

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Е.С. Ушакова

ellizaweta@gmail.com

В.Г. Тупоногов

v.g.tuponogov@urfu.ru

УрФУ, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация

В целях обеспечения тепловой защиты внутренних поверхностей камеры сгорания ракетного двигателя твердого топлива используются покрытия на основе бутилкаучука или полиуретанового и бутадиен-нитрильного каучуков, полученные методом компрессионного формования из каландрованной резиновой смеси. Полученные теплозащитные покрытия анизотропные (обладают каландровым эффектом) — их прочностные характеристики зависят от направления ориентирования заготовок, закладываемых в пресс-форму перед вулканизацией. При транспортировке и хранении двигательной установки в теплозащитных покрытиях возникают внутренние напряжения, обусловленные разными значениями температуры на поверхности и внутри изделия, которые могут привести к растрескиванию покрытия с последующим прогаром стенки в процессе работы двигателя. Проведена оценка влияния анизотропии на прочностные характеристики теплозащитного покрытия элемента конструкции двигательной установки при изменении температуры окружающей среды на примере теплозащитного материала, изготовленного из резиновой смеси на основе бутадиен-нитрильного каучука. Установлено, что значение предела прочности покрытия, исходная заготовка которого получена методом шприцевания, предложенным в качестве меры устранения анизотропии свойств, расположено в интервале между значениями предела прочности каландрованной резиновой смеси, определенными продольно и поперечно направлению каландрования. Получены данные о темпе сниже-

Ключевые слова

Ракетный двигатель твердого топлива, теплозащитное покрытие камеры сгорания, бутадиен-нитрильный каучук, каландровый эффект, шприцевание, термоциклирование

ния прочностных характеристик теплозащитного	Поступила 22.04.2025
покрытия в результате циклического изменения	Принята 09.06.2025
температуры окружающей среды	© Автор(ы), 2026

Введение. Для исключения прогара стенок корпуса и днищ камеры сгорания (КС) ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ) используются теплозащитные покрытия (ТЗП), тип и марка которых определяются в зависимости от защищаемой зоны [1, 2], времени работы двигателя [3], массового расхода и состава продуктов сгорания [4], окислительного потенциала [5] и пр. Для защиты внутренних поверхностей КС от воздействия высокой температуры могут служить резины на основе полиуретанового, бутадиен-нитрильного или бутилкаучуков, поскольку такие материалы имеют высокую адгезионную прочность, низкие теплопроводность и газопроницаемость [6].

В целях формирования резиновых покрытий в процессе вулканизации на внутренних поверхностях сложной формы, в частности, на поверхности сферических днищ КС, применяют метод компрессионного формования, в процессе которого заготовка невулканизированной резиновой смеси определенной массы запрессовывается в днище РДТТ, закрепленное в пресс-форме. Для этого используются формованные резиновые смеси в виде листов, полученных в результате каландрования, из которых вырезаются заготовки требуемых размеров.

Полученные методом компрессионного формования из каландрованной резиновой смеси ТЗП являются анизотропными (обладают каландровым эффектом), поскольку под действием больших сдвиговых напряжений при прокатке материала через зазоры валков возникает значительная ориентация макромолекул полимера вдоль направления каландрования. Вследствие этого прочностные характеристики результирующего покрытия зависят от ориентации заготовок, вырезанных продольно или поперечно направлению каландрования листа резиновой смеси [7]. Такого эффекта можно избежать путем изготовления заготовок методом шприцевания, в процессе которого резиновая смесь продавливается через профилированное отверстие головки (мундштук). При таком методе формования заготовок усложняется технологический процесс нанесения покрытия, что требует специального оборудования.

В процессе транспортировки и хранения изделия при циклическом нагреве и охлаждении на поверхности и внутри РДТТ возникает разность значений температур, в результате которой в системе металл–резина отдельных элементов двигателя могут возникать внутренние напряжения,

вызванные взаимодействием материалов с различными значениями модуля упругости и коэффициента линейного расширения [8, 9]. Воздействие внутренних напряжений может привести к растрескиванию ТЗП [10] и прогару стенки в процессе работы РДТТ, что обуславливает необходимость исследования влияния анизотропии теплозащитного материала (ТЗМ) на прочностные характеристики покрытия при воздействии температуры окружающей среды [11, 12].

Цель настоящей работы — оценить влияние анизотропии свойств на прочностные характеристики покрытия элемента конструкции двигательной установки при изменении температуры окружающей среды на примере ТЗМ, изготовленного из резиновой смеси на основе бутадиен-нитрильного каучука методом компрессионного формования.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Для анализа влияния анизотропии на прочностные характеристики резиновой смеси на основе бутадиен-нитрильного каучука марки СКН-26 СНТ [13] изготовлены образцы результирующего ТЗП из заготовок, полученных различными методами формования: каландрованием (вдоль и поперек волокон) и шприцеванием.

Для резины в качестве наполнителя, увеличивающего прочность вулканизата, используют древесный уголь. В целях повышения теплостойкости в смеси применен стеарат кальция, в качестве пластификатора — фенолоформальдегидная смола (ГОСТ 18694–2017¹) [14], имеющая свойства адгезива [15]. Вулканизирующий агент — техническая сера (ГОСТ 127.4–93²).

Каландрованная резиновая смесь вулканизирована в плоской пресс-форме, обеспечивающей необходимый размер заготовки (200 × 125 × 2 мм), компрессионным способом при температуре 150 °С и давлении 373 кН с выдержкой в течение 90 мин и последующей термообработкой при температуре 135 °С с выдержкой в течение 150 мин.

Для изготовления заготовок резиновая смесь выкладывалась по направлению каландрования вдоль большей (заготовки 1-го типа) и меньшей (заготовки 2-го типа) сторон пресс-формы. Резиновая смесь для заготовок 3-го типа предварительно подвергалась испытанию методом шприцевания

¹ ГОСТ 18694–2017 Смолы фенолоформальдегидные. Технические условия. М., Стандартиформ, 2018.

² ГОСТ 127.4–93 Сера молотая для резиновых изделий и каучуков. Технические условия. М., ИПК Изд-во стандартов, 1996.

с использованием шнек-пресса МЧТ-63 (ГОСТ 11441–93³). Полученный шнур диаметром 10 мм и массой, равной массе резиновой смеси для заготовок 1-го и 2-го типов, произвольно укладывался в пресс-форму перед вулканизацией.

Из отвержденных заготовок резиновой смеси для определения механических характеристик вырублены пять образцов в соответствии с ГОСТ 270–75⁴ для каждого типа заготовки, общая длина которых при вырубке располагалась вдоль меньшей стороны заготовки [16]. Таким образом, образцы в виде двусторонних лопаток вырублены из заготовок 1-го и 2-го типов поперечно и продольно направлению каландрования исходной резиновой смеси.

Для исследования влияния температуры окружающей среды на прочностные характеристики ТЗМ изготовлены дополнительные заготовки для вырубки образцов каждого типа с последующим испытанием термоциклированием [17]. Заготовки помещались в термическую камеру и подвергались перепаду температур (2, 4, 6 и 8 циклов) по следующей схеме (за один цикл): $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (4 ч), $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (4 ч), $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (4 ч), $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (4 ч) [18]. Скорость изменения температуры окружающей среды в камере равна $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Диаграмма изменения температуры в термической камере при испытании термоциклированием для одного цикла приведена на рис. 1. Объем испытаний термоциклированием пяти образцов приведен в таблице.

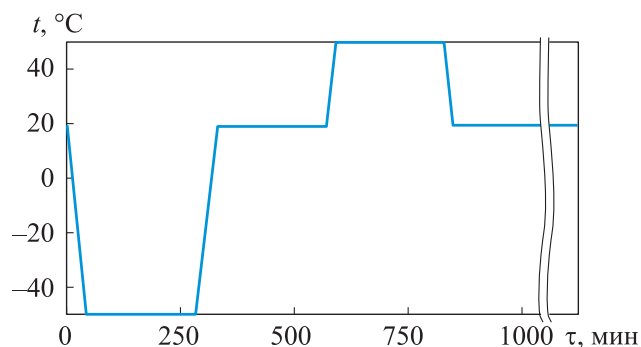


Рис. 1. Диаграмма изменения температуры в термической камере при испытании термоциклированием для одного цикла

³ ГОСТ 11441–93 Машины резинперерабатывающие одночервячные. Типы, основные параметры и примеры. М., ИПК Изд-во стандартов, 1995.

⁴ ГОСТ 270–75 Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении. М., Стандартинформ, 2008.

Объем испытаний термоциклированием пяти образцов

Номер заготовки (для вырубki пяти образцов)			Число циклов термоциклирования
1-го типа	2-го типа	3-го типа	
1	6	11	Без термоциклирования
2	7	12	2
3	8	13	4
4	9	14	6
5	10	15	8

Суть метода определения предела прочности ТЗМ (или условной прочности в соответствии с ГОСТ 270–75, как отношения силы разрыва к площади поперечного сечения образца до испытания) заключалась в растяжении образцов до разрыва в автоматизированной разрывной машине Zwick Roell Z2.5 с постоянной скоростью перемещения активного захвата 100 мм/мин и измерении силы в этот момент.

Результаты. В качестве результата испытаний принято среднее арифметическое значение показателей пяти испытанных образцов одного типа изготовления и одного числа пройденных испытательных циклов термоциклирования. В случае получения результата испытаний, отклоняющегося от среднего значения предела прочности более чем на $\pm 10\%$, этот результат не учитывался, а среднее арифметическое вычисляли из значений показателей оставшихся образцов, числом не менее трех.

Средние арифметические значения предела прочности пяти испытанных образцов, вырубленных из заготовок различных типов, при разных числах пройденных испытательных циклов термоциклирования в термической камере приведены на рис. 2.

Значения предела прочности для образцов из заготовок 3-го типа находятся между значениями для образцов из заготовок 1-го и 2-го типов в связи с усреднением физико-механических свойств анизотропного материала покрытия, так как применение метода шприцевания снижает каландровый эффект резиновой смеси за счет релаксации продольных деформаций, возникших при каландровании.

Установлено, что с увеличением числа испытательных циклов перепада температур, воздействующего на резиновую смесь, значение предела прочности всех типов образцов снижается, что объясняется старением полимерного материала, структура которого неравномерно изменяется при воздействии агрессивных факторов (в частности, перепада температур [19]). Для образцов из заготовок 1-го и 3-го типов зафиксирован рост прочностных характеристик после первых циклов испытаний термоцик-

лированием, что может быть объяснено протеканием остаточных реакций полимеризации в условиях дополнительной термообработки после вулканизации резинового покрытия [20].

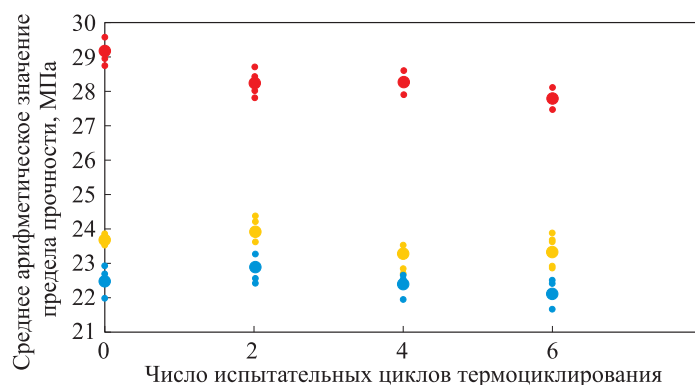


Рис. 2. Средние арифметические значения предела прочности пяти испытанных образцов при разных числах пройденных испытательных циклов термоциклирования в термической камере:
 ●, ●, ● — 1, 2, 3-й типы заготовок соответственно

Выводы. Значение предела прочности покрытия из резиновой смеси, подготовленной методом шприцевания, составляет 23,7 МПа (до воздействия перепада температур) и расположено в интервале значений предела прочности каландрованной резиновой смеси, определенных продольно и поперечно направлению каландрования (29,2 и 22,5 МПа). Полученные значения подтверждают целесообразность применения метода формования в целях усреднения значений прочностных характеристик во всем объеме покрытия.

При воздействии перепада температур значение предела прочности материала покрытия уменьшается. Так, для резиновой смеси, изготовленной методом шприцевания, в результате испытания термоциклированием (восемь циклов) значение предела прочности снизилось на 3,7 %. Значение коэффициента анизотропии (отношения значений предела прочности, определенных во взаимно перпендикулярных направлениях) для материала образцов из заготовок 1-го и 2-го типов при воздействии перепада температур остается примерно постоянным (~ 1,3).

Заключение. При использовании анизотропных резиновых смесей для изготовления ТЗП КС РДТТ методом компрессионного формования во избежание возможного растрескивания, вызванного усадочными напряжениями, возникающими при охлаждении и нагреве резиноталлических сборочных единиц, рекомендуется исключать каландровый эффект путем

формования резиновой смеси методом шприцевания. В процессе проектирования также необходимо учитывать снижение физико-механических характеристик выбранного ТЗМ в результате старения при транспортировке и хранении изделия.

В качестве направления дальнейшего исследования предлагается определение предела прочности материала при минимальных значениях температуры, соответствующих режиму термоциклирования ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) для резиновой смеси, подготовленной методом шприцевания, с учетом влияния процесса старения материала.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шишков А.Ю., Дунаева И.В., Стерленгова Ж.И. и др. Анализ функционирования РДТТ при наличии застойной зоны. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2014, № 12-1, с. 137–142. EDN: TKIWEB
- [2] Глебов Г.А., Высоцкая С.А. Моделирование когерентных вихревых структур и автоколебаний давления в камере сгорания РДТТ. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей»*, 2016, № 4, с. 41–48. EDN: ZCUEVN
- [3] Ягодников Д.А., Куликова О.А. Оценка состояния конструкции РДТТ при его утилизации методом бесоплового сжигания. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, № 3 (88), с. 87–94. EDN: PBZIZF
- [4] Кожевников Ф.Э., Романов А.П., Савельев С.К. и др. Анализ выгорания твердых топлив в высокотемпературных энергетических установках. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей»*, 2024, № 1, с. 31–41. EDN: XQZVFA
- [5] Ворожеева О.А., Ягодников Д.А. Математическая модель и расчетные исследования теплового состояния стенки камеры сгорания РДМТ на газообразном топливе кислород-метан в импульсном режиме работы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2013, № 7, с. 11–20. EDN: QYPEHN
- [6] Чайкун А.М., Алифанов Е.В., Наумов И.С. Резины на основе бутилкаучука. *Новости материаловедения. Наука и техника*, 2016, № 6, с. 49–59. EDN: XCFMBV
- [7] Сахаров М.Э. Исследование влияния времени вылежки на стабильность свойств шинных резин и резинокордных композитов. Дис. ... канд. техн. наук. М., МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2000.
- [8] Мормуль Р.В., Еременко П.П., Шайдуров А.А. Математическое моделирование и эксперимент по определению параметров напряженно-деформированного состояния эластичных опорных элементов при нестационарном теплосиловом нагружении. *Химическая физика и мезоскопия*, 2019, т. 21, № 4, с. 502–513. DOI: <https://doi.org/10.15350/17270529.2019.4.53>
- [9] Короткая О.В. Определение коэффициентов анизотропии при замене реальной конструкции на конструктивно-анизотропную сплошную модель. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2017, № 4, с. 57–66. DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-4-57-66>

- [10] Тихомирова Е.А., Будиновский С.А., Живушкин А.А. и др. Особенности развития термической усталости в деталях из жаропрочных сплавов с покрытием. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № 3, с. 20–25. EDN: ZAOLHN
- [11] Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников. *Авиационные материалы и технологии*, 2018, № 2, с. 47–58. EDN: UOPPLH
- [12] Шутилин Ю.Ф., Чурилина Е.В., Ревина В.А. Действие невысоких температур на каучуки. *Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии — 2022. Сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф.* Курск, ЮЗГУ, 2022, с. 298–300. EDN: XFZOUN
- [13] Боброва И.И., Синельникова Л.Н., Котова С.В. и др. Исследование адгезионных свойств резин на основе различных марок бутадиен-нитрильных каучуков. *Каучук и резина*, 2022, т. 81, № 6, с. 292–297. EDN: MQHZCU
- [14] Федорова А.Ф., Давыдова М.Л., Соколова М.Д. и др. Влияние фенольных антиоксидантов на условную прочность при растяжении бутадиен-нитрильных резин при натурной экспозиции. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2020, № 12, с. 22–29. EDN: RGVVOK
- [15] Боброва И.В., Котова С.В., Люсова Л.Р. и др. Исследование модификаторов адгезии для резин на основе бутадиен-нитрильного каучука. *Промышленное производство и использование эластомеров*, 2022, № 2, с. 18–23. EDN: HWXDNR
- [16] Отрубянников А.Н., Марков В.В. Моделирование качества резинотехнических изделий с учетом нормированных требований к этапам их жизненного цикла. *Поколение будущего — 2013: Взгляд молодых ученых. Матер. Междунар. науч. конф.* Т. 6. Курск, Университетская книга, с. 225–230. EDN: VKXEAV
- [17] Фёдорова А.Ф., Давыдова М.Л., Шадрин Н.В. и др. Исследование изменения свойств уплотнительных резин в условиях воздействия углеводородной среды и температурного режима. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*, 2022, т. 27, № 2, с. 316–326. DOI: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-316-326>
- [18] Ушакова Е.С., Тупоногов В.Г. Определение внутренних напряжений, возникающих в теплозащитном покрытии элементов конструкции двигательной установки при изменении температуры окружающей среды. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 9, с. 110–119. EDN: OXYBLK
- [19] Дубровина Н.Н., Костин Г.Ф. Метод учета старения материалов при длительной эксплуатации изделий. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей»*, 2020, № 4, с. 34–40. EDN: YJKDTQ
- [20] Голякевич А.А., Шутилин Ю.Ф., Михалёва Н.А. и др. Влияние термомеханических и тепловых процессов на свойства эластомеров. *Наука молодых — будущее России. Сб. науч. ст. 7-й Междунар. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых.* Т. 5. Курск, ЮЗГУ, 2022, с. 61–64. EDN: KSBFQF

Ушакова Елизавета Сергеевна — аспирантка кафедры «Теплотехника и теплоэнергетика» Уральского энергетического института УрФУ (Российская Федерация, 620062, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19).

Тупоногов Владимир Геннадьевич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Теплотехника и теплоэнергетика» Уральского энергетического института УрФУ (Российская Федерация, 620062, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ушакова Е.С., Тупоногов В.Г. Оценка влияния анизотропии на прочностные характеристики теплозащитного покрытия камеры сгорания двигательной установки при изменении температуры окружающей среды. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2026, № 1 (156), с. 115–126. EDN: BFLPQZ

**ASSESSMENT OF ANISOTROPY ON STRENGTH PROPERTIES
OF THE PROPULSION SYSTEM COMBUSTION CHAMBER
HEAT-PROTECTIVE COATING DURING CHANGES
IN AMBIENT TEMPERATURE**

E.S. Ushakova

ellizaweta@gmail.com

V.G. Tuponogov

v.g.tuponogov@urfu.ru

UrFU, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract

The coating based on polyurethane, nitrile butadiene, butyl rubbers, that are obtained by compression molding from a calendered rubber mixture, are used to ensure the thermal protection of the solid-fuel rocket engine combustion chamber internal surfaces. Due to the anisotropy (the calender effect), the final coating characteristics depend on the orientation of the blanks placed in the mold before vulcanization. During the propulsion system transportation and storage, internal stresses arise in the heat-protective coatings due to different temperatures at the surface and inside the product and can lead to cracking of the coating and subsequent burn-through of the wall during engine operation. This article purpose is assessment of anisotropy on strength properties of the propulsion system structural element during changes in ambient temperature using the example of the heat-protective material made from the nitrile butadiene rubber. It is established that the tensile strength

Keywords

Solid-fuel rocket engine, combustion chamber heat-protective coating, nitrile butadiene rubber, calender effect, extrusion, thermocycling

of the coating, which initial blank is made by extrusion proposed as the method for anisotropy eliminating, is located between the values defined along and across the calendaring direction. The data is obtained and the coating strength properties decrease rate as a result of exposure to cyclical changes in ambient temperature is estimated

Received 22.04.2025

Accepted 09.06.2025

© Author(s), 2026

REFERENCES

- [1] Shishkov A.Yu., Dunaeva I.V., Sterlengova Zh.I., et al. Analysis of functioning of the rocket engine in the presence stagnant zone. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2014, no. 12-1, pp. 137–142 (in Russ.). EDN: TKIWEB
- [2] Glebov G.A., Vysotskaya S.A. Modeling of coherent vortex structures and self-induced pressure oscillations in the combustion chamber of solid propellant. *Vestnik Kontserna VKO Almaz-Antey* [Journal of Almaz-Antey Air and Space Defence Corporation], 2016, no. 4, pp. 41–48 (in Russ.). EDN: ZCUEVH
- [3] Yagodnikov D.A., Kulikova O.A. Evaluation of state of the solid rocket motor construction during its recycling by method of burning with nozzle removed. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2012, no. 3 (88), pp. 87–94 (in Russ.). EDN: PBZIZF
- [4] Kozhevnikov F.E., Romanov A.P., Savelyev S.K., et al. An analysis of solid propellant burnout inside high-temperature propulsion plants. *Vestnik Kontserna VKO Almaz-Antey* [Journal of Almaz-Antey Air and Space Defence Corporation], 2024, no. 1, pp. 31–41 (in Russ.). EDN: XQZVFA
- [5] Vorozheeva O.A., Yagodnikov D.A. Mathematical model and computational research of combustion chamber wall thermal state for gaseous-propellant oxygen-methane low-thrust rocket engine on a pulse mode. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2013, no. 7, pp. 11–20 (in Russ.). EDN: QYPEHN
- [6] Chaykun A.M., Alifanov E.V., Naumov I.S. Utyl rubbers (review). *Nauka i tekhnika*, 2016, no. 6, pp. 49–59 (in Russ.). EDN: XCFMBV
- [7] Sakharov M.E. Issledovanie vliyaniya vremeni vylezhki na stabilnost svoystv shinnykh rezin i rezinokordnykh kompozitov. Dis. kand. tekhn. nauk [Investigation of the effect of exposure time on the stability of the properties of tire rubbers and rubber-cord composites. Cand. Sc. (Eng.). Diss.]. Moscow, MITKhT im. M.V. Lomonosova, 2000 (in Russ.).
- [8] Mormul R.V., Eremenko P.P., Shaydurov A.A. Mathematical simulations and experiments on the characterization of stress-strain state of elastic support elements under non-stationary thermal mechanical loading. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2019, vol. 21, no. 4, pp. 502–513 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15350/17270529.2019.4.53>

- [9] Korotkaya O.V. The determination of anisotropy coefficients when replacing the actual structure by a structurally anisotropic solid model. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2017, no. 4, pp. 57–66 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-4-57-66>
- [10] Tikhomirova E.A., Budinovskiy S.A., Zhivushkin A.A., et al. Features of thermal fatigue development in details, produced from heat-resistant alloys with coatings. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2017, no. 3, pp. 20–25 (in Russ.). EDN: ZAOLHH
- [11] Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2018, no. 2, pp. 47–58 (in Russ.). EDN: UOPPLH
- [12] Shutilin Yu.F., Churilina E.V., Revina V.A. [Effect of low temperatures on rubbers]. *Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya v oblasti khimii i ekologii — 2022. Sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Fundamental and Applied Research in the Field of Chemistry and Ecology — 2022. Proc. Int. Sc.-Pract. Conf.]. Kursk, YuZGU Publ., 2022, pp. 298–300 (in Russ.). EDN: XFZOUN
- [13] Bobrova I.I., Sinelnikova L.N., Kotova S.V., et al. Adhesive properties of vulcanizates based on various butadiene-nitrile rubber grades investigation. *Kauchuk i rezina*, 2022, vol. 81, no. 6, pp. 292–297 (in Russ.). EDN: MQHZCU
- [14] Fedorova A.F., Davydova M.L., Sokolova M.D., et al. Influence of phenolic antioxidants on conditional tensile strength of butadiene-nitrile rubbers during actual exposure. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All Materials. Encyclopaedic Reference Manual], 2020, no. 12, pp. 22–29 (in Russ.). EDN: RGVVOK
- [15] Bobrova I.V., Kotova S.V., Lyusova L.R., et al. Study of adhesion modifiers for rubbers based on nitrile rubber. *Promyshlennoe proizvodstvo i ispolzovanie elastomerov* [Industrial Production and Use Elastomers], 2022, no. 2, pp. 18–23 (in Russ.). EDN: HWXDNR
- [16] Otrubyanikov A.N., Markov V.V. [Quality modeling of rubber products taking into account standardized requirements for the stages of their life cycle]. *Pokolenie budushchego — 2013: Vzglyad molodykh uchenykh. Mater. Mezhdunar. nauch. konf. T. 6* [Generation of the Future — 2013: The View of Young Scientists. Proc. Int. Sc. Conf. Vol. 6]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., pp. 225–230 (in Russ.). EDN: VKXEAV
- [17] Fedorova A.F., Davydova M.L., Shadrinov N.V., et al. Investigation of changes in the properties of sealing rubbers under the influence of a hydrocarbon environment and temperature conditions. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki* [Arctic and Subarctic Natural Resources], 2022, vol. 27, no. 2, pp. 316–326 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-316-326>
- [18] Ushakova E.S., Tuponogov V.G. Determination of internal stresses arising in the structural elements heat-protective coating of the propulsion system at alterations in the ambient temperature. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2024, no. 9, pp. 110–119 (in Russ.). EDN: OXYBLK

- [19] Dubrovina N.N., Kostin G.F. A method for considering the aging of materials during long-term operation. *Vestnik Kontserna VKO Almaz-Antey* [Journal of Almaz-Antey Air and Space Defence Corporation], 2020, no. 4, pp. 34–40 (in Russ.). EDN: YJKDTQ
- [20] Golyakevich A.A., Shutilin Yu.F., Mikhaleva N.A., et al. [Influence of thermomechanical and thermal processes on the properties of elastomers]. *Nauka molodykh — budushchee Rossii. Sb. nauch. st. 7-y Mezhdunar. nauch. konf. perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh*. T. 5 [The Science of the Young is the Future of Russia. Proc. 7th Int. Conf. on Promising Developments of Young Scientists. Vol. 5]. Kursk, YuZGU Publ., 2022, pp. 61–64 (in Russ.). EDN: KSBFQF

Ushakova E.S. — Post-Graduate Student, Department of Heat and Thermal Power Engineering, Ural Power Engineering Institute, UrFU (Mira ul. 19, Ekaterinburg, 620062 Russian Federation).

Tuponogov V.G. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Heat and Thermal Power Engineering, Ural Power Engineering Institute, UrFU (Mira ul. 19, Ekaterinburg, 620062 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Ushakova E.S., Tuponogov V.G. Assessment of anisotropy on strength properties of the propulsion system combustion chamber heat-protective coating during changes in ambient temperature. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2026, no. 1 (156), pp. 115–126 (in Russ.). EDN: BFLPQZ