4. Development of 3D printing: from revolution to evolution. URL: <https://vc.ru/flood/43403-razvitie-3d-pechati-ot-revolyucii-k-evolyucii>
5. 3D printing market in Russian and worldwide( Additive manufacturing), 2018. URL :<https://www.nanonewsnet.ru/news/2019/rynok-3d-pechati-v-rossii-mire-additivnoe-proizvodstvo-ap-additive-manufacturing-am-2018>
6. Ivanov P.Yu. Mathematical modeling of the heating process of the stator winding insulation of an asynchronous auxiliary machine of an electric locomotive [text] / // P.Yu. Ivanov, V.M. Agafonov, E.Yu. Dulsky // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2016. No. 1 (49). S. 183-189.

7. A detailed guide to choosing plastic 3D printing. URL : <https://top3dshop.ru/blog/podrobnyj-gid-po-vyboru-plastika-dlja-3d-pechati.html>
8. Industrial plastics 3D printing: physical and mechanical characteristics, performance properties, applications. URL : <https://3dtoday.ru/blogs/3dfirst/promyshlennye-plastiki-dlya-3d-pechati-fdm-fiziko-mekhanicheskie-kharakteristiki-ekspluatatsionnye-svoystva-oblasti-primeneniya>

### **Информация об авторах**

*Горбунова Наталья Сергеевна* – студент факультета «Транспортные системы», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: bandy8lama@gmail.com

*Дульский Евгений Юрьевич* – к. т. н., доцент, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: E\_Dulskiy@ssdigit.ru

*Иванов Павел Юрьевич* – к. т. н., доцент, доцент кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: P\_Ivanov@ssdigit.ru

*Хамнаева Алена Александровна* – Аспирант кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: alenalend95@mail.ru

*Новиков Николай Николаевич* – Аспирант кафедры «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск, e-mail: novikovnikolayn@mail.ru.

### **Authors**

*Natalia Sergeevna. Gorbunova* – Student of the Faculty of Transport Systems, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: bandy8lama@gmail.com

*Evgeny Yurievich Dulskiy* – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor the Subdepartment of Cars and carriage facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: E\_Dulskiy@ssdigit.ru

*Pavel Yurievich Ivanov* – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor the Subdepartment of Electric rolling stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: P\_Ivanov@ssdigit.ru

*Alyona Aleksandrovna Khamnaeva* – Post-graduate student of the Subdepartment of Electric rolling stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: alenalend95@mail.ru

*Nikolay Nikolayevich Novikov* – Post-graduate student of the Subdepartment, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: novikovnikolayn@mail.ru.

### **Для цитирования**

Горбунова Н.С. Применение аддитивных технологий при проектировании и изготовлении автотормозного оборудования [Электронный ресурс] / Н.С. Горбунова, Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов, А.А. Хамнаева, Н.Н. Новиков // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2021. – №1 (11). – Режим доступа: <http://mnv.irgups.ru/toma/111-2021>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.

### **For citation**

Gorbunova N.S., Dulskiy E.Yu., Ivanov P.Yu., Khamnaeva A.A., Novikov N.N. *Primeneniye additivnykh tekhnologiy pri proyektirovanii i izgotovlenii avtotormoznogo oborudovaniya* [Application of additive technologies in the design and manufacture of auto-brake equipment]. *Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal], 2021, no. 1 (11).