

Определение механической прочности композитной траверсы для ВЛ 6–10 кВ методом конечных элементов



Юрий КОЧУНОВ



Дмитрий ЕГОРОВ

**Юрий Александрович Кочунов¹,
Дмитрий Викторович Егоров²**

¹ООО «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ», Екатеринбург, Россия.

²Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия.

¹ORCID 0000-0001-6955-283X; РИНЦ SPIN-код: 5314-2514, РИНЦ Author ID: 890174.

²РИНЦ SPIN-код: 3455-5021, РИНЦ Author ID: 931760.

✉ ¹ yukochunov@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

На воздушных линиях электропередачи напряжением 6–10 кВ, предназначенных для проводов питания устройств сигнализации, централизации и блокировки и линий продольного электроснабжения, в качестве поддерживающих конструкций используются металлические траверсы с фарфоровыми или стеклянными изоляторами. По имеющимся данным, дефекты, вызванные механическими напряжениями, составляют более половины от общего числа нарушений нормальной работы воздушных линий. Из этого числа стоит выделить дефекты, которые являются наиболее частыми: скол изолятора, изгиб штыря, излом штыря, разрушение изолятора, срыв изолятора со штыря, перекос траверсы, разрушение траверсы, изгиб траверсы, загнивание или коррозия траверсы.

С целью повышения надежности воздушных линий и сокращения данных повреждений предлагается изготавливать траверсы из полимерного композитного электроизоляционного материала. Такие траверсы не имеют изо-

ляторов и используются как электромеханическая конструкция, обладающая требуемой механической и электрической прочностью.

Целью данной работы является оценка механической прочности траверс, выполненных из полимерных композитных электроизоляционных материалов. Для реализации поставленных задач в работе рассмотрена трехмерная модель траверсы. Определение ее механической прочности осуществлено с использованием прикладного программного обеспечения, реализующего метод конечных элементов (МКЭ). К траверсе прикладываются нагрузки в горизонтальной и вертикальной плоскостях, определяется наиболее нагруженное напряженно-деформированное состояние стержней траверсы и штыревой накладки.

Кроме того, в статье выполняется сравнение результатов расчета аналитическим методом, выполненного в предыдущей работе, с расчетом МКЭ. Также осуществлена верификация принятых физико-геометрических параметров, свойств материала и допущений в расчетах.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, электроснабжение, траверса, полимерный композитный материал, механическая прочность, стержень, нагрузка, метод конечных элементов.

Для цитирования: Кочунов Ю. А., Егоров Д. В. Определение механической прочности композитной траверсы для ВЛ 6–10 кВ методом конечных элементов // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 1 (110). С. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-1-2>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Электроснабжение железных дорог – это сложная, многоэлементная система, которая по критериям надежности является потребителем первой категории. Кроме обслуживания тяги поездов, электропитание получают нетяговые потребители, такие как устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) и линии продольного электроснабжения (ПЭ), питание которых осуществляется по воздушным линиям (ВЛ) электропередачи напряжением 6–10 кВ. В качестве поддерживающих конструкций используются металлические траверсы с фарфоровыми или стеклянными изоляторами. По статистическим данным, дефекты, вызванные механическими напряжениями, составляют 58 % от общего числа отказов ВЛ [1; 2].

Для повышения надежности и с целью сокращения данных повреждений инженерами ООО «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ» и сотрудниками кафедры «Электроснабжение транспорта» УрГУПС разработаны изоляционно-поддерживающие конструкции – кронштейны и траверсы, выполненные из полимерного композитного электроизоляционного материала (ПКЭМ) [1–8].

Такие конструкции обладают требуемой механической и электрической прочностью, не имеют изоляторов, тем самым уменьшают вероятность отказов из-за механических повреждений.

Одним из этапов введения нового оборудования является моделирование процессов, прикладываемых к исследуемому объекту. Достоверность результатов исследования необходимо верифицировать путем применения различных методик расчетов и натурных экспериментов.

В [8] представлены результаты расчета механической прочности траверсы из ПКЭМ аналитическим методом, при расчете были учтены коэффициенты запаса прочности, определены наиболее напряженные элементы конструкции при приложении воздействующей силы, получены значения деформации и напряжений.

Данная статья содержит результаты второго этапа исследования по определению механической прочности траверсы из ПКЭМ с использованием прикладного программного обеспечения, реализующего метод конечных элементов (МКЭ).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе в качестве типопредставителя исследуется траверса ТК-3ш-БОРЭЛ (далее по тексту – траверса) производства ООО «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ» (г. Екатеринбург). Основные физико-геометрические параметры траверсы и узлов ее крепления представлены в [8].

Трехмерная геометрическая модель траверсы (рис. 1) моделируется как набор механически контактирующих упруго-деформируемых твердых тел с учетом пластических свойств стеклопластика, а также включает в расчетную схему крепежные элементы.

Траверса (рис. 1) как поддерживающая механическая конструкция рассчитывается по методу трех предельных состояний [1; 8; 9]:

1. Прочность конструкции.
2. Деформация.
3. Устойчивость.

На основе использования аналитических методов расчетов в [8] определено, что наиболее нагруженное напряженно-деформированное состояние (НДС) возникает при воздействии нагрузки на НШ в горизонтальной плоскости. Расчетная схема представлена на рис. 2.

В расчете вводится ряд допущений [9–15]: ХКО смоделирован как два болта с жесткой заделкой в свободных торцах (B, F); выбрана модель контакта уголка $75 \times 75 \times 8$ и опоры, при которой отсутствует трение между поверхностями [11]; ФП имеет ограничения перемещений во всех направлениях в свободных торцах (на рис. 2 отсутствует); опора смоделирована как абсолютно твердое тело с ограничением перемещений во всех направлениях (G).

Нагружение траверсы осуществляется в два этапа.

На первом этапе моделируется затяжка болтов. Усилие затяжки определяется по формуле:

$$Q_{\text{зам}} = \sqrt{\frac{\sigma_m}{\left(\frac{4}{\pi \cdot d^2}\right)^2 + 3 \left(\frac{0,15}{0,2 \cdot d^2}\right)^2}}, \quad (1)$$

где d – диаметр болта.

Следует отметить, что усилие затяжки болтов, крепящих уголок к опоре (E, I), принято из условия прочности уголка $75 \times 75 \times 8$.

На втором этапе к НШ прикладывается усилие, равное 3 кН (A), в горизонтальном направлении.

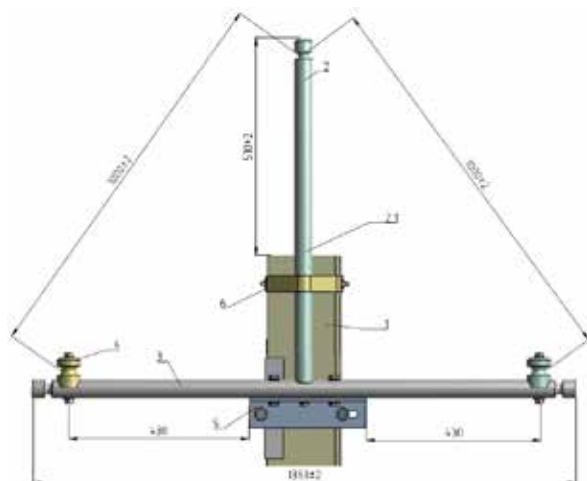


Рис. 1. Трехмерная геометрическая модель траверсы ТК-3ш БОРЭЛ [выполнено авторами]:
1 – опора СВ-110–5; 2 – вертикальная балка траверсы (ВБТ); 2.1 – ограничительный паз; 3 – горизонтальная балка траверсы (ГБТ);
4 – накладка штыревая (НШ); 5 – хомут крепления на опоре (ХКО); 6 – фиксирующая пластина (ФП).

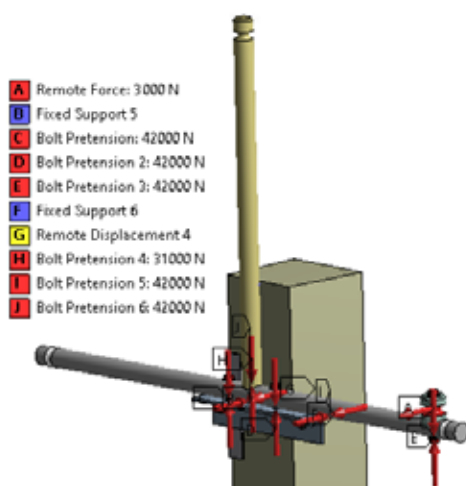


Рис. 2. Расчетная схема при воздействии нагрузки на НШ в горизонтальной плоскости [выполнено авторами]: А – (усилие) нагрузка, прикладываемая в горизонтальном направлении к накладке штыревой в зоне крепления провода; В, F – (жесткая заделка) свободные торцы болтов ХКО; С, D, E, H, I, J – (осевое усилие затяжки) болтовые соединения; G – (ограничение перемещений во всех направлениях) обратная сторона опоры.

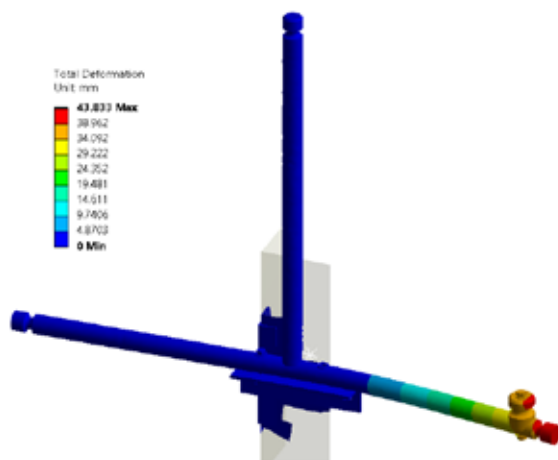
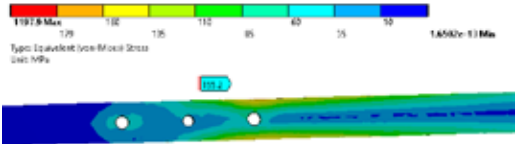
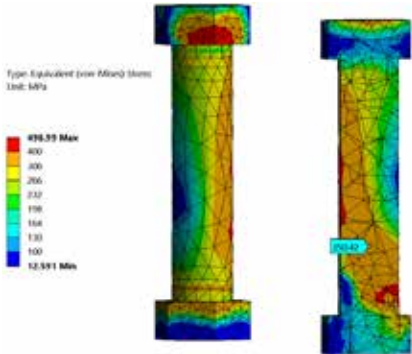
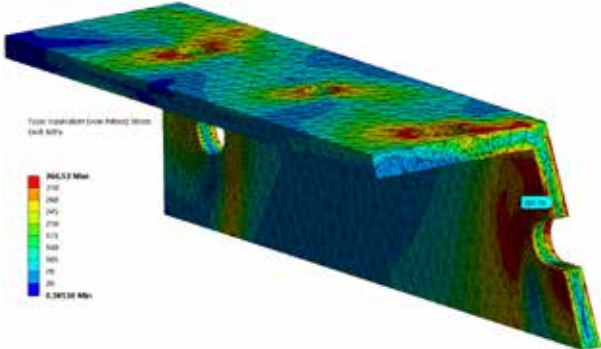
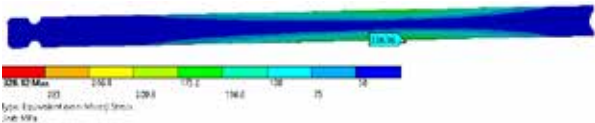
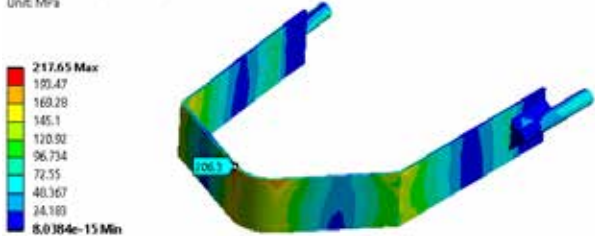


Рис. 3. Общий деформированный вид [выполнено авторами].

Таблица 1

Результаты расчета композитной траверсы МКЭ

Наименование отдельного элемента траверсы	Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу	Максимальные эквивалентные напряжения, МПа	Запас прочности η
ГБТ (продольный разрез)		155,2*	4,4
Болты, используемые для крепления ГБТ с металлическим уголком 75×75×8 (разрез ближнего к приложенной нагрузке болта)		350,42	1,4
Уголок 75×75×8 (разрез ближнего к приложенной нагрузке отверстия)		301,76	2,1
ГБТ (продольный разрез)**		276,16	4,5
ФП**		206,3	2,1

*Максимальные напряжения в ГБТ равные 1197,9 МПа обусловлены краевым эффектом, возникающим после затяжки болтов.

**Для расчетной схемы № 4 [8].

Таблица 2

Сравнительные данные, полученные аналитическим методом расчета и МКЭ

Расчетная схема № 1				
Метод	Оцениваемые величины			
	Деформация ГБТ, мм	Напряжение ГБТ, МПа	Напряжение уголка, МПа	Напряжения болтов, МПа
Аналитический	34,4	130,2	221,4	105,3
МКЭ	39,6	147,1	209,8	99,2
Погрешность, %	13,1	11,5	5,5	6,1
Расчетная схема № 2				
Метод	Оцениваемые величины			
	Деформация ГБТ, мм	Напряжение ГБТ, МПа	Напряжение уголка, МПа	Напряжения болтов, МПа
Аналитический	35,1	133,3	258,3	266,7
МКЭ	39,9	150,8	247,9	254,5
Погрешность, %	12	11,6	4,2	4,7
Расчетная схема № 3				
Метод	Оцениваемые величины			
	Деформация ГБТ, мм	Напряжение ГБТ, МПа	Напряжение уголка, МПа	Напряжения болтов, МПа
Аналитический	38,2	135,6	308,2	363,6
МКЭ	43,8	155,2	301,76	350,42
Относительная погрешность, %	12,7	12,6	2,1	3,8
Расчетная схема № 4				
Метод	Оцениваемые величины			
	Деформация ВБТ, мм	Напряжение ВБТ, МПа	Напряжения ФП, МПа	
Аналитический	35,6	285,7	221,4	
МКЭ	39,5	276,16	206,3	
Погрешность, %	9,9	3,5	7,3	

Общее деформированное состояние для траверсы под опору СВ-110–5 (варианта конструкции уголка № 1 рис. 3 [8]) приведено на рис. 3.

Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу, МПа, всех элементов траверсы приведено на рис. 4.

Распределение эквивалентных напряжений в отдельных элементах траверсы по Мизесу, в МПа, приведены в табл. 1.

Определение соответствия основных конструктивных элементов условиям прочности производится по методу допускаемых напряжений:

$$[\sigma_{\text{доп}}] \geq [\sigma_{\text{ЭКВ}}], \tag{2}$$

где $[\sigma_{\text{ЭКВ}}]$ – максимальные эквивалентные напряжения, возникающие в отдельных конструктивных элементах траверсы.

Запас прочности соответствует требованиям ГОСТ. Для всех остальных деталей конструкции запас прочности $\eta \geq 5$.

Следующим этапом определяется устойчивость конструкции. Расчетная схема при воздействии вертикальной осевой сжимающей силы 3 кН (*E*) представлена на рис. 5.

Запас устойчивости $\eta_{\text{уст}}$ определяется по формуле:

$$\eta_{\text{уст}} = LM \cdot k, \tag{3}$$

где *LM* – запас устойчивости по программному расчету;

k – коэффициент, учитывающий несовершенство геометрических форм для сжатых стержней переменного сечения, *k* = 0,8.

Первая форма потери устойчивости представлена на рис. 6.

Минимальный запас устойчивости по программному расчету *LM* = 8,2. $\eta_{\text{уст}} = 8,2 \cdot 0,8 = 6,56$. Запас устойчивости конструкции обеспечивает механическую прочность и соответствует требованиям [8; 9].

После проведенных расчетов производится сравнение полученных результатов с результатами расчета аналитическим методом [8]. Сравнительные данные представлены в табл. 2.

Несмотря на незначительные отступления от классической методики расчета на прочность композитной траверсы сравнительный анализ показал, что оцениваемые величины и сходимость полученных



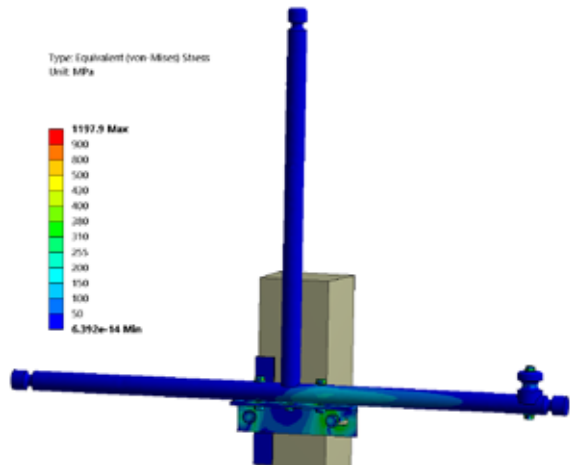


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу, МПа, всех элементов траверсы [выполнено авторами].

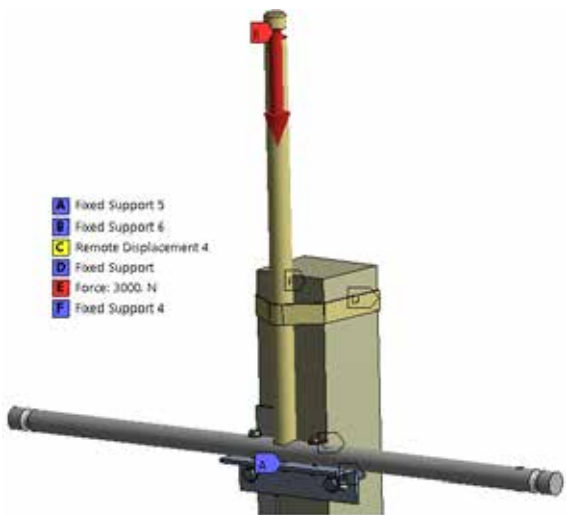


Рис. 5. Расчетная схема при воздействии сжимающего усилия на ВБТ в вертикальной плоскости [выполнено авторами]: A, B – (жесткая заделка) свободные торцы болтов ХКО; D, F – (жесткая заделка) свободные торцы ФП; C – (ограничение перемещений во всех направлениях) обратная сторона опоры; E – (усилие) нагрузка прикладываемая в вертикальном направлении к ВБТ в зоне крепления провода.

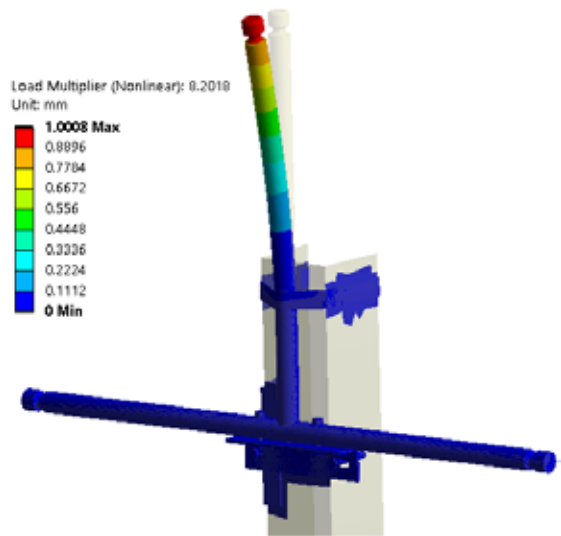


Рис. 6. Форма потери устойчивости траверсы [выполнено авторами].

расчетов не противоречат методикам, указанных в ^{1, 2, 3}.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе определена механическая прочность композитной траверсы ТК-3-ш БО-РЭЛ, выполненная методом конечных элементов. По результатам расчета траверсы удовлетворяет требованиям механической прочности.

Сравнение аналитического метода расчета [8] и расчета МЭК показало, что погрешность расчета составляет не более 15 %, что подтверждает приемлемость принятых характеристик материалов и допущений в расчетах.

Данные методики могут использоваться при конструировании траверс, выполненных из полимерных композитных материалов. Материалы данной работы могут быть использованы в инженерных расчетах, а также в образовательном процессе при обучении студентов по специальностям и направлениям подготовки: 13.02.07 «Электроснабжение (по отраслям)», 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»; 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»; 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кочунов Ю. А. Разработка и исследования полимерного кронштейна воздушной линии электропередачи в сетях нетяговых железнодорожных потребителей 6–10 Кв / Дисс... канд. техн. наук. – Екатеринбург: УрГУПС, 2017. – 235 с.

¹ ГОСТ 27380-87 Стеклопластики профильные электроизоляционные. Общие технические условия. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987. – 31 с. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200011761>. Доступ 28.11.2023.

² ГОСТ 33742-2016 Композиты полимерные. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2019. – 10 с. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200135539>. Доступ 28.11.2023.

³ Бондалетова Л. И., Бондалетов В. Г. Полимерные композиционные материалы (часть 1): Учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.

2. Лукьянов А. М., Чепелев Ю. Г., Бардин А. Н. Разрабатываем полимерные консоли // Мир транспорта. – 2016. – Т. 14. – № 3 (64). – С. 60–71. EDN: XXJQHV.

3. Попов С. Н., Федоров Ю. Ю., Васильев С. В. Составные композитные траверсы для опор высоковольтных линий электропередачи // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2016. – № 3. – С. 9–11. EDN: WBGJAL. DOI: 10.18635/2071-2219-2016-3-9-11.

4. Федотов А. А., Колесников С. А., Хорошевский Р. А. Деревянные кронштейны заменяют полимерными // Локомотив. – 2013. – № 3 (675). – С. 43.

5. Федоров Ю. Ю., Попов С. Н., Унжаков А. С. Стеклопластиковые мобильные опоры для линий электропередачи с напряжением до 10 кВ // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2023. – № 2. – С. 5–10. EDN: WUZARS.

6. Васильев С. В., Федоров Ю. Ю. Разработка композитной траверсы анкерной концевой опоры линии электропередачи 6–10 КВ // Евразийское научное объединение. – 2019. – № 5–2 (51). – С. 108–110. EDN: WNNXVK.

7. Федоров Ю. Ю., Бабенко Ф. И. Влияние низких температур на поведение предварительно деформированного стеклопластика // Пластические массы. – 2018. – № 1–2. – С. 9–11. EDN: YQUDNT.

8. Кочунов Ю. А., Колмаков Д. А., Егоров Д. В. Аналитическое определение механической прочности композитной траверсы для ВЛ 6–10 кВ // Наука и образование в транспорте. – 2022. – № 2. – С. 29–34. EDN: XKWEEF.

9. Лукьянов А. М. Разработка полимерных изолирующих конструкций, обеспечивающих повышение промышленной безопасности контактных электрических сетей / Дисс... докт. техн. наук. – М.: МГУПС, 1998. – 225 с.

10. Руцкий В. М. Совершенствование методов проектирования и эксплуатации изоляции наружных электроустановок систем электроснабжения железных дорог / Дисс... докт. техн. наук. – Екатеринбург: УрГУПС, 2004. – 373 с.

11. Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций – М.: Машиностроение, 1976. – 408 с.

12. Турбин Н. В., Трифонов Р. Д., Ковтунов С. С. Моделирование смятия композиционного материала методами вычислительной микромеханики // II Международная конференция «Композитные материалы и конструкции». 16 ноября 2021 года. Москва. Тезисы. – М.: Изд-во «Перо», 2021. – С. 88–89. EDN: FJNDYO.

13. Пелевин А. Г., Шадрин В. В. Особенности использования модели вязкоупругого материала в программном комплексе ANSYS // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. – 2021. – № 3 (54). – С. 52–57. DOI: <https://doi.org/10.17072/1993-0550-2021-3-52-57>.

14. Крылов К. А., Мурзаханов Г. Х., Щугорев В. Н. Экспериментальное исследование разрушения композитов при динамическом нагружении // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2007. – № 10. – Ст. 1. EDN: IBZWYT.

15. Каблов Е. Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. – 2015. – № 1. – С. 36–39. EDN: UBDOPV. ●

Информация об авторах:

Кочунов Юрий Александрович – кандидат технических наук, инженер-конструктор ООО «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ», Екатеринбург, Россия yukochunov@mail.ru.

Егоров Дмитрий Викторович – аспирант Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия, dmitryegorovperm@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 20.07.2023, одобрена после рецензирования 22.11.2023, принята к публикации 27.11.2023.

