

Транспортные системы Transport systems

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.023.2

doi: 10.30987/2782-5957-2023-6-43-51

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Дмитрий Валерьевич Осипов^{1✉}, Павел Юрьевич Иванов², Евгений Юрьевич Дульский³, Константин Евгеньевич Пронин⁴

^{1,2,3,4} Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

¹ Osipovdnor@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2108-646X>

² Ivanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6836-5928>

³ e.dulskiy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6637-3104>

⁴ prontoM.irk@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5340-0670>

Аннотация

Аддитивные технологии представлены различными способами 3d-печати и находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности во всем мире. Например, печать металлическими порошками применяется для производства таких элементов конструкций как различные кронштейны в авиастроении или изготовления корпусов космических аппаратов. Применение же 3d-печати с использованием полимерных материалов позволяет изготавливать, например, различные шестерни для неответственных механизмов. Также актуальность имеет применение подобной технологии в пневматике. Однако, при этом, возможность применения данных технологий для изготовления различных пневматических устройств на сегодняшний день не имеет широких исследований. В ходе изучения данного вопроса изготовлен пневматический редуктор. Однако, было выявлено, что одной из проблем, не позволяющей спроектировать и изготовить нормально функционирующее пневматическое устройство, является неизвестная величина коэффициента трения материалов, из которых изготавливаются его элементы.

Целью данного исследования является установление коэффициента трения покоя изделий, изготовленных из полимерных материалов при по-

мощи технологий 3d-печати. Необходимость данного исследования обусловлена проблемами, возникшими в результате проведения испытаний высокопроизводительного пневматического редуктора, изготовленного при помощи аддитивных технологий с применением различных полимерных материалов. Основной проблемой данного устройства является нарушение плотности неподвижных разъемных соединений частей корпуса и крышек редуктора. Так как уплотняемая среда – сжатый воздух, находящийся под давлением 0,9 МПа, то любое нарушение плотности может привести к разрушению редуктора или к потерям воздуха из тормозной системы грузового поезда в связи с увеличением количества утечек в трубопроводе для дополнительного питания запасного резервуара.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента трения различных видов материалов, применяемых при 3D-печати. Полученные коэффициенты трения требуются для проектирования уплотнений пневматических приборов по общепринятым методикам.

Ключевые слова: технологии, редуктор, тормоза, подвижной состав, коэффициент, трение, уплотнитель, герметизирующая среда.

Ссылка для цитирования:

Осипов В.Д. Исследование коэффициента трения полимерных материалов для 3D-печати элементов конструкции подвижного состава / Д. В. Осипов, П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, К. Е. Пронин // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 06. – С. 43-51. doi: 10.30987/2782-5957-2023-6-43-51.

Original article

Open Access Article

STUDY OF THE FRICTION FACTOR OF POLYMER MATERIALS FOR 3D PRINTING OF ROLLING STOCK STRUCTURAL ELEMENTS

Dmitry Valeryevich Osipov^{1✉}, Pavel Yuryevich Ivanov², Evgeny Yuryevich Dulskiy³, Konstantin Evgenyevich Pronin⁴

^{1,2,3,4} Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

¹ Osipovdnor@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2108-646X>

² Ivanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6836-5928>

³ e.dulskiy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6637-3104>

⁴ prontoM.irk@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5340-0670>

Abstract

Additive technologies are represented by various methods of 3D printing and are increasingly being used in various industries around the world. For example, printing with metal powders is used for the production of such structural elements as various arm supports in the aircraft industry or the manufacture of spacecraft hulls. The use of 3D printing with the use of polymer materials makes it possible to manufacture, for example, various gears for non-principle mechanisms. The use of such technology in pneumatics is also relevant. However, at the same time, the possibility of using these technologies for the manufacture of various pneumatic devices has not been widely studied up to now. In the course of studying this issue, a pneumatic gearbox was made. However, it was found out that one of the problems that does not allow to design and manufacture a normally functioning pneumatic device is an unknown value of friction factor of the materials of which its elements are made.

The study objective is to find out the static friction factor of products made of polymer materials us-

ing 3D printing technologies. The necessity of this study is explained by the problems that arose as a result of testing a high-performance pneumatic gearbox manufactured using additive technologies applying various polymer materials. The main problem of this device is the density violation of fixed detachable joints of gearbox case parts and covers. Since the medium to be used is compressed air under a pressure of 0.9 MPa, any density violation can lead to the gearbox destruction or to air losses from the braking system of a freight train due to an increase in the number of leaks in the pipeline for additional power supply to the spare reserve.

The paper presents the results of experimental studies on finding the friction factor of various types of materials used in 3D printing. The obtained friction factors are required for the design of seals of pneumatic devices according to generally accepted methods.

Keywords: technologies, gearbox, brakes, rolling stock, coefficient, friction, sealer, sealing medium.

Reference for citing:

Osipov DV, Ivanov PYu, Dulskiy EYu, Pronin KE. Study of the friction factor of polymer materials for 3D printing of rolling stock structural elements. *Transport Engineering*. 2023; 6:43-51. doi: 10.30987/2782-5957-2023-6-43-51.

Введение

На сегодняшний день аддитивные технологии – это активно развивающееся направление в различных транспортных сферах. Например, для аэрокосмической техники, технологии 3d-печати (SLS – метод) служат не только для топологической оптимизации уже существующих элементов конструкции, наиболее подверженных отказам, но и для изготовления различных элементов конструкции двигателей внутреннего сгорания, турбин, корпусов и др [1,2].

На железнодорожном транспорте более широкое распространение получила 3d-печать полимерными материалами (FDM-метод). Так, например, в Велико-

британии на 3d-принтерах изготавливают элементы салона: подлокотники, поручни, столики, в Нидерландах – разъемы громкоговорителей, рамки панелей управления бортовых устройств в кабине машиниста, а в Латвии – рукоятки реверсоров, замки ЭПК автостопа, различные коннекторы. В России также для аддитивных технологий разрабатывается нормативная документация [3] и уже начинаются попытки внедрения в производство, так в моторвагонном депо Иркутск-Сортировочный при помощи технологий 3d-печати изготовили прототип рукоятки поездной радиостанции.

Однако 3d-печать полимерными материалами обладает значительно большим

потенциалом. Например, изготовление с помощью данных технологий современных пневматических устройств на железнодорожном транспорте позволит значительно повысить эффективность работы пневматического тормоза на грузовом подвижном составе [4], что в свою очередь поможет более точно установить влияние величины нагрева тормозной колодки на коэффициент трения между колодкой и поверхностью катания колеса [5, 6, 7, 8].

Так, первый опыт применения аддитивных технологий в при прототипировании новых тормозных приборов, позволил подтвердить эффективность пневматического редуктора из полимерных материалов, служащего для модернизации тормозной системы грузового поезда. Данное устройство позволяет повысить эффективность сраба-

тывания пневматического тормоза более чем на 30% [9, 10]. Но в процессе проведения испытаний устройства был выявлен существенный недостаток, связанный с нарушением герметичности неподвижных разъемных соединений элементов корпуса редуктора. Данная проблема, в первую очередь связана с тем, что в процессе проектирования пневматического устройства не учтено влияние коэффициента трения материалов, из которых изготовлен редуктор. Коэффициент трения влияет на устойчивость уплотнителя против действия на него избыточного давления сжатого воздуха [11]. В связи с вышесказанным необходимо установить величину коэффициентов трения различных материалов для 3d-печати, а также влияние данного коэффициента на устойчивость уплотнителя.

Исследование коэффициента трения материалов для 3d-печати

Так как все соединения в пневматическом редукторе, для которых требуется выполнить уплотнение, чтобы устранить утечки сжатого воздуха в атмосферу, статичны, то необходимо исследовать именно коэффициент трения покоя. Для решения этой задачи можно воспользоваться случаем, когда тело покоится на наклонной плоскости. В этом случае максимальный коэффициент трения покоя будет равен

тангенсу максимального угла наклона плоскости, при котором тело начнет поступательное движение вниз.

Для проведения данного исследования на 3d-принтере напечатана установка (рис. 1), позволяющая устанавливать поверхности, изготовленные из различных материалов, а также менять угол наклона плоскости.

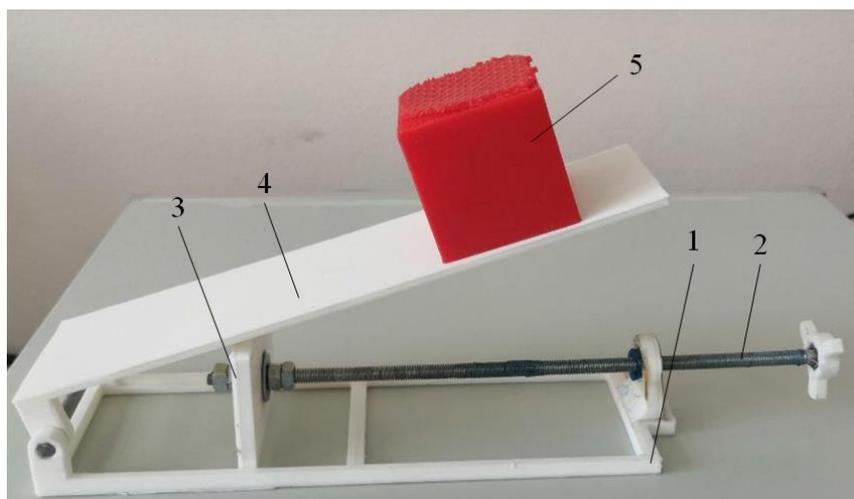


Рис. 1 – Установка для определения коэффициента трения покоя
1 – станина с направляющими; 2 – регулировочный винт; 3 – подвижная опора;
4 – сменная наклонная плоскость; 5 – образец для испытания
*Fig. 1 – Installation for determining the coefficient of rest thor
1 – frame with guides; 2 – adjusting screw; 3 – movable support;
4 – replaceable inclined plane; 5 – test sample*

Установка состоит из станины 1, на которой закрепляется сменная поверхность 4, на которой устанавливается образец для испытания 5. Станина и наклонная поверхность имеют направляющие для скольжения подвижной опоры 3 для исключения перекоса опоры во время перемещения. Регулировочный винт 2 предназначен для перемещения подвижной опоры вдоль станины. Перемещение опоры приводит к изменению угла наклона плоскости, на которой покоится образец.

В качестве объекта исследования были выбраны наиболее распространенные материалы для 3d-печати. К таким материалам относятся пластики ABS, PLA и PETG. Особое внимание стоит уделить именно PETG пластику, так как именно из него изготовлены части корпуса пневматического редуктора.

По этой причине для испытательной установки изготовлены три сменные поверхности из выше указанных материалов. Также в процессе конструирования пневматического редуктора в качестве материала для изготовления уплотнительных прокладок использовался обладающий эластомерными свойствами пластик FLEX и силиконовый герметик-прокладка, из которого изготавливались уплотнительные кольца. Помимо этого в конструкции пневматического редуктора пластиковые крышки могут быть заменены металлическим, с целью придания большей жесткости и прочности устройству. Следовательно, также необходимо установить коэффициент трения между данными материалами и материалами, из которых изготовлены наклонные поверхности. С этой целью были изготовлены шесть образцов, представленных на рис. 2.

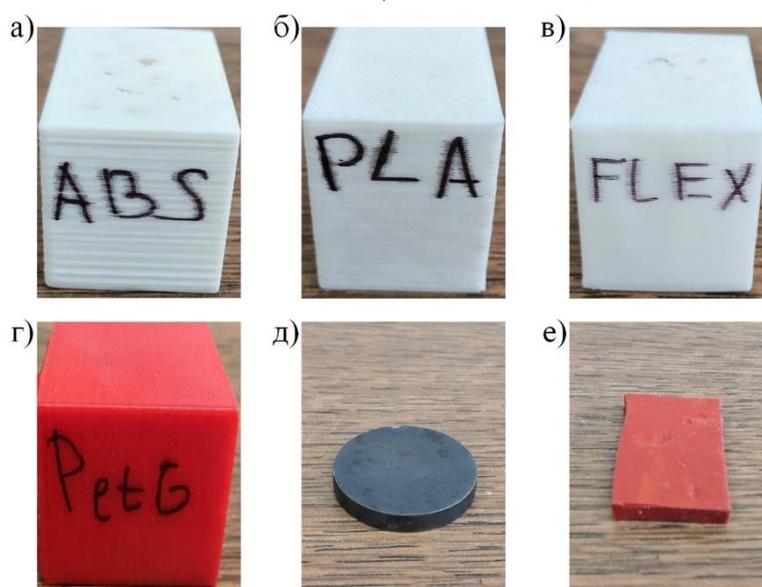


Рис. 2. Испытательные образцы из материалов: а) ABS пластик; б) PLA пластик; в) FLEX пластик; г) PETG пластик; д) металл; е) фрагмент уплотнения из силиконового герметика-прокладки
Fig. 2. Test samples made of materials: a) ABS plastic; б) PLA plastic; в) FLEX plastic; г) PETG plastic; е) metal; ф) a fragment of a seal made of silicone hermetic gaskets

Коэффициент трения зависит не только от свойств материала, но также и от качества обработки контактирующих поверхностей. В процессе печати на 3d-принтере, на деталях могут наблюдаться три характерных вида поверхности для такого способа производства изделий. Например, на той грани изделия, с которой

начинается синтез всего объекта, т.е. она непосредственно контактирует со столом 3d-принтера, образуется рельеф, зависящий от материала, из которого изготовлен сам стол.

Также рельеф нижней, боковых и торцевых граней отличаются. На боковых гранях образуются неровности в результа-

те послойного наплавления пластика. Рельеф же верхней грани, на которой заканчивается процесс печати, имеет ярко выраженные полусферические образования по краям и весьма крупные широкие линии финального слоя. В связи с этим также необходимо установить величину коэффициента трения при контакте поверхностей с различным рельефом, а также величину коэффициента трения после обработки контактирующих поверхностей мелкозернистой наждачной бумагой, с целью устранения всех дефектов, обусловленных самим способом изготовления изделий. Исключением будет являться пластик FLEX, так как он обладает свойствами эластомеров, с помощью наждачной бумаги выровнять поверхность не представляется возможным. В ходе эксперимента были испытаны различные сочетания материалов по критерию обработки. В результате проведенных экспериментов были получены коэффициенты трения обработанных и необработанных поверхностей трущихся

пар, а также обработанной поверхности образцов и необработанной поверхности плоскости.

На рис. 3, 4 и 5 представлены величины коэффициентов трения, определённые для образцов, установленных на наклонной плоскости, изготовленной из PETG, PLA и ABS пластиков соответственно. При этом установка образцов осуществлялась на грани с различным рельефом.

Проанализировав полученные в ходе экспериментального исследования данные, можно сделать вывод о том, что наибольший коэффициент трения покоя развивается в зоне контакта, для изделий, изготовленных из одинаковых материалов с последующей обработкой контактирующих поверхностей. Так, например, в случае контакта PETG/PETG, коэффициент трения одинаков для случая PETG/PLA, но при этом на 20-25% выше, чем при контакте PETG/ABS и PETG/металл.

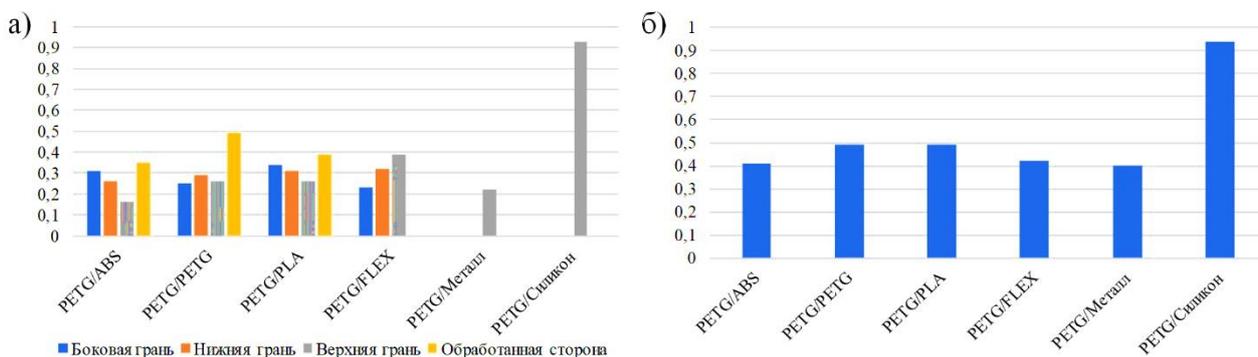


Рис. 3. Коэффициенты трения различных образцов с PETG пластиком: а) необработанные поверхности; б) обработанные поверхности

Fig. 3. Friction coefficients of various samples with PETG plastic: a) untreated surfaces; b) treated surfaces

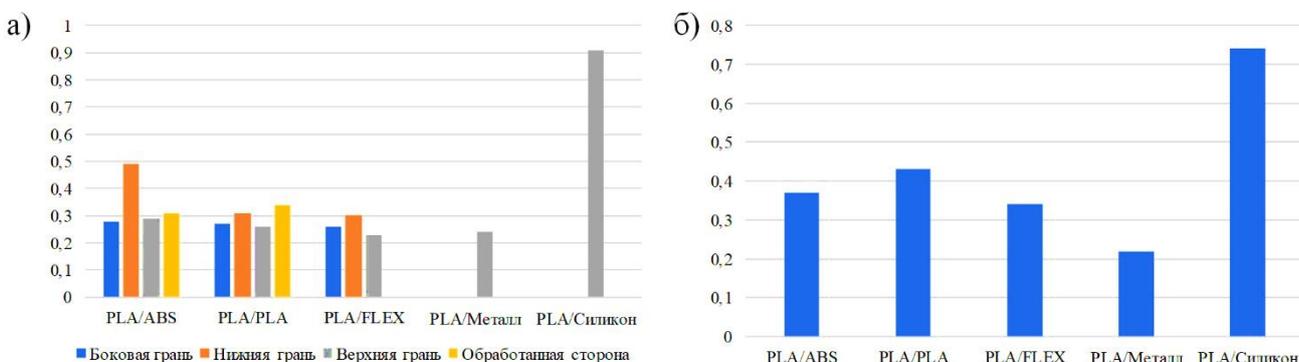


Рис. 4. Коэффициенты трения различных образцов с PLA пластиком: а) необработанные поверхности; б) обработанные поверхности

Fig. 4. Friction coefficients of various samples with PLA plastic: a) untreated surfaces; b) treated surfaces

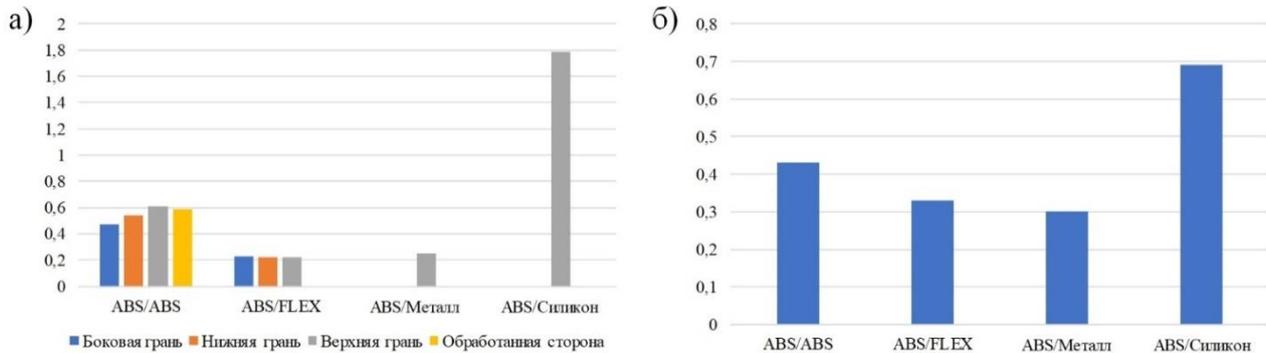


Рис. 5. Коэффициенты трения различных образцов с ABS пластиком: а) необработанные поверхности; б) обработанные поверхности

Fig. 5. Friction coefficients of various samples with ABS plastic: a) untreated surfaces; b) treated surfaces

Для эксперимента, когда контактировали поверхности PLA/PLA, коэффициент трения в данном случае на 10-50% выше, чем для остальных случаев.

Если сравнивать коэффициенты трения для образцов, изготовленных из материалов FLEX и силикон, из которых изготавливались уплотнительные прокладки, то видно, что в случае контакта пластик/силикон коэффициент трения становится более чем в два раза выше, чем в случае контакта пластик/FLEX. При этом наибольшей величиной коэффициента трения, который равен 0,93 обладает зона

контакта PETG/силикон. При этом, не трудно заметить, что в случае контакта необработанной поверхности наклонной плоскости из ABS пластика с образцом из силикона, коэффициент трения становится равным 1,79, однако не смотря на столь высокое значение, вполне вероятно, что явно видимые неровности, образовавшиеся в процессе печати, существенно снизят герметичность соединения. Далее на основании полученных данных, необходимо провести сравнительные расчеты условий устойчивости уплотнителя от действия на него давления сжатого воздуха.

Влияние коэффициента трения между уплотнительным материалом и уплотняемыми поверхностями на герметичность разъемного неподвижного соединения

Для определения влияния коэффициента трения на герметичность разъемного соединения, по формулам, приведенным в работе [11], рассчитаем условие устойчивости уплотнителя от действия на него сжатого воздуха.

Данное условие описывается выражением:

$$F_{\text{тр}} \geq \frac{P \cdot h_0 \cdot \pi \cdot D}{2}, \quad (1)$$

$$F_{\text{тр}} \geq \frac{0,9 \cdot 0,0095 \cdot \pi \cdot 0,1}{2}, \quad (2)$$

$$F_{\text{тр}} \geq 0,0014. \quad (3)$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения, развиваемая на поверхности контакта уплотнителя с уплотняемыми поверхностями; P – давление сжатого воздуха на уплотнитель (принимается равным $P=0,9$ МПа); h_0 – высота уплотнителя после деформации (принимается равной $h_0=0,0095$ м); D – диаметр

уплотнения (принимается равным $D=0,1$ м).

Сила трения рассчитывается по выражению:

$$F_{\text{тр}} = \mu_{\text{тр}} \delta S_{\text{н}}, \quad (4)$$

где $\mu_{\text{тр}}$ – коэффициент трения между поверхностью контакта уплотнителя с уплотняемыми поверхностями; δ – контактное напряжения развиваемое на поверхности контакта; $S_{\text{н}}$ – площадь номинального контакта деформированного уплотнителя (принимается равной $S_{\text{н}}=0,0015$ м²).

Так как в качестве уплотнительных материалов рассматриваются FLEX и силиконовый герметик, то именно для них будет выбираться коэффициент трения для случая обработанной и необработанной поверхности уплотнения из материалов PETG, PLA и ABS. Коэффициенты трения

выбираем для случая контакта верхней грани уплотнителя из FLEX по диаграммам, изображенным на рис. 5-7.

Контактное напряжения развиваемое на поверхности контакта рассчитаем по следующей формуле:

$$\delta = \frac{Q}{S_H}, \quad (5)$$

где Q – внешняя сила, необходимая для деформации уплотнителя, принимаем равной 0,5 Н;

$$\delta = \frac{0,5}{0,0015} = 333,3 \text{ Па.}$$

Тогда, величина силы трения составит:

- для PETG/FLEX при необработанной поверхности: $F_{тр} = 0,39 \cdot 333,3 \cdot 0,0015 = 0,195 \text{ Н}$,

- для PETG/FLEX при обработанной поверхности: $F_{тр} = 0,42 \cdot 333,3 \cdot 0,0015 = 0,210 \text{ Н}$,

- для PETG/FLEX при необработанной поверхности: $F_{тр} = 0,93 \cdot 333,3 \cdot 0,0015 = 0,465 \text{ Н}$,

- для PETG/FLEX при обработанной поверхности: $F_{тр} = 0,94 \cdot 333,3 \cdot 0,0015 = 0,470 \text{ Н}$.

Для уплотняемых поверхностей из других материалов расчет аналогичен.

Результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица

Расчетная величина силы трения в зоне контакта уплотнителя и уплотняемой поверхности

Table

The calculated value of the friction force in the zone of contact between the seal and the surface to be sealed

Контактирующие материалы	Сила трения, Н	
	Обработанный	Необработанный
PETG/FLEX	0,195	0,21
PETG/силикон	0,465	0,47
PLA/FLEX	0,13	0,17
PLA/силикон	0,455	0,37
ABS/FLEX	0,115	0,165
ABS/силикон	0,345	0,895

Результаты исследования

В результате проведенных расчетов, видно, что условие плотности выполняется, т.е. $0,195 \geq 0,0014$. Также мы можем заметить, что величина силы трения между необработанными поверхностями для уплотнителя из FLEX значительно больше, чем для обработанных. Но так как данные выражения не учитывают влияние величин неровностей поверхности, то несмотря на выполнение условия устойчивости уплотнителя при расчетном давлении воздуха 0,9 МПа, герметичность соединения будет нарушена с большой долей вероятности. Более плотным может оказаться соединение с меньшей величиной силы трения, при одновременно меньшей шероховатости.

Для уплотнителя из силикона сила трения при устранении неровностей по-

верхности значительно выше, чем при контакте силиконового уплотнителя с необработанной поверхностью. Также, по результатам расчетов, мы можем наблюдать, что сила трения в случае контакта PETG/силикон на 2% выше, чем для контакта PLA/силикон и на 35% для ABS/силикон. То есть PETG пластик, по мимо того, что обладает более высокими прочностными характеристиками, также, в случае применения уплотнения из резиноподобных материалов, обладает и большей силой трения в зоне их контакта, что позволяет рекомендовать именно этот материал в качестве первоочередного для изготовления пневматических приборов при помощи технологий 3d-печати.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sorokin D.V., Babkina L.A., Brazgovka O.V. Designing various-purpose subassemblies based on topological optimization // *Spacecrafts & Technologies*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 61-82. doi: 10.26732/j.st.2022.2.01.
2. Galinovsky, A.L. & Filimonov, A.S. & Badanina, Y.V. & Dolgikh, A.I.. (2023). Comparative correlation study of software systems for three-dimensional numerical simulation by analyzing results of the RST product topological optimization. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 42-51. 10.18698/0536-1044-2023-1-42-51.
3. Слынько, М. Д. Аддитивные технологии на железнодорожном транспорте / М. Д. Слынько, О. Л. Цветкова // *Актуальные проблемы развития транспортного комплекса в условиях цифровой экономики : материалы III Международной студенческой научно-практической конференции, Нижний Новгород, 10 декабря 2021 года / филиал СамГУПС в г. Нижнем Новгороде. – Нижний Новгород: Б. и., 2021. С. 31-36. – EDN LIVRAW.*
4. Иванов, П. Ю. Снижение энергопотребления электровоза при управлении пневматическими тормозами грузового поезда / П. Ю. Иванов, А. А. Хамнаева, А. М. Худоногов // *Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта : Материалы третьей международной научно-практической конференции, Омск, 06 декабря 2018 года. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2018. С. 143-151. – EDN PPBPJT.*
5. Study of the influence of the brake shoe temperature and wheel tread on braking effectiveness / P. Ivanov, A. Khudonogov, E. Dulskiy [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series, Voronezh*, 10–13 декабря 2019 года. – Voronezh, 2020. – P. 012086. – DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012086. – EDN OHFFAP.
6. Математическая модель работы тормозной системы поезда в процессе торможения с учетом динамики коэффициента трения колодки о колесо и сцепления с рельсом в компьютерной среде / А. А. Корсун, П. Ю. Иванов, С. П. Круглов [и др.] // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2(86). – С. 104-113. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_104. – EDN LNUDHW.*
7. Анализ факторов, влияющих на коэффициент трения тормозной колодки подвижного состава / А. А. Корсун, П. Ю. Иванов, Д. В. Осипов, Д. А. Тихонов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 2(74). С. 91-100. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).91-100. – EDN RPAUTW.*
8. Двухтрубная тормозная система на железнодорожном подвижном составе / Д. В. Осипов, П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский [и др.] . 2022. – № 4-5(101-102). С. 38-41. – EDN ZGBZCC.
9. Сравнительный анализ тормозных систем подвижного состава с однострубым и двухтрубным питанием / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. А. Хамнаева [и др.] // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2020. № 3(79). С. 35-42. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_3_35. – EDN UANBCT.*
10. Аврущенко Б. Х. Резиновые уплотнители. Л.: Химия; Ленинград, 1978. 136 с.

REFERENCES

1. Sorokin DV, Babkina LA, Brazgovka OV. Designing various-purpose subassemblies based on topological optimization. *Spacecrafts and Technologies*. 2022;6(2):61-82. doi: 10.26732/j.st.2022.2.01.
2. Galinovsky AL, Filimonov AS, Badanina YV, Dolgikh AI. Comparative correlation study of software systems for three-dimensional numerical simulation by analyzing results of the RST product topological optimization. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 2023;42-51. 10.18698/0536-1044-2023-1-42-51.
3. Slynko MD, Tsvetkova OL. Additive technologies in railway transport. *Proceedings of the III International Student Scientific and Practical Conference, December 10, 2021: Actual Problems of the Development of the Transport Complex in the Digital Economy; Branch of SamGUPS in Nizhny Novgorod. Nizhny Novgorod; 2021. EDN LIVRAW*
4. Ivanov PYu, Khamnaeva AA, Khudonogov AM. Reduction of electric locomotive energy consumption when controlling pneumatic brakes of a freight train. *Proceedings of the Third International Scientific and Practical Conference, 06 December, 2018: Development and Operation of Electro-technical Complexes and Systems of Power Engineering and Ground Transport; Omsk: Omsk State University of Railways; 2018. EDN PPBPJT.*
5. Ivanov PYu, Khudonogov AM, Dulskiy E. Study of the influence of the brake shoe temperature and wheel tread on braking effectiveness. *Journal of Physics: Conference Series. Voronezh; 2020. DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012086. – EDN OHFFAP.*
6. Korsun AA, Ivanov PYu, Kruglov SP. Mathematical model of the operation of the train braking system during braking, taking into account the dynamics of the shoe friction factor on the wheel and the coupling with the rail in a computer medium. *Bulletin of Rostov State Transport University. 2022;2(86):104-113. DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_104. EDN LNUDHW.*

7. Korsun AA, Ivanov PYu, Osipov DV, Tikhonov DA. Analysis of factors affecting the friction coefficient of the brake shoe of the rolling stock. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling.* 2022;2(74):91-100. DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).91-100. EDN RPAUTW.
8. Osipov DV, Ivanov PYu, Dulsky EYu. Two-tube braking system on railway rolling stock. 2022;4-5(101-102):38-41. EDN ZGBZCC.
9. Ivanov PYu, Dulsky EYu, Khamnaeva AA. Comparative analysis of braking systems of rolling stock with single-tube and two-tube power supply. *Bulletin of Rostov State Transport University.* 2020;3(79):35-42. DOI 10.46973/0201-727X_2020_3_35. EDN UANBCT.
10. Avrushchenko BH. Rubber seals. Leningrad: Khimiya; 1978.

Информация об авторах:

Осипов Дмитрий Валерьевич – аспирант кафедры «Электроподвижной состав», тел.:89233711986.

Иванов Павел Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроподвижной состав», тел.:89500652177.

Osipov Dmitry Valeryevich - Postgraduate Student of the Department of Electric Rolling Stock; phone: 89233711986.

Ivanov Pavel Yuryevich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock; phone: 89500652177.

Евгений Юрьевич Дульский – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», тел.:89834034643.

Пронин Константин Евгеньевич – кафедра «Электроподвижной состав», тел.:89149404521.

Dulskiy Evgeny Yuryevich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Cars and Car Facilities; phone: 89834034643.

Pronin Konstantin Evgenyevich - Department of Electric Rolling Stock; phone: 89149404521.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 22.03.2022; одобрена после рецензирования 03.05.2023; принята к публикации 26.05.2023. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редколлегии журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 22.03.2022; approved after review on 03.05.2023; accepted for publication on 26.05.2023. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.