



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки).
УДК 678.024.1

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.038

EDN: WSJTRC

ПОВЕДЕНИЕ ЧАСТИЦ ДИОКСИДА СВИНЦА ВО ФТОРОПЛАСТОВОЙ МАТРИЦЕ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ

Виталий Евдокимович Рогов ¹ Любовь Александровна Бохоева ²,
Оксана Жимбиевна Аюрова ³, Анна Сергеевна Чермошенцева ⁴

¹ ФГБУН «Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, г. Улан-Удэ, Россия

² ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления», г. Улан-Удэ, Россия,

³ ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет им. Д. Банзарова», г. Улан-Удэ, Россия

¹ Холдинговая группа «Wanfeng Auto Holding Group», Синьчан, Китай

² ООО «Zhejiang Taitan Co.», Синьчан, Китай

⁴ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

¹ rogov54v@mail.ru, <https://orcid.org/>

² bohoeva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6986-4307>

³ chem88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4772-9133>

⁴ asch-13@ya.ru

Аннотация. Представлен анализ работ о фторопластовых заготовках, наполненных дисперсными порошками диоксида свинца PbO_2 более 40 мас% в процессе нагрева и термообработки в воздушной среде. В результате нагрева и выдержки при температуре спекания во фторопластовых заготовках осуществляется процесс термического разложения частиц диоксида свинца ($PbO_2 \rightarrow PbO$), в результате чего возникает повышенное давление газов внутри образца, которое сбрасывается за счет образования трещин. В теле композита при наполнении дисперсными порошками диоксида свинца наблюдаются нарушения сплошности, при этом термохимические реакции отсутствуют. Дефекты в виде трещин образуются в середине образцов, параллельно плоскости прессования. Известно, что при термообработке фторопластовых заготовок монолитизация частиц фторопласта начинается с наружных слоев, что препятствует выходу абсорбированных газов и воздуха в порах, расположенных внутри прессовок. Для получения безпористых фторопластовых образцов процесс спекания продолжается длительное время. Хотя имеется мнение, что дефекты в виде пористости в изделиях остаются. Дополнительный объем газов, полученный при термическом разложении частиц PbO_2 , внутри образца может разрушить его. Данное предположение требует дальнейших уточнений и более детальных исследований. Однако недостаточно работ, где рассмотрены механизмы реакций, протекающие во фторопластовых композициях с дисперсными порошками диоксида свинца.

Ключевые слова: диоксид свинца, политетрафторэтилен, ПТФЭ, композит, термообработка, образцы, трещины, пористость.

Для цитирования: Рогов В. Е., Бохоева Л. А., Аюрова О. Ж., Чермошенцева А. С. Поведение частиц диоксида свинца во фторопластовой матрице при термообработке // Ползуновский вестник. 2026. № 1. С. 240–243. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.038. EDN: <https://elibrary.ru/WSJTRC>.

Original article

BEHAVIOR OF LEAD DIOXIDE PARTICLES IN A FLUOROPLASTIC MATRIX DURING HEAT TREATMENT

Vitaly E. Rogov ¹, Lyubov A. Bokhoeva ², Oksana Z. Ayurova ³,
Anna C. Chermoshentseva ⁴

¹ Baikal Institute of Environmental Management of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

² East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

³ Buryat State University named after D. Banzarov, Ulan-Ude, Russia

¹ Wanfeng Auto Holding Group, Xinchang, China

² ООО "Zhejiang Taitan Co.", Xinchang, China

⁴ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹ rogov54v@mail.ru, <https://orcid.org/>

² bohoeva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6986-4307>

³ chem88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4772-9133>

⁴ asch-13@ya.ru

© Рогов В. Е., Бохоева Л. А., Аюрова О. Ж., Чермошенцева А. С., 2026

ПОВЕДЕНИЕ ЧАСТИЦ ДИОКСИДА СВИНЦА ВО ФТОРОПЛАСТОВОЙ МАТРИЦЕ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ

Abstract. An analysis of works on fluoroplastic blanks filled with dispersed powders of lead dioxide PbO_2 of more than 40% by weight during heating and heat treatment in an air environment is presented. As a result of heating and exposure at sintering temperature in fluoroplastic blanks, the process of thermal decomposition of lead dioxide particles ($PbO_2 \rightarrow PbO$) is carried out, resulting in increased gas pressure inside the sample, which is relieved by the formation of cracks. In the body of the composite, when filled with dispersed powders of lead dioxide, continuity violations are observed, while there are no thermochemical reactions. Defects in the form of cracks are formed in the middle of the samples, parallel to the pressing plane. It is known that during heat treatment of fluoroplast blanks, the monolithization of fluoroplast particles begins from the outer layers, which prevents the release of absorbed gases located on the surface of compressed polytetrafluoroethylene (PTFE) particles and air in the pores located inside the presses. The sintering process continues for a long time to obtain high-quality samples. Although there is an opinion that defects in the form of porosity in the products remain. However, there are not enough studies that consider the mechanisms of reactions occurring in fluoroplastic compositions with dispersed powders of lead dioxide PbO_2 over 40% by weight.

Keywords: lead dioxide, polytetrafluoroethylene, PTFE, composite, heat treatment, samples, cracks, porosity.

For citation: Rogov, V. E., Bokhoeva, L. A., Ayurova, O. Z. & Chermoshentseva, A. C. (2026). Behavior of lead dioxide particles in a fluoroplastic matrix during heat treatment. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 240-243. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.01.038. EDN: <https://elibrary.ru/WSJTRC>.

ВВЕДЕНИЕ

Первые сообщения о взаимодействии фторопласта-4 при температуре (370–380 °С), приводящие к различным дефектам вплоть до полного разрушения образцов, опубликованы в работах [1–3]. Рассмотрен фторопласт-4 (политетрафторэтилен, ПТФЭ), наполненный порошками свинца или его оксидами (PbO , PbO_2). В работах [4–8] были проведены исследования с данными наполнителями с целью получения триботехнических материалов с повышенными эксплуатационными свойствами. Получены качественные фторопластовые заготовки – изделий из композиций со свинцовыми наполнителями (спекание в различных газовых атмосферах, пониженных температурах, в широком варианте наполнения). Однако в этих работах не были рассмотрены механизмы реакций, протекающие во фторопластовых композициях с дисперсными свинцовыми порошками.

В данной работе рассмотрены механизмы протекающих реакций во фторопластовых заготовках, которые содержат наполнители в виде свинца. Известно, что наиболее реакционным свинцовым наполнителем в контакте с ПТФЭ при спекании является оксид свинца [1, 2, 5]. Рентгенофазовый анализ фторопластовых образцов с оксидом свинца, наполненных до 20 мас%, показал, что в процессе нагрева и термообработки в воздушной атмосфере наблюдается термохимическое взаимодействие полимера с неорганическим наполнителем с образованием новых соединений Pb_2F_2O и PbF_2 [9]. При повышении концентрации выше 20 мас% наполнителя создаются условия для восстановления PbO до металла (Pb) в центральной части образца. Выдвинуто предположение, что частицы PbO в процессе теплового воздействия в контакте с полимером выступают в качестве инициатора деструкции ПТФЭ по механизму разрыва связи C–F с последующим самовозгоранием частиц свинца, в результате образуется новое соединение PbF_2 . Установлено, что при термообработке в воздушной атмосфере образцов с содержанием более 20 мас% PbO наблюдается разрушение прессовок. Степень разрушения композиционного материала возрастает с повышением содержания наполнителя.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

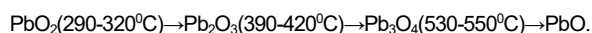
Анализ термохимических процессов, наблюдаемых во фторопластовой матрице со свинцовыми порошками при термообработке, показал зависимость реакционной способности зерен свинца от способов их получения. Порошки, полученные распылением расплавленного свинца под высоким давлением, не являются пирофорными [7]. Порошки, полученные в

восстановительной атмосфере из оксида свинца, находясь в тесном контакте с полимером в процессе нагрева и выдержки при температуре 375 ± 5 °С, подвержены самовозгоранию. В работе [10] рассмотрены образцы с Pb , восстановленные из PbO в атмосфере диссоциированного аммиака. Рентгенофазовый анализ этих образцов показал, что в процессе нагрева и термообработки в воздушной атмосфере наблюдается термохимическое взаимодействие фторопласта с неорганическим наполнителем и образованием PbF_2 . Выдвинуто предположение, что поверхность пирофорных частиц свинца, находясь на воздухе, окисляется до PbO . В контакте с полимером в процессе теплового воздействия они выступают в качестве инициатора деструкции политетрафторэтилена по механизму разрыва связи C–F с последующим самовозгоранием, в результате чего образуется новое соединение PbF_2 .

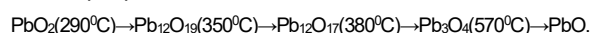
При использовании диоксида свинца во фторопластовых композиционных заготовках и изделиях имеются противоречия: авторы одних работ утверждают, что эти наполнители значительно повышают износостойкость, другие – нет. Например, авторы работы [11] считают, что порошки PbO_2 являются наиболее перспективными наполнителями для фторопластовых композиционных материалов, значительно повышающие износостойкость такого композита по сравнению с другими наполнителями. В процессе трения фторопластовых образцов, наполненных PbO_2 , по стальному контрателу образуется пленка, содержащая фазу фторида свинца [12]. Плоскости скольжения во флюоритовой структуре PbF_2 являются основными факторами снижения износа. Но при этом, получение качественных фторопластовых заготовок с PbO_2 выше 40 мас% и массой более 0,05 кг невозможно. В процессе термообработки в воздушной атмосфере в образцах образуются дефекты в виде трещин, расположенные в середине образцов, параллельно плоскости прессования [5]. В работах [4, 7] установлено, что получить качественные заготовки без образования трещин возможно при снижении температуры спекания до 360 °С или введение технологических добавок в виде высокодисперсных порошков в концентрации 2–5 мас% (пятиоксида сурьмы, дисульфида молибдена или кобальта синего). Авторы работы [4] утверждают, что образцы PbO_2 (более 20 мас%) после термообработки в восстановительной атмосфере разрушаются. Образец после термообработки в восстановительной атмосфере представляет собой пористую массу бесформенной формы. Термохимическую реакцию между полимерной матрицей и PbO_2 при

термообработке образцов в восстановительной атмосфере можно объяснить быстрым переходом $PbO_2 \rightarrow PbO$. В дальнейшем оксид свинца выступает в качестве инициатора деструкции полимера по механизму разрыва связи C–F с образованием новых соединений.

Процесс превращения $PbO_2 \rightarrow PbO$ при нагреве на воздухе достаточно хорошо представлен в научной литературе в работах [13–15]. Известно [13], что термическое разложение PbO_2 происходит в три стадии. Продуктами разложения являются оксиды следующего состава (в скобках указаны численные значения температур разложения):



Авторы работ [14, 15] утверждают, что PbO_2 разлагается в четыре стадии и претерпевает следующие превращения:



В работе [16] показано, что первые три стадии разложения PbO_2 происходят при тех же температурах (до $360^\circ C$), что в работах [14, 15], и продукты разложения идентичны. На стадии превращения ($Pb_3O_4 \rightarrow PbO$) температура разложения возрастает до $600^\circ C$.

Температура спекания ПТФЭ ($370 \pm 5^\circ C$), поэтому в процессе разложения PbO_2 может превратиться только в $Pb_{12}O_{17}$ в матрице полимера. Дальнейшее превращение $Pb_2O_3 \rightarrow Pb_3O_4 \rightarrow PbO$ проходит при более высоких температурах. Исследуя более подробно образцы (рис. 1) после термической обработки дефекты типа трещины расположены в средней части образцов. Средняя часть является самым непропрессованным участком. Количество дефектов (разрыв материала) небольшое. Трещины начинаются параллельно плоскости прессования изнутри образца.



Рисунок 1 – Образец (PbO_2 40 мас% +ПТФЭ 60 мас%) после термообработки при температуре $370 \pm 5^\circ C$ и выдержке 6 часов

Figure 1 – Sample (PbO_2 40 wt% +PTFE 60 wt%) after heat treatment at a temperature of $370 \pm 5^\circ C$ and exposure for 6 hours

Известно [17], что в процессе нагрева наружные слои фторопластовых заготовок первыми когезионно сплавляются (спекаются), что затрудняет в дальнейшем выход абсорбированных газов с поверхности частиц и воздуха из пор между спрессованными частицами. Процесс плавления кристаллических областей ПТФЭ начинается при $280^\circ C$ и завершается при $330^\circ C$. Критической на этом участке является температура $327^\circ C$ – точка гелеобразования. Наблюдается значительное увеличение размеров фторопластовых прессовок, примерно на 25 % [18]. При дальнейшем повышении температуры частицы полимера сплавляются, образуя монолитный блок. Время термообра-

ботки заготовок рассчитывают так: за 1 час выдержки сплавление на 3 мм при температуре $370 \pm 5^\circ C$. Авторы работы [20] утверждают, что реальный блочный фторопласт-4 представляет собой достаточно пористое тело (1–2 %), а при наполнении ПТФЭ различными порошками наблюдается дополнительное увеличение пористости композита вплоть до образования макроскопических протяженных областей «рыхлой» структуры с пористостью до 5 % или более. По мнению авторов данной работы, такая пористость в наполненных композитах возможна только в центре образцов. Согласно исследованиям в работе [9], наружные слои заготовок сплавляются в монолит значительно раньше. Частицы PbO , находящиеся в наружном слое, попадают в монолитный слой фторопласта до начала химической реакции, которая начинается середине образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работах [1, 4] получены качественные заготовки с содержанием 40 мас% PbO_2 при снижении температуры спекания до $360^\circ C$, а также с высокодисперсными добавками (Sb_2O_5 , $CoAl_2O_4$, MoO_2) и массой более 0,05 кг. При снижении температуры спекания до $360^\circ C$ наблюдается существенное замедление как процесса сплавления частиц фторопласта, так и процесса разложения $PbO_2 \rightarrow PbO$ в полимерной матрице. Замедление процесса разложения $PbO_2 \rightarrow PbO$ объясняется наличием высокодисперсных добавок на поверхности частиц диоксида свинца.

При температуре спекания в данных композициях не наблюдаются термохимические реакции, поверхностный слой ПТФЭ начинает монолитизироваться, создавая наружную оболочку. Частицы диоксида свинца, присутствующие в поверхностном слое, разлагаются, при этом продукты разложения могут до какого-то момента выходить наружу. С увеличением толщины монолитизированного слоя выход продуктов разложения затрудняется. Частицы PbO_2 , находящиеся в глубинных слоях образца, продолжают разлагаться, что приводит к повышению давления внутри, которое сбрасывается за счет образования трещин. Наполнение 40 мас% частицами PbO_2 фторопластовой композиции является критической массой, которой достаточно для образования газов, повышающих давление внутри образца.

ВЫВОДЫ

Процесс нарушения сплошности во фторопластовых заготовках, наполненных дисперсными порошками диоксида свинца, наблюдается в виде дефектов. Дефекты типа трещин образуются в середине образцов, параллельно плоскости прессования. При термообработке заготовок монолитизация частиц фторопласта начинается с наружных слоев, что препятствует выходу абсорбированных газов с поверхности частиц и воздуха из различных пор из внутренних слоев. В результате термического разложения диоксида свинца при температуре 370 – $380^\circ C$ внутри фторопластовых образцов возникает повышенное давление газов, которое сбрасывается за счет образования трещин. Данное предположение требует дальнейших уточнений и более детальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pratt G.C. Recent developments in polytetrafluorethylene-based dry bearing materials and treatments // Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, conference materials. 1966. V. 181. № 16. P. 58–69. https://doi.org/10.1243/PIME_CONF_1966_181_299_02.

ПОВЕДЕНИЕ ЧАСТИЦ ДИОКСИДА СВИНЦА ВО ФТОРОПЛАСТОВОЙ МАТРИЦЕ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ

2. Pratt G.C. Lubrication and lubricants / Ed. E.R. Bruith waite. Amsterdam ; London ; New York : Elsevier Publ. Co. 1967. P. 377–426.
3. Gao J., Zhao J., Dang H. // ASLE: proc. 3rd Int. Conf. on Solid Lubrication / ed. Bisson E.E. NJ : ASLE, Park Ridge, 1984, pp. 308–312.
4. Рогов В.Е., Корнопольцев Н.В., Могнонов Д.М., Аюрова О.В., Максанова Л.Б. Свинецсодержащие антифрикционные материалы на основе политетрафторэтилена // Трение и износ. 2001. Т. 22. № 1. С. 104–108.
5. Рогов В.Е. О получении качественных изделий из свинецсодержащих фторопластовых композиций // Вестник машиностроения. 2010. № 7. С. 53–59.
6. Рогов В.Е., Цыренова Г.Д. Взаимодействие свинецсодержащих наполнителей с фторопластовой матрицей при спекании // Фундам. проблемы совр. материаловедения. 2012. Т. 9. № 3. С. 315–318.
7. Рогов В.Е. Влияние дисперсности свинцовых порошков на износостойкие свойства фторопластовых композиций // Фундам. проблемы совр. материаловедения. 2009. Т. 6. № 1. С. 81–89.
8. Бохоева Л.А., Рогов В.Е., Бочектуева Е.Б., Балданов А.Б., Шатов М.С., Батуев Ц.А. Применение наноразмерных компонентов в многослойных композиционных материалах // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2024. Т. 16. № 2. С. 180–188.
9. Рогов В.Е., Курбатов Р.В., Бохоева Л.А. Термохимическое взаимодействие оксида свинца с фторопластовой матрицей // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92. № 2. С. 187–190.
10. Рогов В.Е., Курбатов Р.В., Бохоева Л.А. Взаимодействие дисперсных частиц свинца с фторопластовой матрицей при термообработке // Журнал прикладной химии. 2022. Т. 95. № 5. С. 604–610.
11. Корнопольцев Н.В., Могнонов Д.М. Диоксид свинца как модификатор композиционных материалов на основе политетрафторэтилена // Вопросы материаловедения. 2010. № 1 (61). С. 72–77.
12. Рогов В.Е., Цыренова Г.Д., Черский И.Н. Трибосинтез фторида свинца при трении фторопластовых свинецсодержащих композиций и его влияние на их износостойкость // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 4. С. 390–395.
13. Столярова И.А., Филатова М.П. Атомно-адсорбционная спектрометрия при анализе минерального сырья. Л. : Недра. 1981. С. 56–61.
14. Извозчиков В.А., Тимофеев О.А. Фотопроводящие оксиды свинца в электронике. Л. : 1979. С. 7–35.
15. Куликов И.С. Термодинамика оксидов. М. : 1986. С. 115–120.
16. Ilaria Costantini, Pier Paolo Lottici, Kepa Castro and Juan Manuel Madariaga Use of Temperature Controlled Stage Confocal Raman Microscopy to Study Phase Transition of Lead Dioxide (Plattnerite) // Minerals 2020. 10. 468. doi: 10.3390/min10050468.
17. Гегузин Я.Е. Почему и как исчезает пустота. Наука. 1974. 208 с.
18. Пугачев А.К., Росляков О.А. Переработка фторопластов в изделия // Технология и оборудование. Л. : Химия. 1987. С. 101–104.
19. Машков Ю.К., Овчар М.Ю., Байбарацкая М.Ю., Мамаев О.А. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация. М. : Машиностроение. 2005. С. 132.
20. Хатипов С.А., Артамонов Н.А. Создание нового антифрикционного и уплотнительного материала на основе радиационно-модифицированного политетрафторэтилена // Российский химический журнал. 2008. Т. 52. № 3. С. 89–96.

Информация об авторах

V. E. Rogov – доктор технических наук, научный сотрудник Байкальского института природопользования Сибирского отделения Российской академии наук.

L. A. Bokhoeva – доктор технических наук, профессор Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления.

O. Zh. Ayurova – кандидат технических наук, доцент кафедры неорганической и органической химии Бурятского государственного университета.

A. S. Chermoshentseva – кандидат технических наук, доцент кафедры РК5 Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Information about the authors

V.E. Rogov - Doctor of Technical Sciences, Research Associate of the Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

L.A. Bokhoeva - Doctor of Technical Sciences, Professor, East Siberian State University of Technology and Management, Irkutsk National Research Technical University.

O.Zh. Ayurova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Inorganic and Organic Chemistry, Buryat State University.

A.S. Chermoshentseva - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the RK5 Department of the Bauman Moscow State Technical University.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 07 октября 2025; одобрена после рецензирования 24 февраля 2026; принята к публикации 16 марта 2026.

The article was received by the editorial board on 07 Oct 2025; approved after editing on 24 Feb 2026; accepted for publication on 16 Mart 2026.