

---

Научная статья

УДК 621.798.264

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-123-132

## ВЛИЯНИЕ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И КИНЕТИКУ ВУЛКАНИЗАЦИИ ПОЛИСУЛЬФИДНОГО ГЕРМЕТИКА

И.С. Макущенко<sup>1</sup>, И.А. Козлов<sup>1</sup>, Д.Н. Смирнов<sup>1</sup>, Е.В. Куршев<sup>1</sup>, С.Л. Лонский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Исследовано влияние различных ингибиторов коррозии на время сшивки, тепловой поток и структурообразование полисульфидного герметика, в состав которого они введены. Изучена зависимость скорости сшивки полисульфидного герметика с ингибиторами коррозии от температуры и относительной влажности воздуха. Определены температуры стеклования герметика. Показана взаимосвязь микроструктуры и защитных свойств герметика.

**Ключевые слова:** полимеры, полисульфидный герметик, ингибиторы коррозии, микроструктура, кинетика вулканизации

**Для цитирования:** Макущенко И.С., Козлов И.А., Смирнов Д.Н., Куршев Е.В., Лонский С.Л. Влияние ингибиторов коррозии на микроструктуру и кинетику вулканизации полисульфидного герметика // Труды ВИАМ. 2024. № 4 (134). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-123-132.

Scientific article

## INFLUENCE OF CORROSION INHIBITORS ON THE MICROSTRUCTURE AND VULCANIZATION KINETICS OF POLISULFIDE SEALANT

I.S. Makushchenko<sup>1</sup>, I.A. Kozlov<sup>1</sup>, D.N. Smirnov<sup>1</sup>, E.V. Kurshev<sup>1</sup>, S.L. Lonskii<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The article presents the results of studies of the effect of corrosion inhibitors of various chemical compositions on the time of crosslinking, the thermal effect and the structural formation of a polysulfide sealant in which they are included. The data on the dependence of the crosslinking rate of a polysulfide sealant with corrosion inhibitors on temperature and relative humidity are presented; the phase transitions and the change in the heat capacity of the sealant samples are determined; the microstructure of the sealant is investigated and its effect on the protective properties of the composition is described.

**Keywords:** polymers, polysulfide sealant, corrosion inhibitors, microstructure, kinetics of vulcanization

**For citation:** Makushchenko I.S., Kozlov I.A., Smirnov D.N., Kurshev E.V., Lonskii S.L. Influence of corrosion inhibitors on the microstructure and vulcanization kinetics of polysulfide sealant. *Trudy VIAM*, 2024, no. 4 (134), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-123-132.

### Введение

Защита металлических конструкций техники от появления и распространения коррозии – одна из актуальных задач материаловедения. Помимо широко применяемых способов защиты металла, начиная с обработки поверхности и заканчивая покрытием

полимерными материалами, дополнительно используют антикоррозионные полисульфидные герметизирующие материалы. Такие герметики хорошо зарекомендовали себя при нанесении на элементы конструкций:

- наиболее подверженных воздействию агрессивных факторов окружающей среды;
- узлов техники, испытывающих высокие знакопеременные нагрузки;
- в местах контакта разнородных металлов [1–6].

В качестве основных компонентов антикоррозионных полисульфидных герметизирующих материалов, снижающих риски возникновения коррозионных очагов и скорость распространения коррозии, применяют ингибиторы [7, 8].

Ингибиторы коррозии не оказывают значительного влияния на механические свойства полисульфидного герметика. Однако в зависимости от природы ингибитора технологические свойства антикоррозионных герметизирующих материалов (жизнеспособность, время достижения твердости) изменяются, что необходимо учитывать при их применении.

Изучение микроструктуры и термодинамики герметизирующих материалов позволяет выявить корреляцию между микроструктурой и свойствами материалов, при которой влияющими факторами являются тип материала, введенные компоненты, время вулканизации и т. д. [9, 10].

В данной статье представлены результаты исследования микроструктуры, термодинамических эффектов и времени сшивки полисульфидного герметика с различными ингибиторами коррозии, позволяющие определить механизм взаимодействия ингибиторов и полисульфидного олигомера внутри материала. Таким образом, полученные данные имеют практическую значимость для оценки влияния структуры на технологические свойства герметика и механизм работы ингибитора [11–15].

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Материалы и методы

Объектом исследования является полисульфидный герметик, содержащий различные ингибиторы коррозии:

- хроматные – хромат циклогексиламина (ХЦА) ( $C_6H_{11}NH_2 \cdot H_2CrO_4$ ) и тетраоксихромат цинка ( $ZnCrO_4 \cdot 4Zn(OH)_2$ );
- бесхроматный – фосфат цинка ( $Zn_3(PO_4)_2$ ).

Для проведения испытаний изготовили четыре варианта герметика с различными ингибиторами коррозии и без них. Ингибиторы коррозии вводили в состав герметика в количестве 1 %. Герметик вулканизовали путем смешивания герметизирующей пасты на основе тиокола и вулканизирующей пасты на основе  $MnO_2$  с последующей выдержкой по «горячему» типу при температуре 25 °С и относительной влажности воздуха 50 % в течение 24 ч, далее – при температуре 70 °С и относительной влажности воздуха 10 % в течение 24 ч [16, 17].

Для проведения микроструктурных исследований образцы герметика охлаждали в среде жидкого азота, после чего из них изготавливали сколы. Полученные сколы приклеивали с помощью токопроводящего клея на углеродной основе к держателям образцов для сканирующего электронного микроскопа и сушили на воздухе. После полного высыхания клея при комнатной температуре поверхности сколов подвергали ионно-плазменному травлению в вакуумной установке. Для снятия электрических зарядов на поверхность диэлектриков наносили слой углерода в установке магнетронного распыления.

Микроструктурные исследования полисульфидного герметика проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Для оценки термодинамических процессов образцы помещали в дифференциальный сканирующий калориметр при динамическом нагреве со скоростью  $10 \pm 0,5$  °С/мин в воздушной среде [18].

Для определения влияния ингибитора коррозии на время шивки полисульфидного герметика образцы выдерживали в климатической камере при температурах 10, 15, 20, 25, 30, 35 °C и относительной влажности воздуха 10, 35, 50, 75 % до достижения твердости по Шору А 30±3 усл. ед. Ориентир момента достижения твердости по Шору А 30±3 усл. ед. выбрали, основываясь на требованиях иностранных производителей герметиков, в частности компании PPG Aerospace [19].

### Результаты

Исследована кинетика вулканизации полисульфидного герметика с ингибиторами коррозии. Зависимости времени достижения твердости по Шору А 30±3 усл. ед. от температуры в интервале от 10 до 35 °C при разных значениях относительной влажности воздуха представлены на рис. 1.

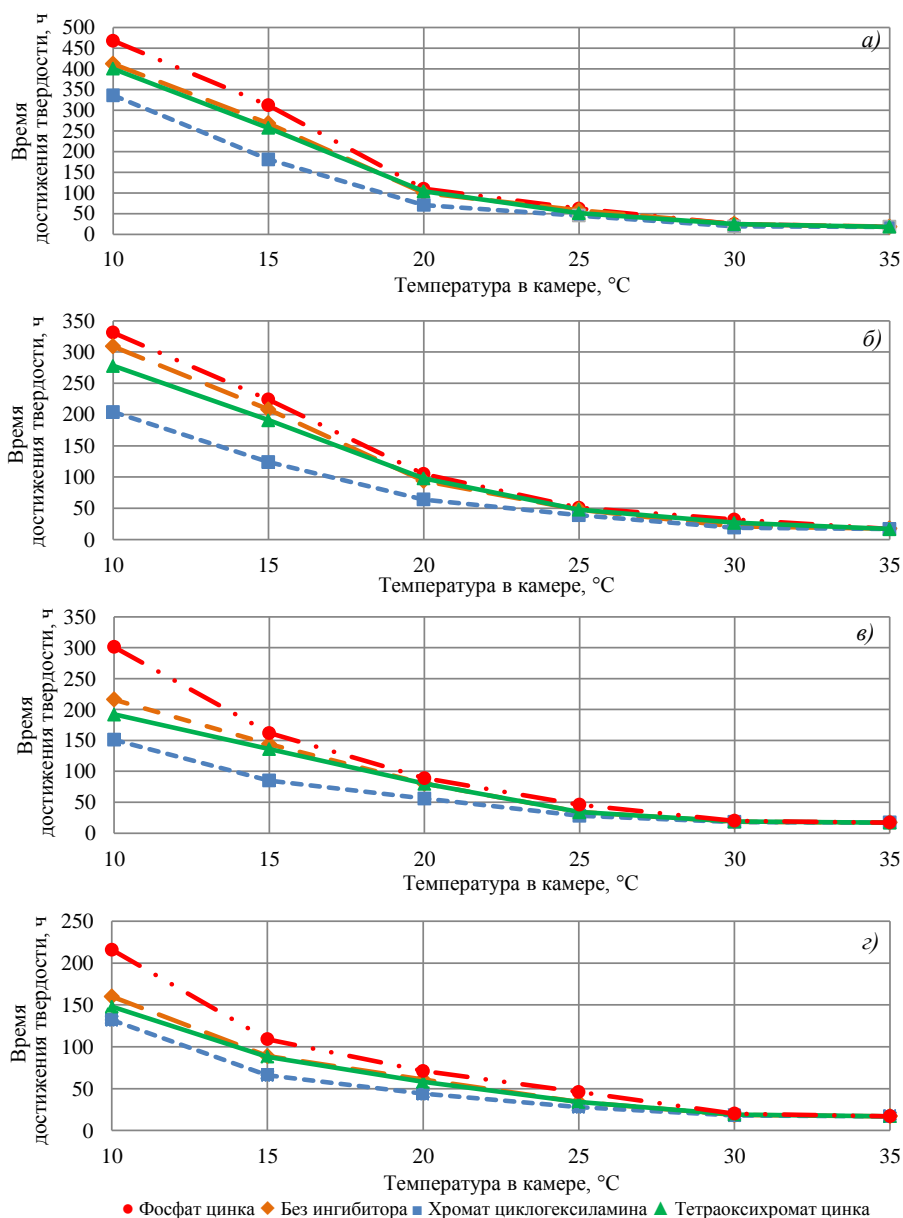


Рис. 1. Зависимости времени достижения твердости по Шору А 30±3 усл. ед. от температуры в климатической камере при относительной влажности воздуха 10 (а), 35 (б), 50 (е) и 75 % (з) для герметиков, содержащих различные ингибиторы коррозии

Установлено, что все образцы полисульфидного герметика, содержащие и не содержащие ингибиторы коррозии, при увеличении температуры и относительной влажности воздуха быстрее достигают установленного показателя твердости. Полисульфидный герметик, содержащий ХЦА, при различной относительной влажности воздуха при температуре  $<30\text{ }^{\circ}\text{C}$  быстрее достигает твердости по Шору А  $30\pm 3$  усл. ед. по сравнению с другими образцами, герметик с фосфатом цинка – медленнее.

Герметики, содержащие тетраоксихромат цинка, и без ингибитора практически одновременно достигают твердости по Шору А  $30\pm 3$  усл. ед. при различных значениях относительной влажности и температуры в пределах от  $15$  до  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однако при температуре  $<15\text{ }^{\circ}\text{C}$  время достижения твердости для полисульфидного герметика с тетраоксихроматом сокращается.

Для детального изучения влияния ингибиторов коррозии на полисульфидный герметик проведен анализ методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) (рис. 2).

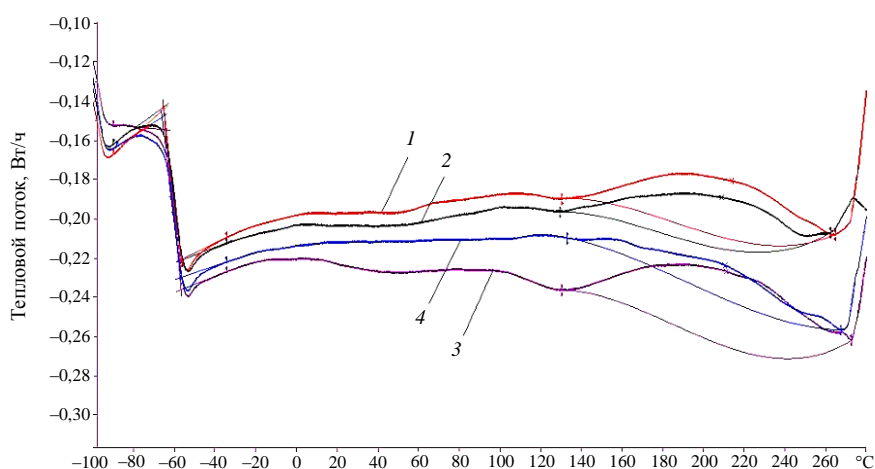


Рис. 2. Кривые дифференциальной сканирующей калориметрии (—) и интерполированные условные базисные линии (—) для полисульфидного герметика, содержащего в качестве ингибитора коррозии фосфат цинка (1), тетраоксихромат цинка (2), хромат циклогексиламина (3), и без ингибитора (4)

Введение в состав герметика ингибирующих добавок практически не влияет на температуру стеклования композиции. Установлено, что стеклование полисульфидных герметиков с ингибиторами коррозии и без ингибитора начинается при температуре  $36,0\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , полностью стеклообразным герметик становится при температуре  $-65,0\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Наблюдаемый разброс значений температур стеклования для образцов с различными ингибиторами коррозии и без ингибитора невелик и не превышает погрешности прибора.

На кривых ДСК для всех образцов с ингибиторами наблюдается увеличение теплового потока при температурах от  $139\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  с образованием экзотермических пиков, для образца полисульфидного герметика без ингибитора – при температурах от  $131\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Площадь области между кривой ДСК и интерполированной условной базисной линией увеличивается в ряду образцов: полисульфидный герметик без ингибитора – с фосфатом цинка – с тетраоксихроматом цинка – с ХЦА [20].

Исследованы микроструктуры на срезах поверхностей полисульфидного герметика с ингибиторами коррозии и без ингибитора. Микрофотографии поверхностей представлены на рис. 3–6.

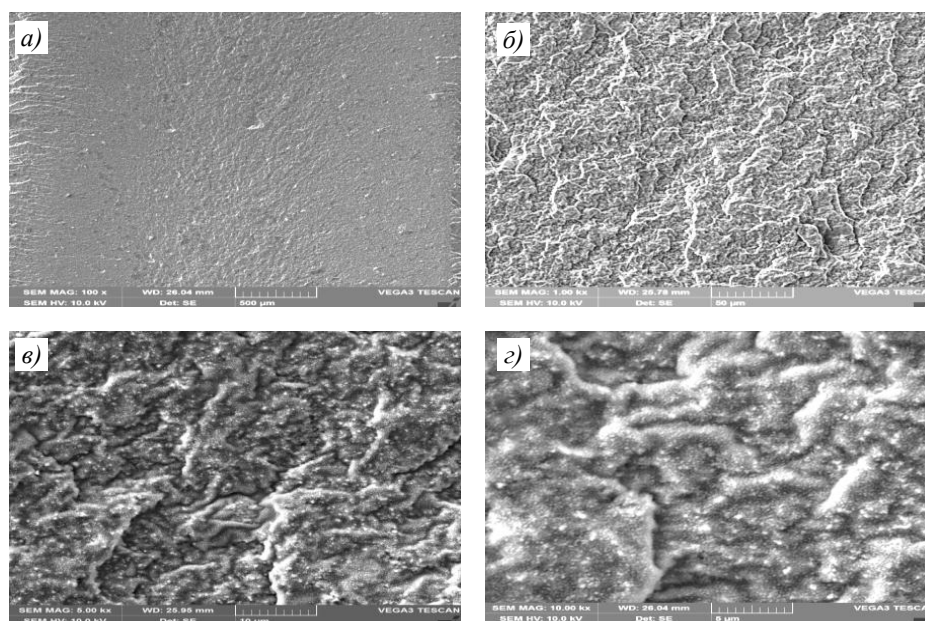


Рис. 3. Микроструктура поверхности среза образца герметика без модификации при увеличении  $\times 100$  (а),  $\times 1000$  (б),  $\times 5000$  (в) и  $\times 10000$  (г)

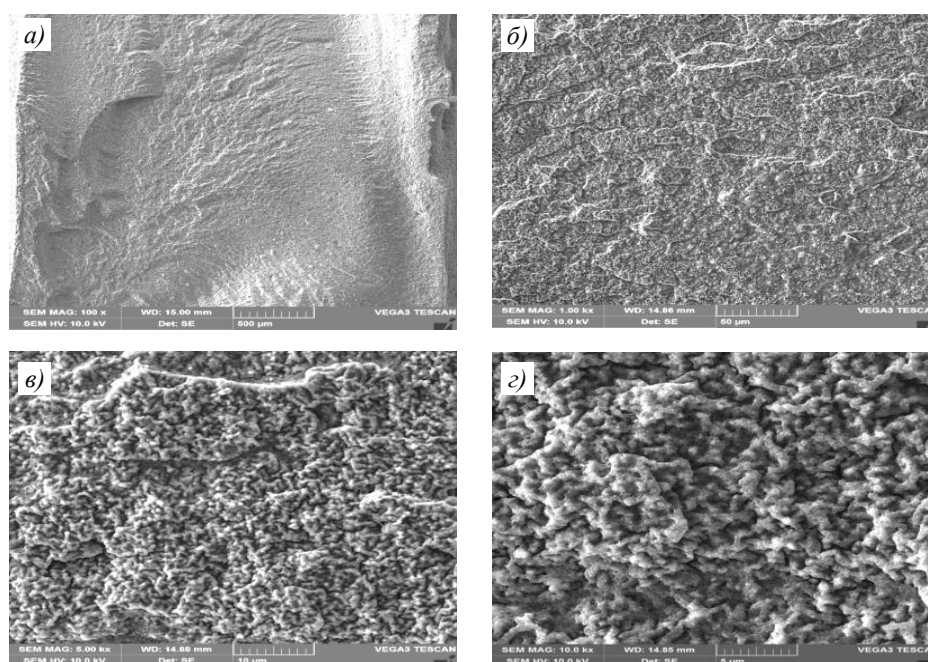


Рис. 4. Микроструктура поверхности среза образца герметика, содержащего тетраоксихромат цинка, при увеличении  $\times 100$  (а),  $\times 1000$  (б),  $\times 5000$  (в) и  $\times 10000$  (г)

На микрофотографиях среза полисульфидного герметика без ингибитора при увеличении  $\times 10000$  наблюдается нечеткая волнообразная структура с наличием точечных агломератов наполнителя. На срезе образца с тетраоксихроматом цинка обнаружены нитевидные образования, разделенные между собой открытым пространством, явные агломераты отсутствуют. Микроструктура полисульфидного герметика с фосфатом цинка представляет собой плотную размытую поверхность с наличием точечных остроугольных агломератов.

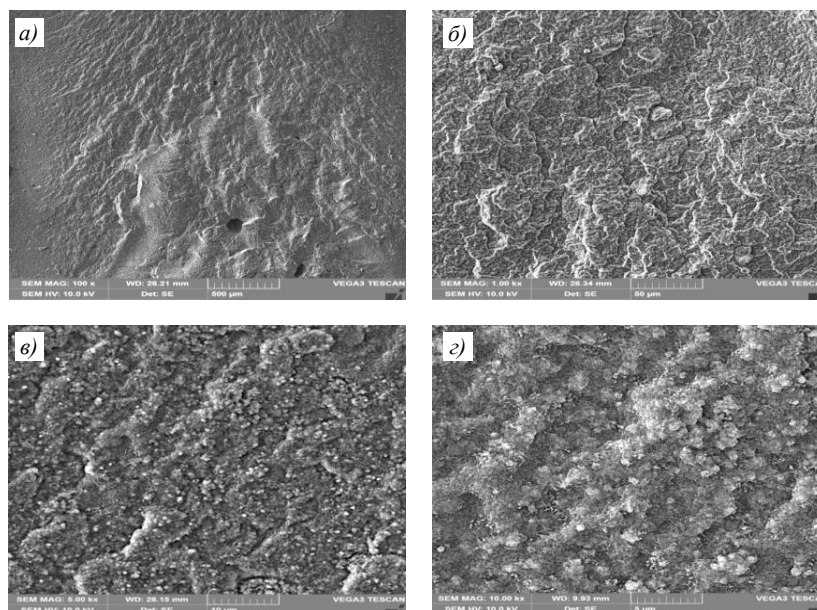


Рис. 5. Микроструктура поверхности среза образца герметика, содержащего фосфат цинка, при увеличении  $\times 100$  (а),  $\times 1000$  (б),  $\times 5000$  (в) и  $\times 10000$  (г)

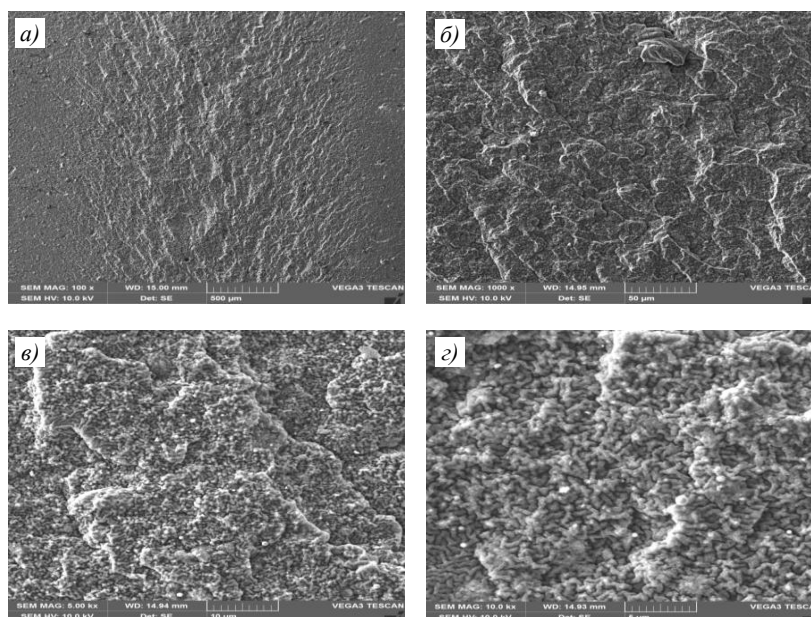


Рис. 6. Микроструктура поверхности среза образца герметика, содержащего хромат цикло-гексиламина, при увеличении  $\times 100$  (а),  $\times 1000$  (б),  $\times 5000$  (в) и  $\times 10000$  (г)

Микроструктура среза полисульфидного герметика с ХЦА визуально близка к микроструктуре герметика, содержащего тетраоксихромат цинка, т. е. наблюдаются четкие нитевидные образования. Однако структура герметика с ХЦА более плотная за счет меньшего размера нитей, видны точечные остроугольные агломераты.

### Обсуждение и заключения

По результатам проведенных исследований установлено:

– уменьшение времени достижения твердости по Шору А  $30 \pm 3$  усл. ед. для герметика с ХЦА связано с наличием шестивалентного хрома и аминогруппы. Шестивалентный хром входит в состав активных вулканизирующих агентов, таких как бихромат

натрия, и является сокатализатором вулканизации, так же как и аминогруппа [21]. Увеличение скорости молекулярной сшивки олигомера с последующим образованием полимерной структуры происходит за счет дополнительного взаимодействия шестивалентного хрома и аминогрупп в объеме полисульфидного герметика с образованием новых связей. Наибольшая площадь области между кривой ДСК и интерполированной условной базисной линией, а следовательно и наибольший тепловой эффект, наблюдается у герметика, содержащего ХЦА. По-видимому, высокое значение экзотермического эффекта обусловлено происходящими химическими реакциями, которые сопровождаются образованием и/или разрушением новых структурных связей, а также испарением остаточной влаги. Для понимания термодинамических процессов, происходящих в полисульфидном герметике с ингибиторами коррозии, необходимы дополнительные исследования;

– практически идентичное время достижения твердости полисульфидных герметиков с тетраоксихроматом цинка и без ингибитора обусловлено наличием шестивалентного хрома. Тетраоксихромат цинка нерастворим в воде, поэтому скорость взаимодействия компонентов в среде полисульфидного герметика значительно меньше по сравнению с ХЦА. Шестивалентный хром действует как сокатализатор реакции, однако цинксодержащие компоненты или ионы в составе эластомерных композиций могут влиять на формирование полисульфидных мостиков с образованием поперечных связей, тем самым увеличивая время вулканизации [22]. Таким образом, тетраоксихромат цинка проявляет каталитические и ингибирующие свойства при вулканизации полисульфидного герметика, что отражается на скорости реакции [23, 24]. Анализ кривых ДСК показал, что полисульфидный герметик с тетраоксихроматом цинка имеет более высокий тепловой поток по сравнению с образцом без ингибитора, что может свидетельствовать о более высокой скорости термохимических реакций, происходящих в структуре;

– максимальное время достижения твердости для полисульфидного герметика с фосфатом цинка и тетраоксихроматом цинка объясняется низкой водорастворимостью ингибиторов и отсутствием ионов сокатализаторов реакции сшивки. Фосфат цинка взаимодействует с полисульфидным олигомером гораздо медленнее, чем хроматные ингибиторы. Анализ микрофотографий подтвердил, что микроструктура среза полисульфидного герметика с фосфатом цинка значительно отличается от микроструктуры герметика не только без ингибитора коррозии, но и с тетраоксихроматом цинка и представляет собой плотную размытую поверхность с наличием точечных остроугольных агломератов.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность заместителю начальника лаборатории по науке, к.т.н. А.А. Евдокимову за оказанную помощь в проведении исследований и консультацию при написании статьи.

### Список источников

1. Макущенко И.С., Смирнов Д.Н., Козлов И.А. Полисульфидные антикоррозионные герметики и ингибирующие составы (обзор литературы) // Коррозия: защита, материалы. 2023. № 1. С. 20–25.
2. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Еськов А.А., Лебедева Т.А. Комплексные системы лакокрасочных покрытий для защиты металлических полимерных композиционных материалов, а также их контактных соединений от воздействия агрессивных факторов // Лакокрасочные материалы и их применение. 2016. № 6. С. 32–35.
3. Ракова Т.М., Козлова А.А., Нефедов Н.И., Лаптев А.Б. Исследование влияния органических и неорганических ингибиторов коррозии на коррозионное растрескивание высокопрочных сталей // Труды ВИАМ. 2017. № 6 (54). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-12-12.

4. Рахманкулов Д.Л., Бугай Д.Е., Габитов А.И., Голубев М.В., Лаптев А.Б., Калимуллин А.А. Ингибиторы коррозии: в 2 т. Уфа: Реактив, 1997. Т. 1: Основы теории и практики применения. С. 117–128.
5. Розенфельд И.Л. Ингибиторы коррозии. М.: Химия, 1977. 552 с.
6. Макущенко И.С., Козлов И.А., Смирнов Д.Н., Вдовин А.И., Карачевцев Ф.Н. Исследование защитных свойств полисульфидного герметика, содержащего ингибиторы коррозии // Клеи. Герметики. Технологии. 2023. № 11. С. 7–14. DOI: 10.31044/1813-7008-2023-0-11-7-14.
7. Розенфельд И.Л., Рубинштейн Ф.И. Антикоррозионные грунтовки и ингибированные лакокрасочные покрытия. М.: Химия, 1980. С. 95–112.
8. Елисеев О.А., Брык Я.А., Смирнов Д.Н. Модификация полисульфидных герметиков ингибиторами коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2016. № S2 (44). С. 15–21. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-15-21.
9. Сорокин О.Ю. К вопросу о механизме взаимодействия углеродных материалов с кремнием (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 65–70 DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-65-70.
10. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
11. Селезнев Д.В., Кожевникова Ю.М., Белоброва И.А., Исхужин Р.Р., Ташланов В.В. Методика определения энтальпии эндо- и экзотермических эффектов в композиционных фазопереходных материалах на основе ДСК-исследования // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-123-131.
12. Чалых А.Е. Диффузия в полимерных системах. М.: Химия, 1987. 312 с.
13. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Луцкая С.А. Методы повышения коррозионной стойкости жаропрочных никелевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 4 (64). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-3-8.
14. Железняк В.Г., Сердцелюбова А.С., Меркулова Ю.И., Скивко П.В. Система лакокрасочных покрытий на основе полиуретановой эмали для защиты лобовых обогреваемых поверхностей изделий авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.11.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-120-128.
15. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
16. Коврижкина Н.А., Кузнецова В.А., Силаева А.А., Марченко С.А. Способы улучшения свойств лакокрасочных покрытий с помощью введения различных наполнителей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48.
17. Сердцелюбова А.С., Меркулова Ю.И., Загора А.Г., Куршев Е.В. Исследование параметров отверждения и защитной способности системы покрытия типа «база/лак» для окраски внешней поверхности авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-93-104.
18. ГОСТ Р 56755–2015. Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 5. Определение характеристических температур и времени по кривым реакции, определение энтальпии и степени превращения. М.: Стандартинформ, 2016. 15 с.
19. PPG Aerospace. P/S 870 Class C Corrosion Inhibitive Sealant. URL: <https://www.ppgaerospace.com/Products/Sealants/Corrosion-Inhibitive/P-S-870-Class-C-Corrosion-Inhibitive-Sealant> (дата обращения: 04.12.2023).
20. Ситникова В.Е., Пономарева А.А., Успенская М.В. Методы термического анализа: практикум. СПб: Университет ИТМО, 2021. 152 с.
21. Валева Р.Р. Высоконаполненные герметизирующие композиции на основе полисульфидных олигомеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2004. 16 с.

22. Каюшников С.Н., Прокопчук Н.Р., Усе Е.П., Алфимов И.В. Исследование влияния цинксо-держающих технологических добавок на технические свойства резин // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 6. С. 36–40.
23. Fiaud C. Theory and Practice of Vapour Phase Inhibitors // A Working Party Report on Corrosion Inhibitors. London: The Institute of Materials, 1994. P. 1–11.
24. Козлова А.А., Кондратьева О.В., Кузнецова В.А. Основные проблемы применения влагозащитных электроизоляционных материалов отечественного производства для автоматизированного селективного нанесения на печатные узлы (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.11.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-72-83.

#### References

1. Makushchenko I.S., Smirnov D.N., Kozlov I.A. Polysulfide anti-corrosion sealants and inhibitory compounds (literature review). *Korroziya: zashchita, materialy*, 2023, no. 1, pp. 20–25.
2. Kablov E.N., Semenova L.V., Eskov A.A., Lebedeva T.A. Complex systems of paint and varnish coatings for the protection of metal polymer composite materials, as well as their contact connections from the effects of aggressive factors. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2016, no. 6, pp. 32–35.
3. Rakova T.M., Kozlova A.A., Nefedov N.I., Laptev A.B. The study of influence organic and inorganic corrosion inhibitors on the stress-corrosion cracking high-strength steels. *Trudy VIAM*, 2017, no. 6 (54), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 24, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-12-12.
4. Rakhmankulov D.L., Bugai D.E., Gabitov A.I., Golubev M.V., Laptev A.B., Kalimullin A.A. *Corrosion inhibitors*: in 2 vols. Ufa: Reaktiv, 1997, vol. 1: Fundamentals of theory and practice of application, pp. 117–128.
5. Rosenfeld I.L. *Corrosion inhibitors*. Moscow: Khimiya, 1977, 552 p.
6. Makushchenko I.S., Kozlov I.A., Smirnov D.N., Vdovin A.I., Karachevtsev F.N. Study of the protective properties of polysulfide sealant containing corrosion inhibitors. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2023, no. 11, pp. 7–14. DOI: 10.31044/1813-7008-2023-0-11-7-14.
7. Rosenfeld I.L., Rubinshtein F.I. *Anti-corrosion primers and inhibited paint and varnish coatings*. Moscow: Khimiya, 1980, pp. 95–112.
8. Eliseev O.A., Bryk Ya.A., Smirnov D.N. Polysulfide sealants modification by corrosion inhibitors. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. S2 (44), pp. 15–21. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-15-21.
9. Sorokin O.Yu. On the issue of the mechanism of interaction between carbon materials and Si melt (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 65–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-65-70.
10. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of international experience on corrosion and corrosion protection. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
11. Seleznev D.V., Kozhevnikova Yu.M., Belobrova I.A., Ishuzhin R.R., Tashlanov V.V. Method for determining the enthalpy of endo- and exothermic effects in compo-site phase-change materials based on DSC-research. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (69), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 04, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-123-131.
12. Chalykh A.E. *Diffusion in polymer systems*. Moscow: Khimiya, 1987, 312 p.
13. Bazyleva O.A., Arginbayeva E.G., Lutskaya S.A. Ways of increasing corrosion resistance of superalloys (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 4 (64), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 24, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-3-8.
14. Zheleznyak V.G., Serdcelyubova A.S., Merkulova Yu.I., Skivko P.V. Paint coating system based on polyurethane enamel for protecting heated frontal surfaces of aviation products. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 24, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-120-128.

15. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
16. Kovrizhkina N.A., Kuznetsova V.A., Silaeva A.A., Marchenko S.A. Ways to improve the properties of paint coatings by adding different fillers (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48.
17. Serdtselyubova A.S., Merkulova Yu.I., Zagora A.G., Kurshev E.V. Research of film-forming parameters and protective properties of basecoat/clearcoat system. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 04, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-93-104.
18. State Standard R 56755–2015. *Plastics. Differential scanning calorimetry (DSC). Part 5. Determination of characteristic temperatures and time from reaction curves, determination of enthalpy and degree of conversion*. Moscow: Standartinform, 2016, 15 p.
19. PPG Aerospace. *P/S 870 Class C Corrosion Inhibitive Sealant*. Available at: <https://www.ppgaerospace.com/Products/Sealants/Corrosion-Inhibitive/P-S-870-Class-C-Corrosion-Inhibitive-Sealant> (accessed: December 04, 2023).
20. Sitnikova V.E., Ponomareva A.A., Uspenskaya M.V. *Methods of thermal analysis: workshop*. St. Petersburg: ITMO University, 2021, 152 p.
21. Valeev R.R. *Highly filled sealing compositions based on polysulfide oligomers*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.), Kazan, 2004, 16 p.
22. Kayushnikov S.N., Prokopchuk N.R., Use E.P., Alfimov I.V. Study of the influence of zinc-containing technological additives on the technical properties of rubber. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 6, pp. 36–40.
23. Fiaud C. Theory and Practice of Vapour Phase Inhibitors. *A Working Party Report on Corrosion Inhibitors*. London: The Institute of Materials, 1994, pp. 1–11.
24. Kozlova A.A., Kondrateva O.V., Kuznetsova V.A. The main problems of using domestically produced moisture-proof electrical insulating materials for automated selective application on printed assemblies (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 30, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-72-83.

### Информация об авторах

**Макущенко Иван Сергеевич**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Козлов Илья Андреевич**, заместитель начальника научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Смирнов Денис Николаевич**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Курсhev Евгений Васильевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Лонский Станислав Леонардович**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

### Information about the authors

**Ivan S. Makushchenko**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ilya A. Kozlov**, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Denis N. Smirnov**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Evgeniy V. Kurshev**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Stanislav L. Lonskii**, First Category Engineer NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 01.02.2024; получена после доработки 25.03.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 25.03.2024.  
The article was submitted 01.02.2024; received in revised form 25.03.2024; approved and accepted for publication after reviewing 25.03.2024.