

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ ЭКСТРУДИРОВАНИЯ

Е.С. Ушакова
В.Г. Тупоногов
В.А. Хотинов

ellizaweta@gmail.com
v.g.tuponogov@urfu.ru
khotinov@yandex.ru

УрФУ, Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация

Теплозащитные покрытия для камер сгорания реактивного двигателя на основе бутадиен-нитрильного каучука изготавливают выкладкой листов каландрованной резиновой смеси на защищаемую поверхность с последующей вулканизацией при соответствующем режиме. Однако результирующее покрытие обладает анизотропией свойств, обусловленной наличием каландрового эффекта. Для обеспечения постоянства значений физико-механических характеристик во всем объеме покрытия и исключения его возможного разрушения в процессе работы, транспортирования и хранения изделия предложена замена исходной технологии формования резиновой смеси экструдированием. Это требует проведения испытаний для исследования и оценки прочностных свойств материала на примере теплозащитного покрытия, изготовленного из бутадиен-нитрильного каучука марки СКН-26. Установлено, что предел прочности материала находится в положительной зависимости от скорости деформации при испытании на одноосное растяжение. Эмпирически определена и аппроксимирована временная зависимость прочности при растяжении в диапазоне значений скорости перемещения траверсы испытательной машины 0,1...100 мм/мин. Проведено испытание на морозостойкость при температуре – 50 °С до разрушения образцов покрытия. Подтверждено отсутствие разупрочнения материала при отрицательных значениях температуры, связанного с заменой технологии изготовления

Ключевые слова

Теплозащитное покрытие, камера сгорания, бутадиен-нитрильный каучук, экструдирование, предел прочности, временная зависимость прочности при растяжении, морозостойкость

Поступила 22.08.2025
Принята 26.11.2025
© Автор(ы), 2026

Введение. Для защиты стенок камеры сгорания реактивного двигателя (РД) от теплового и эрозионного воздействия потока продуктов сгорания применяют теплозащитные покрытия (ТЗП) на основе бутадиен-нитрильного каучука, вулканизат которого обладает жесткостью, стабильной теплостойкостью и высокими показателями физико-механических свойств [1]. Однако такие теплозащитные материалы (ТЗМ) характеризуются малой эластичностью [2], что может вызывать разрушение ТЗП в процессе транспортирования двигателя, а также во время хранения изделия вследствие больших деформаций несущих оболочек при воздействии перепада температуры окружающей среды [3].

В зависимости от состава ТЗМ выпускаются в виде листов, гранул и порошков. Способ нанесения покрытия на детали изделия выбирается исходя из начального состояния полуфабриката, а также конструкции защищаемой поверхности. Для поверхностей камеры сгорания сложной формы (например, полусферических днищ) зачастую применяется выкладка листов ТЗМ, полученных методом каландрования, который заключается в формовании резиновой смеси путем продавливания ее через зазор между двумя вращающимися навстречу друг другу валками каландра. Перед нанесением покрытия внутренняя поверхность детали очищается на пескоструйной установке, затем наносится клеящий состав и осуществляется выкладка листов неотвержденного ТЗМ. Далее проводится термообработка резиновой смеси в термокамере под давлением и при определенной температуре вплоть до завершения процесса вулканизации ТЗП.

Недостатком описанного способа нанесения покрытия является наличие каландрового эффекта — анизотропии механических свойств, возникающей в резиновой смеси при каландровании и заключающейся в повышенной прочности при растяжении в направлении каландрования (вытягивания) и разупрочнении в перпендикулярном направлении (параллельно валкам) [4, 5]. В связи с тем, что в конструкции ТЗП при транспортировании и хранении изделия возникает сложное напряженное состояние, анизотропность результирующего покрытия может привести к его локальному растрескиванию и последующему прогару стенки камеры сгорания в процессе работы РД.

На прочность ТЗП из полимерных материалов влияют как технология получения, так и технология переработки. Из одного и того же химически идентичного ТЗМ возможно изготовить образцы, характеризующиеся различной молекулярной ориентацией и, как следствие, различными прочностными характеристиками. В целях исключения каландрового эффекта в качестве метода формования резиновой смеси предложено экструдиро-

вание (шприцевание) — процесс непрерывного продавливания нагретой резиновой смеси через экструзионную (профилирующую) головку. Изотропная экструдированная заготовка произвольно укладывается в днище РД, установленное в пресс-форму, и подвергается дальнейшей вулканизации при соответствующих значениях давления и температуры. Физические свойства ТЗМ на основе резины зависят как от состава, так и от условий его получения, поэтому замена методики формования резиновой смеси требует проведения испытаний, объем и параметры которых зависят от условий эксплуатации изделия [6].

Цель работы — представить результаты исследования и оценки физико-механических свойств материала ТЗП, изготовленного из бутадиен-нитрильного каучука марки СКН-26 методом экструдирования.

Материалы и методы. Одной из основных характеристик малопластичных (хрупких) материалов является предел прочности при разрыве σ_B (МПа) — максимальное напряжение, при котором происходит разрушение образца при растяжении. Для определения σ_B нагрузку, при которой произошел разрыв образца, относят к площади поперечного сечения образца F_0 (мм²) до деформации. Для оценки истинного напряжения при растяжении S (МПа) нагрузку, прикладываемую к образцу, относят к фактическому значению его площади поперечного сечения F_i (мм²) в каждый момент времени. Поскольку при деформации полимеров уменьшение поперечного сечения иногда связано не с уменьшением числа структурных элементов в сечении, а с изменением формы цепных молекул, в работе определен предел прочности при разрыве. Еще одна физико-механическая характеристика ТЗМ — предельная степень деформации до разрушения при заданной температуре, оцениваемая по относительному удлинению образца в момент разрыва ε_p (%). Предел прочности при разрыве образцов полимерных материалов может существенно зависеть от условий проведения испытаний на одноосное растяжение, а именно от скорости и температуры деформации [7–9].

Влияние скорости деформации при испытаниях на растяжение связано с кинетикой разрастания микродефектов [10]. Установлено, что значение предела прочности оказывается тем выше, чем выше скорость деформации [11]. Это явление характеризуется временной зависимостью прочности при растяжении, связывающей предел прочности σ_B и время до разрушения образца t_p (с). Временная зависимость прочности при растяжении обусловлена релаксационным характером деформации каучука, который заключается в понижении с течением времени напряже-

ния, необходимого для обеспечения определенной деформации [12, 13]. Внешняя нагрузка, приложенная к образцу, распределяясь по межатомным связям во времени, ослабляет силы сцепления атомов, снижает потенциальный барьер, который препятствует распаду межатомных связей.

Положительная зависимость предела прочности σ_B при разрыве от скорости деформации V (мм/мин) приводит к тому, что значение предела прочности, рассчитанное по стандартной методике, существенно отличается от значения, определенного при эксплуатации. Стандартные испытания высокоэластичных материалов проводят при рекомендуемой постоянной скорости растяжения: для рассматриваемого материала $V = 100$ мм/мин. Ввиду изложенного значение σ_B , определенное при стандартных условиях испытания на растяжение, не является однозначной характеристикой материала, что обуславливает необходимость проводить дополнительные испытания для определения разрушающей силы в процессе растяжения образца под действием постепенно увеличивающейся нагрузки при разных значениях скорости перемещения активного захвата испытательной машины [14].

Влияние температуры исследовано в [15], где приведены результаты расчета температурного поля ТЗП в составе сборочной единицы при проведении испытания термоциклированием, имитирующем влияние перепада температуры окружающей среды. Сборочная единица помещена в термокамеру и подвержена воздействию температуры (2 цикла) по следующей схеме (за один цикл), °С: – 50 (4 ч), – 20 (4 ч), 50 (4 ч), 20 (4 ч). Установлено, что наиболее нагруженное состояние сборочной единицы, обусловленное возникновением кольцевых растягивающих напряжений, реализуется при переходе с режима – 50 °С на режим 20 °С в момент начала нагрева после длительного охлаждения. Ввиду этого особый интерес представляет изучение прочностных характеристик ТЗМ при отрицательных значениях температуры для подтверждения отсутствия разупрочнения при переходе к новой технологии изготовления.

Морозостойкость — способность материала сохранять наиболее важные эксплуатационные свойства при пониженной температуре — для резин определяется в соответствии с ГОСТ 408–78. При снижении температуры замедляются релаксационные процессы, протекающие в ТЗМ при его деформации, уменьшаются эластичность, восстанавливаемость, возрастает жесткость. При достижении ТЗМ температуры стеклования молекулы каучука принимают относительно вытянутую форму, каучук становится твердым и хрупким, способным только к упругим деформа-

циям, т. е. переходит в стеклообразное состояние. Температура стеклования бутадиен-нитрильного каучука марки СКН-26 – 40...42 °С, поэтому наиболее важной является оценка свойств исследуемого ТЗМ при температуре, ниже температуры стеклования, а именно – 50 °С.

В целях определения свойств ТЗМ изготовлены образцы результирующего покрытия, полученного из резиновой смеси на основе бутадиен-нитрильного каучука марки СКН-26 СНТ [16]. Для резины в качестве наполнителя, повышающего прочность вулканизата, взят уголь древесный [17]. Для повышения теплостойкости в смеси применен кальция стеарат. В качестве пластификатора использована смола фенолоформальдегидная (ГОСТ 18694–2017) [18, 19]. Вулканизирующий агент — сера техническая (ГОСТ 127.4–93).

Резиновая смесь, предварительно подвергнутая экструдированию с использованием шнек-пресса МЧТ-63 (ГОСТ 11441–93), вулканизирована в плоской пресс-форме компрессионным способом при температуре 150 °С и давлении 12 МПа с выдержкой в течение 90 мин и последующей термообработкой при температуре 135 °С с выдержкой в течение 150 мин. Из отвержденных заготовок резиновой смеси для определения механических характеристик вырублены образцы в соответствии с ГОСТ 270–75 (тип 2).

Определение предела прочности при разрыве σ_B ТЗМ (или условной прочности в соответствии с ГОСТ 270–75) проведено при испытаниях на одноосное растяжение образцов при комнатной температуре до разрыва на испытательной машине *Instron 3382*. Оценка влияния скорости деформации на σ_B выполнена в диапазоне значений скорости перемещения траверсы испытательной машины $V = 0,1...100$ мм/мин. Для временной зависимости прочности при растяжении в качестве аргумента выступает время до разрушения образца

$$t_p = \frac{\varepsilon_p l_0}{V \cdot 100 \%}, \quad (1)$$

где l_0 — начальная длина рабочей части образца, м (ГОСТ 270–75).

Для определения морозостойкости исследуемого ТЗП испытание на растяжение проведено с использованием испытательной машины *Zwick Roell Z2.5*, совмещенной с камерой тепла и холода КТХ-20 (рис. 1), при значении температуры – 50 °С на предварительно охлажденных и выдержанных в течение 15 мин при этой температуре образцах ТЗМ. С целью получить значение разрушающего напряжения растяжение образцов выполнено вплоть до разрыва, в отличие от требований ГОСТ 408–78.



Рис. 1. Испытательная машина *Zwick Roell Z2.5*, совмещенная с камерой тепла и холода КТХ-20

Результаты и их обсуждение.

Результаты испытаний ТЗМ на растяжение при различных значениях скорости V в логарифмических координатах приведены на рис. 2. Пределы допускаемой относитель-

ной погрешности измерения нагрузки $\pm 0,5 \%$. Экспериментально полученная скоростная зависимость прочности для исследуемого материала в пределах значений скорости деформации $0,1 \dots 100$ мм/мин достоверно описывается аппроксимирующей зависимостью [13]:

$$\sigma_B = aV^n + \sigma_B^{V_{\min}}, \quad (2)$$

где $a = 1$, $n = 0,4$ — коэффициенты аппроксимации; V — скорость деформации, мм/мин; $\sigma_B^{V_{\min}}$ — предел прочности ТЗМ при значении скорости деформации $0,1$ мм/мин и менее, МПа.

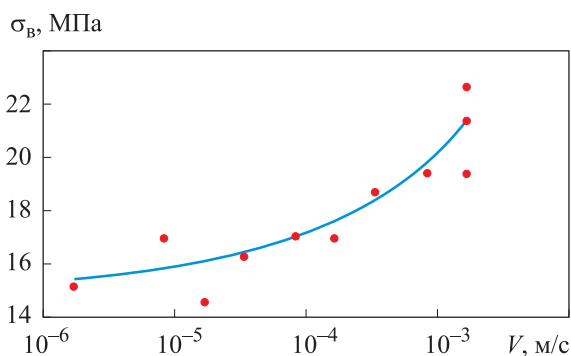


Рис. 2. Экспериментальная (•) и аппроксимирующая (—) зависимость предела прочности от скорости деформации при комнатной температуре в логарифмических координатах

Установлено, что минимальное значение предела прочности в таких условиях проведения испытания реализуется при малых значениях скорости деформации и стремится к постоянному значению ($\sigma_B^{V_{\min}} = 15,4$ МПа при $V = 0,1$ мм/мин). Максимальное значение предела прочности получено при стандартных условиях проведения испытания ($V = 100$ мм/мин) и равно $21,3$ МПа. Установлено, что дальнейшее повы-

шение скорости перемещения траверсы испытательной машины не приводит к соответствующему увеличению значения предела прочности. Зависимость предела прочности ТЗМ от времени (рис. 3) определена путем подстановки из (1) в (2) выражения для скорости деформации V . Для определения значения предела прочности при завершении в образце релаксации внутренних напряжений время проведения испытания составит $t_p \geq 78$ мин.

На основании полученных данных можно сделать вывод о положительной скоростной чувствительности исследуемого ТЗМ: с повышением скорости деформации увеличиваются прочностные свойства материала. Последнее необходимо учитывать при разработке программы и методики испытаний для осуществления входного контроля ТЗМ, проводимого на этапе серийного производства РД, а также при проектировании тепловой защиты новых изделий, эксплуатируемых в тех или иных климатических условиях.

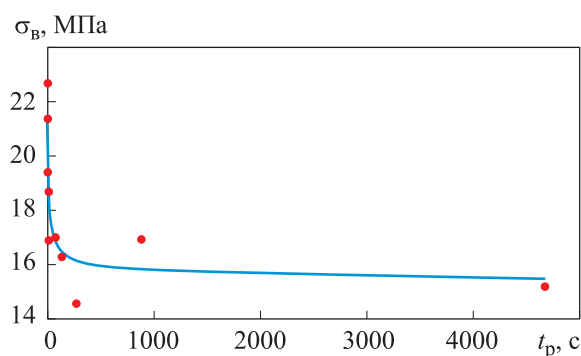


Рис. 3. Экспериментальная (•) и аппроксимирующая (—) зависимость предела прочности от времени при комнатной температуре

Результаты испытаний на морозостойкость, проведенных на пяти образцах ТЗМ, изготовленного методом экструдирования, до разрушения при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, представлены на рис. 4 с отметкой справочного значения предела прочности при той же температуре для ТЗМ, изготовленного по исходной технологии. Пределы допускаемой относительной погрешности измерения нагрузки $\pm 1\%$. Установлено, что ТЗМ, резиновая смесь для изготовления которого отформована методом экструдирования, имеет предел прочности при разрыве $\sigma_b (T = -50\text{ }^{\circ}\text{C}) = 60,5\text{ МПа}$ (вычислено как среднее арифметическое по ГОСТ 270–75) и обеспечивает работоспособность ТЗП в составе изделия при отрицательных значениях температуры эксплуатации.

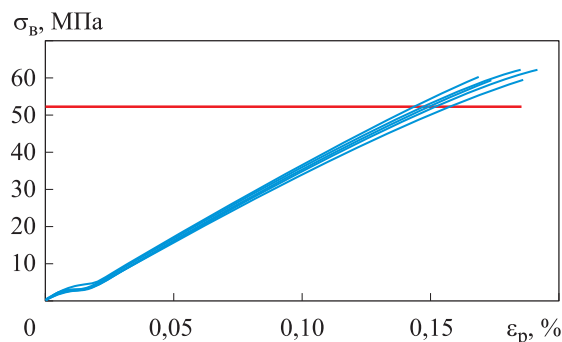


Рис. 4. Зависимость предела прочности от относительного удлинения пяти образцов, изготовленных методом экструдирования (—), и образца в момент разрыва, изготовленного по исходной технологии (—), при $T = -50^\circ\text{C}$

В результате экспериментального исследования физико-механических свойств ТЗМ с улучшенными характеристиками полученных данных достаточно для подтверждения исключения возможного разрушения ТЗП камеры сгорания РД в процессе транспортирования и хранения на этапе эксплуатации изделия.

Заключение. Проведено исследование физико-механических свойств материала ТЗП, изготовленного из бутадиен-нитрильного каучука марки СКН-26 методом экструдирования, в условиях транспортирования и хранения изделия.

В результате испытаний на растяжение при значениях скорости деформации в диапазоне 0,1...100 мм/мин определена аппроксимирующая зависимость, достоверно описывающая взаимосвязь эмпирических значений предела прочности σ_B и скорости V для исследуемого ТЗМ: увеличение скорости приводит к возрастанию предела прочности. Получено минимальное значение предела прочности $\sigma_B^{V_{\min}} = 15,4$ МПа. По результатам испытаний на морозостойкость при температуре -50°C до разрушения образцов ТЗП, изготовленного методом экструдирования, определено значение предела прочности 60,5 МПа. Установлено, что такая технология формования резиновой смеси обеспечивает целостность и работоспособность покрытия в составе изделия при отрицательных значениях температуры.

Полученные в процессе исследования данные о ТЗП, изготовленного методом экструдирования, подтверждают целесообразность замены технологии формования резиновой смеси в целях увеличения надежности тепловой защиты камеры сгорания РД и могут стать основой проектирования новых изделий, использующих в составе ТЗП на основе исследованного ТЗМ.

В качестве дальнейшего направления исследования может быть экспериментально определена скоростная зависимость прочности изучаемого ТЗМ при различных значениях температуры [20].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чайкун А.М., Алифанов Е.В., Наумов И.С. Резины на основе бутилкаучука (обзор). *Новости материаловедения. Наука и техника*, 2016, № 6, с. 49–59. EDN: XCFMBV
- [2] 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>
- [3] 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. DOI: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-3-20-25>
- [4] Сахаров М.Э. Исследование влияния времени вылежки на стабильность свойств шинных резин и резинокордных композитов. Дис. ... канд. техн. наук. М., МИТХТ им. Ломоносова, 2000.
- [5] 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>
- [6] Халдеева А.Р., Давыдова М.Л., Соколова М.Д. Свойства и структура бутадиен-нитрильной резины, модифицированной терморасширенным графитом. *Наука и образование*, 2016, № 3, с. 59–63. EDN: WYNFWN
- [7] Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор). *Авиационные материалы и технологии*, 2018, № 2, с. 47–58. EDN: UOPPLH
- [8] 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
- [9] Федорова 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>

- [10] Валишин А.А., Степанова Т.С., Карташов Э.М. Математическое моделирование разрушения полимеров и композитов в переменных температурно-силовых внешних условиях. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2011, № S3, с. 17–33. EDN: OXNCVB
- [11] Терешатов В.В., Макарова М.А., Слободинюк А.И. и др. Новые представления о взаимосвязи структуры, предельных физико-механических свойств и деформационного поведения наноструктурированных полимерных систем на основе олигодиизоцианатов. *Вестник Пермского научного центра*, 2017, № 1, с. 81–86. EDN: WTACVD
- [12] Гаришин О.К., Шадрин В.В., Морозов И.А. Анализ вязкоупругих свойств силиконовых резин. *Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния*, 2024, № 4, с. 40–52. DOI: <https://doi.org/10.37972/chgpu.2024.62.4.003>
- [13] Валишин А.А., Джемесюк И.А., Карташов Э.М. Кинетика трещин в полимерах и композитах на их основе при механических и тепловых нагрузках. *Национальная ассоциация ученых*, 2023, № 86, с. 44–55. EDN: BXSTNV
- [14] Гуль В.Е. Структура и прочность полимеров. М., Химия, 1978.
- [15] 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
- [16] 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
- [17] Гаришин О.К., Шадрин В.В. Исследование механического поведения эластомерных нанокомпозитов при больших циклических сдвиговых деформациях. *Вестник Пермского университета. Физика*, 2021, № 3, с. 63–72. DOI: <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2021-3-63-72>
- [18] 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. DOI: <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2020-0-12-22-29>
- [19] Павлова В.В., Соколова М.Д., Федорова А.Ф. Влияние содержания и природы пластификатора на свойства бутадиен-нитрильной резины. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2021, № 14, с. 222–232. DOI: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0303>
- [20] Хабибуллоев Х. Исследование роли распада химических связей эластомеров в механически напряженном состоянии. *Доклады Национальной академии наук Таджикистана*, 2025, № 4, с. 366–371. EDN: HSLYNC

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).

Хотинов Владислав Альфредович — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Термообработка и физика металлов» 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., Хотин В.А. Исследование физико-механических свойств материала теплозащитного покрытия, изготовленного методом экструдирования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2026, № 3 (126), с. 73–86. EDN: MJTJPG

STRENGTH PROPERTIES RESEARCH OF HEAT-PROTECTIVE COATING PRODUCED BY EXTRUSION

E.S. Ushakova

ellizaweta@gmail.com

V.G. Tuponogov

v.g.tuponogov@urfu.ru

V.A. Khotinov

khotinov@yandex.ru

UrFU, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract

Heat-protective coatings of the rocket engine combustion chamber, based on the butadiene-nitrile rubber, are produced by calendered rubber mixture laying on the heat protected surface with a subsequent vulcanization in an appropriate mode. However, the final coating exhibits properties anisotropy due to the calender effect presence. Replacing the initial rubber mixture manufacturing technology, which requires testing for the material strength properties research and evaluation using heat-protective coating made of NBR-26 as an example, with a extrusion technology has been suggested to ensure the mechanical characteristics consistency throughout the coating. The article establishes that the material tensile strength value is positively dependence with a deformation rate during uniaxial tensile testing. The time dependence of tensile strength has been empirically determined and approx-

Keywords

Heat-protective coating, combustion chamber, butadiene-nitrile rubber, extrusion, tensile strength, time dependence of tensile strength, frost resistance

imated in the range of testing machine movement traverse speed values from 0.1 to 100 mm/min. The frost resistance test at a temperature of -50°C with the coating samples destruction has been defined, the material weakening absence at negative temperatures had responsible for the technology manufacturing replacement has been confirmed

Received 22.08.2025

Accepted 26.11.2025

© Author(s), 2026

REFERENCES

- [1] Chaykun A.M., Alifanov E.V., Naumov I.S. Butyl rubbers (review). *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2016, no. 6, pp. 49–59 (in Russ.). EDN: XCFMBV
- [2] 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>
- [3] Tikhomirova E.A., Budinovskiy S.A., Zhivushkin A.A., et al. Mathematical simulations and experiments on the characterization of stress-strain state of elastic support elements under non-stationary thermal mechanical loading. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2017, no. 3, pp. 20–25 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-3-20-25>
- [4] Sakharov M.E. Issledovanie vliyaniya vremeni vylezhki na stabilnost svoystv shynykh rezin i rezinokordnykh kompozitov. Diss. 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.]. M., Lomonosov MIFChT, 2000 (in Russ.).
- [5] 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>
- [6] Khaldeeva A.R., Davydova M.L., Sokolova M.D. Properties and structure of butadiene-nitrile rubber modified by thermoexpanded graphit. *Nauka i obrazovanie*, 2016, no. 3, pp. 59–63 (in Russ.). EDN: WYNFWN
- [7] 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
- [8] Shutilin Yu.F., Churilina E.V., Revina V.A. [The 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. Sci.-Pract. Conf.]. Kursk, SWSU Publ., 2022, pp. 298–300 (in Russ.). EDN: XFZOUN

- [9] 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>
- [10] Valishin A.A., Stepanova T.S., Kartashov E.M. Mathematical modeling of polymer and composite fracture in variable temperature and force external conditions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2011, no. S3, pp. 17–33 (in Russ.). EDN: OXNCVB
- [11] Tereshatov V.V., Makarova M.A., Slobodinyuk A.I., et al. New vision of the relationship of the structure, finite physico-mechanical properties and strain behavior of nano-structured polymer systems based on oligodiisocyanates. *Vestnik Permskogo nauchnogo tsentra* [Perm Scientific Center Journal], 2017, no. 1, pp. 81–86 (in Russ.). EDN: WTACVD
- [12] Garishin O.K., Shadrin V.V., Morozov I.A. Analysis of viscoelastic properties of silicone rubbers. *Vestnik ChGPU im. I.Ya. Yakovleva. Ser. Mekhanika predelnogo sostoyaniya* [Vestnik of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Ser. Mechanics of Limit State], 2024, no. 4, pp. 40–52 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37972/chgpu.2024.62.4.003>
- [13] Valishin A.A., Dzhemesyuk I.A., Kartashov E.M. Kinetic characteristics of cracks in polymers and composites based on them under mechanical and thermal loads. *Natsionalnaya assotsiatsiya uchenykh*, 2023, no. 86, pp. 44–55 (in Russ.). EDN: BXSTNV
- [14] Gul V.E. *Struktura i prochnost polimerov* [Structure and strength of polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1978.
- [15] 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
- [16] 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
- [17] Garishin O.K., Shadrin V.V. Study of mechanical behavior of elastomeric nanocomposites under large cyclic shear deformations. *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika* [Bulletin of Perm University. Physics], 2021, no. 3, pp. 63–72 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2021-3-63-72>
- [18] 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.). DOI: <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2020-0-12-22-29>

[19] Pavlova V.V., Sokolova M.D., Fedorova A.F. Influence of the content and nature of the plasticizer on the properties of butadiene-nitrile rubber. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies], 2021, no. 14, pp. 222–232 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0303>

[20] Khabibullov Kh. Investigation of the role of chemical bond decomposition of elastomer in mechanically stressed condition. *Doklady Natsionalnoy akademii nauk Tadzhikistana*, 2025, no. 4, pp. 366–371 (in Russ.). EDN: NSLYNC

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).

Khotinov V.A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Heat Treatment and Physics of Metals, 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., Khotinov V.A. Strength properties research of heat-protective coating produced by extrusion. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2026, no. 3 (126), pp. 73–86 (in Russ.).

EDN: MJTJPG