

Технические науки
УДК 622.87:621.793.7:546.811-31

Оригинальная статья
DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-943-953

Обеспечение функциональных свойств светопропускающих поверхностей элементов горной техники за счет использования покрытий на основе оксида олова

Е.А. Дмитриева✉, К.К. Елемесов

*Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева,
Республика Казахстан, г. Алматы, info@satbayev.university*

✉dmitriyeva2017@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена способам получения прозрачных проводящих покрытий для обогрева стекол в горной технике, а также газочувствительных покрытий для шахтных датчиков. В работе рассматривались три пленкообразующие системы: тетрахлорид олова в этаноле, гидрозоль гидроксидов олова и их смесь в соотношении 1 : 1 по объему. Проведены исследования структуры покрытий, спектров их пропускания и отражения, чувствительности получаемых покрытий к парам воды. Обнаружена чувствительность к парам воды у покрытий, полученных из гидрозоля $\text{Sn}(\text{OH})_4$, при комнатной температуре (24 °С) и могут быть использованы как чувствительные элементы на пары воды в приборах, контролирующих рабочие условия в шахтах.

Ключевые слова: прозрачные проводящие покрытия, газочувствительность, структура, спектры пропускания, отражение.

Благодарность/Финансирование: Исследование поддержано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан грантом BR18574141 «Комплексная многоцелевая программа по повышению энергоэффективности и ресурсосбережению в энергетике и машиностроении для промышленности Казахстана».

Для цитирования: Дмитриева Е.А., Елемесов К.К. Обеспечение функциональных свойств светопропускающих поверхностей элементов горной техники за счет использования покрытий на основе оксида олова // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 3. – С. 943–953. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-943-953.

Technical Sciences
UDC 622.87:621.793.7:546.811-31

Original article
DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-943-953

Ensuring the functional properties of light-transmitting surfaces of mining equipment elements through the use of tin oxide-based coatings

E.A. Dmitriyeva✉, K.K. Yelemessov

*Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Republic of Kazakhstan,
info@satbayev.university*

✉dmitriyeva2017@mail.ru

Abstract. Introduction. The article is devoted to the methods of producing transparent conductive coatings for heating glass in mining equipment and gas-sensitive coatings for mine sensors. **Materials and Methods.** Three film-forming systems were considered in the work: tin tetrachloride in ethanol, tin hydroxide hydrosol and their mixture in a ratio of 1 : 1 by volume. The structure of the coatings, their transmission and reflection

© Е.А. Дмитриева, К.К. Елемесов, 2024

spectra, and the sensitivity of the resulting coatings to water vapor were studied. **Results.** Sensitivity to water vapor was found in coatings obtained from $\text{Sn}(\text{OH})_4$ hydrosol at room temperature (24°C). Coatings from the film-forming system – tin tetrachloride in ethanol, demonstrate a transmittance of 80–85% in the visible region and a resistance of $9.7 \pm 0.4 \text{ k}\Omega$. These coatings can be used for heating glass. Coatings obtained from a 1:1 mixture are sensitive to water vapor and are more resistant to abrasion than coatings obtained from a hydrosol. **Discussion.** The film obtained from the ethanol system is not sensitive to water vapor. The film obtained from the sol is sensitive to ethanol vapor. Its resistance, when water vapor is introduced, changes by 3.75 times in less than 1 s. The initial resistance value is restored in about 3 s. Films obtained from a mixture of film-forming systems are also sensitive to water vapor. However, the response time and the time of restoration of the initial resistance value are longer than those of films obtained from the sol. **Conclusion.** Coatings from the film-forming system – tin tetrachloride in ethanol, can be used to heat glass. Coatings obtained from a 1:1 mixture are sensitive to water vapor at room temperature (24°C) and can be used as sensitive elements for water vapor in devices monitoring operating conditions in mines. **Resume.** The technology of manufacturing thin films on glasses based on tin oxide obtained in the course of the work allows to form stable coatings. The properties of these coatings allow to carry out heating when passing electric current through them. Also, the effect of water vapor on films obtained under certain conditions causes a change in their properties. This allows to use the obtained results of the work for practical application in the manufacture of elements of mining equipment. The formed coatings can be used for the manufacture of humidity and water vapor sensors, as well as for the manufacture of heated glass.

Keywords: transparent conductive coatings, gas sensitivity, structure, transmission spectra, reflection

Acknowledgments/Funding: This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan the grant BR18574141 titled “Comprehensive multi-purpose program for improve in genergy efficiency and resource saving in the energy sector and mechanical engineering for the industry of Kazakhstan”.

For citation: Dmitriyeva E.A., Yelemessov K.K. Ensuring the functional properties of light-transmitting surfaces of mining equipment elements through the use of tin oxide-based coatings. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 3, pp. 943–953. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-943-953>.

Введение

Развитие горных территорий неразрывно связано с горнодобывающей промышленностью, в которой необходимо использование надежной и высокопроизводительной техники для открытых горных работ: горные экскаваторы; горные бульдозеры; горные фронтальные погрузчики; шарнирно-сочлененные самосвалы; карьерные самосвалы и т. д. [1–4]. Работа данной техники обеспечивается оператором, для которого необходимо создать комфортные условия труда [5–8]. При возможности создаются просторные кабины, широкие плоские ветровые стекла, обеспечивающие хорошую обзорность. Рычаги стеклоочистителя, охватывающие большую площадь, обеспечивают широкий обзор даже в дождливую погоду. Максимальные площади кабин, предоставляющие оператору пространство для работы, обеспечиваются шумо- и теплоизоляцией [9–11].

Вместе с тем, при неблагоприятных погодных условиях, из-за разницы температур окружающей среды и в кабине оператора, происходит запоте-

вание стекол. На данный момент эта проблема решается за счет обдува ветрового стекла или за счет встроенных в стекло тонких металлических нитей обогрева. Оба эти метода имеют свои недостатки. При обдуве ветрового стекла обеспечение обзора справа и слева все равно уменьшается из-за запотевания. Наличие металлических нитей отвлекает внимание оператора и мешает обзору.

Еще одной важной задачей горнодобывающей промышленности, особенно при проведении работ в шахтах, является контроль состава шахтной атмосферы [12–14]. Сейчас на рынке существует целый ряд переносных портативных газоанализаторов. Они предназначены для измерения горючих взрывоопасных газов (CO , H_2S , NO_2 , SO_2 , O_2) и других газов в зависимости от конкретного назначения прибора. Чаще всего, измерения концентрации компонентов окружающей среды производится в непрерывном режиме. Происходит отображение значений концентраций измеряемых компонентов на ж/к дисплее и выдача световой, звуковой сигнализации и вибросигнала.

Сам процесс детектирования того или иного газа в полупроводниковых датчиках основан на измерении сопротивления чувствительного элемента. Сам чувствительный элемент постоянно подогревается до 400 °С для нахождения в рабочем состоянии, что создает взрывоопасную ситуацию. На данный момент вопрос взрывоопасности решается «искробезопасной электрической цепью» и «взрывонепроницаемой оболочкой». Однако вопрос о снижении рабочей температуры чувствительного элемента остается открытым [15, 16].

Решение данных вопросов связано с формированием покрытий на прозрачных поверхностях. Переднее стекло автотранспорта, как правило, состоит из двух слоев, склеенных между собой. При производстве подогреваемых деталей [17] между этими слоями прокладывают тончайшие нити из тугоплавких металлов, например, нихрома. Нами предлагается вместо нитей нанести прозрачное проводящее покрытие. Согласно ГОСТ 32565–2013, прозрачность стекол, обеспечивающих обзор оператору горной техники, должна быть не менее 70 %. То есть и покрытие должно обладать не меньшим светопропусканием. Питаться такие покрытия будут, как и «нити», от аккумулятора, а управление осуществляется электронным блоком [18, 19].

Нанесение покрытий может осуществляться различными способами, но наиболее эффективным является метод спрей-пиролиза. Это один из химических методов получения покрытий из растворов. Раствор распыляют, переводя его в аэрозоль, который оседая на нагретую поверхность подвергается разложению под действием температуры – пиролизу.

Покрытия, полученные таким методом, могут обладать как плотной структурой ксерогеля, так и структурой со множеством пустот в зависимости от выбранной пленкообразующей смеси. Образование пустот в пленках приводит к увеличению удельной поверхности, на которой происходят реакции детектирования газов.

В данной работе было уделено внимание на создание прозрачных проводящих покрытий, которые, с целью решения проблемы с запотеванием стекол кабины оператора, могут быть использованы в качестве обогревательных элементов. Такая же технология позволяет создавать газочувствительный слой работающего при комнатной температуре оборудования [20].

Цель работы: получение покрытий на стеклах в виде тонких пленок оксида олова, которые могут обеспечить необходимый уровень чувствительно-

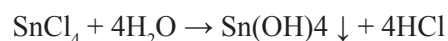
сти датчиков газа горной техники и возможность обогрева светопропускающих объектов горнопромышленной техники.

Методы и методика исследования

Для получения пленок оксида олова на стеклянной подложке были использованы три пленкообразующие системы:

1. Пяти-водный кристаллогидрат тетрахлорида олова растворяли в этаноле для получения системы с концентрацией ионов олова 0,11 моль/л.

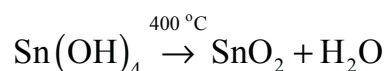
2. Для получения гидрозоля – водный раствор $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ с концентрацией ионов олова 0,11 моль/л нагревали на электроплитке при 100 °С в течение 1,5 ч до изменения цвета раствора. При этом образовался гидрозоль гидроксида олова согласно реакции:



3. Смесь системы на этаноле и гидрозоля гидроксида олова в соотношении 1 : 1 по объему.

Приготовление пленкообразующих систем производилось из кристаллогидрата тетрахлорида олова ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) квалификации «чистый», ректифицированного спирта и дистиллированной воды.

Пленки наносились методом спрей-пиролиза на нагретую до 400 °С подложку. При этом конечной реакцией является образование оксида олова:



Исследование структуры пленок проводилось на сканирующем электронном микроскопе JSM-6490LA фирмы JEOL и рентгеновском дифрактометре ДРОН-6. Спектры пропускания и отражения снимались на спектрофотометре UNICO SpectroQuest 2800. Измерение пропускания происходит при падении светового потока по нормали к образцу. Измерение отражения происходит с помощью держателя, при падении светового потока под углом в 45° к нормали образца. Изменение сопротивления при напуске паров воды измерялось четырех-зондовым методом. Толщина образцов, определенная по изменению массы образца, для всех пленок составила 500 ± 15 нм.

Результаты исследования и обсуждение

Важным параметром для покрытия стекол для горной техники является его соответствие нормам светопропускания. На рис. 1 представлены спектры пропускания и отражения исследуемых образцов.

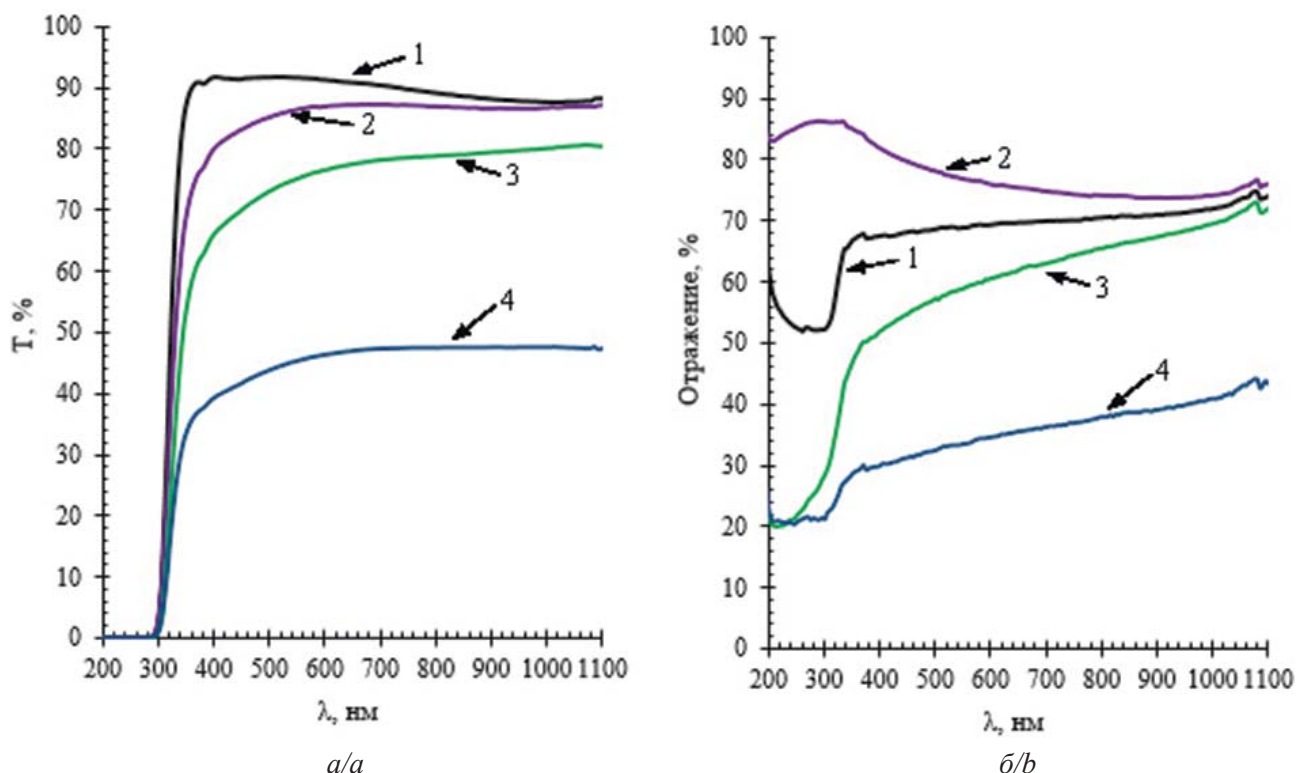


Рис. 1. Спектры тонких пленок оксида олова: а – спектры пропускания; б – спектры отражения:

1 – стекло; 2 – образец из системы на этаноле; 3 – образец из смеси; 4 – образец из гидрозоля

Fig. 1. Spectra of thin films of tin oxide: a – transmission spectra; b – reflection spectra:

1 – glass; 2 – sample from the ethanol system; 3 – sample from the mixture; 4 – sample from the hydrosol

Как видно из рис. 1а пропускание стеклянной подложки составляет порядка 90–85 % в видимой и ближней инфракрасной области. Резкое уменьшение пропускания электромагнитных волн длиной волны менее 300 нм соответствует краю фундаментального поглощения стекла.

В горных условиях интенсивность прямой солнечной радиации, по сравнению с равнинами, повышается. Этому способствует увеличение прозрачности воздуха из-за уменьшения содержания водяного пара и пыли. Облака на высоте снижают солнечное излучение всего на 10 %, поэтому затянутое небо в горах обманчиво безопасно для кожи и глаз. На высоте атмосферный слой поглощает меньше ультрафиолетовых лучей, поэтому солнце становится опаснее. С каждой тысячей метров подъёма уровень УФ-излучения увеличивается примерно на 10–12 %.

Как видно из рис. 1, а, стекло не пропускает ультрафиолетовую часть спектра. Образец с пленкой, полученной из системы на этаноле демонстрирует пропускание 80–85 % в видимой и ближней инфракрасной области. То есть, пленки, полученные из системы на этаноле, могут использоваться в стеклах техники для открытых горных

работ. Образцы с пленкой, полученной из смеси систем и из гидрозоля обладают пропусканием в видимой области спектра менее 70 %. Согласно ГОСТ 32565–2013, пункт 5.1.2.5, «Светопропускание стекол, обеспечивающих видимость для водителя спереди и сзади, должно быть не менее 70 %». Следовательно, использование гидрозоля и смеси систем гидрозоля и на этаноле нежелательно при получении прозрачных покрытий [21, 22]. Однако уменьшение пропускания может быть связано со структурой поверхности пленок.

На рис. 1б представлены спектры отражения электромагнитных волн, направленных под 45° к нормали образца. Видно, что отражение от образца с пленкой, полученной из системы на этаноле (рис. 1б, кривая 2) больше, чем у стекла без пленки (рис. 1б, кривая 1). Значит пленки, полученные из системы на этаноле могут быть использованы как энергосберегающие покрытия.

Наименьшее отражение из исследуемых образцов наблюдается на образцах с пленкой, полученной из гидрозоля (рис. 1, б, кривая 4). Это может быть связано с рассеянием электромагнитного излучения на неоднородностях поверхности.

Для определения кристалличности полученных пленок был проведен рентгеноструктурный анализ. Результаты расчетов размеров кристаллитов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Размеры кристаллитов SnO_2

Table 1. Crystallite sizes SnO_2

Пленко-образующая система Film-forming system	SnO_2 , нм/nm		
	(110)	(101)	(200)
На этаноле On ethanol	$13,6 \pm 0,2$	$10,7 \pm 0,1$	$10,5 \pm 0,3$
Смесь Mixture	$12,4 \pm 0,1$	$12,6 \pm 0,1$	$10,1 \pm 0,1$
Золь/Sol	$6,2 \pm 0,2$	$6,3 \pm 0,2$	$10,3 \pm 0,4$

Из табл. 1 видно, что все пленки состоят из кристаллитов оксида олова размером ~6–13 нм, то есть являются нано-структурированными. Это также подтверждается литературными данными [12, 23, 24]. Преимущественный рост кристаллитов, образованных в пленкообразующей системе на этаноле, направлен вдоль плоскости (110). По плоскостям (101) и (200) размеры отличаются в пределах точности измерения. Кристаллиты, сформировавшиеся в процессе приготовления золя, имеют размеры порядка 6 нм по плоскостям (110) и (101). Формирование кристаллитов из смеси пленкообразующих систем происходит в два этапа. Первый – формирование при получении гидрозоля. Второй – рост сформированных на первой стадии кристаллитов за счет ионов из пленкообразующей системы на этаноле. Как видно из табл. 1, рост кристаллитов, образованных в пленке из смеси пленкообразующих систем, происходит по плоскостям (110) и (101). Размеры кристаллитов связывают с чувствительностью к газам в окружающей среде.

Условия в шахте характеризуются следующими параметрами: температура, влажность, плотность, давление воздуха [25–27].

На температуру шахтной атмосферы влияют следующие факторы:

- температура поступающего в шахту воздуха;
- тепловой и массовой обмен воздуха с массивом горных пород;
- сжатие вентиляционной струи под давлением столба воздуха за счёт разницы отметок земной поверхности и горных выработок;

- тепловыделение при работе горных машин и механизмов [28].

Относительная влажность воздуха в шахте колеблется от 20 до 100 %.

В действующих горных выработках, где постоянно находятся люди, температура воздуха должна соответствовать нормам. Например, в СССР предельно допустимая температура составляла 26 °C при скорости воздуха не менее 2 м/с и влажности до 90 %.

Технологические условия в шахте влияют на безопасность горных работ и производительность труда шахтёров [29, 30].

Результаты исследования образцов на чувствительность к парам воды при комнатной (22 °C) температуре приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры чувствительного слоя образцов

Table 2. Parameters of the sensitive layer of samples

Параметр Parameter	Образец/Sample		
	На этаноле on ethanol	смесь mixture	золь/sol
Исходное значение сопротивления R_0 Initial resistance value R_0	$9,7 \pm 0,4$ кОм kOhm	140 ± 5 Мом MOhm	150 ± 5 Мом MOhm
Наименьшее значение сопротивления при напуске паров воды $R_{\text{пар}}$ The lowest value of resistance at water vapor is released R_{vapor}	$9,7 \pm 0,4$ кОм kOhm	$52 \pm 1,5$ МОм MOhm	$40 \pm 1,5$ МОм MOhm
Чувствительность $R_0/R_{\text{пар}}$ Sensitivity R_0/R_{vapor}	–	2,69	3,75
Время отклика (быстродействие), $t_{\text{отклика}}$ Response time (speed), t_{response}	–	4–5 с/с	менее 1 с/less than 1 sec
Время восстановления исходного значения сопротивления, $t_{\text{вост}}$ Time to restore the initial resistance value, t_{rest}	–	10–12 с/с	≈3 с/с

Как видно из табл. 2, чувствительность к парам воды у пленки, полученной из системы на этаноле, отсутствует. Пленка, полученная из золя, обладает чувствительностью к парам этанола. Ее сопротивление, при напуске паров воды, меняется в 3,75 раза за время менее 1 с. Восстановление исходного значения сопротивления происходит примерно за 3 с. Пленки, полученные из смеси пленкообразующих систем, также обладают чувствительностью к парам воды. Однако время отклика и время восстановления исходного значения сопротивления больше, чем у пленок, полученных из золя.

Таким образом, пленки, полученные из гидрозоля и из смеси 1 : 1, могут быть использованы как чувствительные элементы на пары воды в приборах, контролирующих рабочие условия в шахтах.

По СЭМ изображениям поверхности пленок, представленным на рис. 2, можно оценить влияние состава пленкообразующей системы на морфологию поверхности пленок, сформированных на стеклянной подложке (рис. 2).

Как видно из рис. 2, а, пленка, полученная из системы на этаноле, обладает сплошной однородной структурой. Пленка, полученная из смеси (рис. 2, б), также обладает сплошной структурой. Наблюдаются отдельные каплевидные разводы, обусловленные методом нанесения. Пленка, полученная из золя (рис. 2, в), покрыта трещинами и, несмотря на высокую чувствительность к парам воды в 3,75 отн. ед. (табл. 2) при комнатной температуре, она слабо соединена с подложкой, отслаивается. При контакте пленки с посторонними предметами она частично осыпается.

Заключение

1. В статье приведены результаты исследований влияния пленкообразующей системы на свойства получаемых покрытий. Размер кристаллитов в пленках варьируется от 13 до 6 нм, то есть полученные пленки являются нано-структурированными.

2. Результаты исследований показали, что из системы тетраоксида олова в этаноле получают однородные по структуре покрытия, обладающие прозрачностью, в видимом диапазоне, порядка 80–85 %. Сопротивление этих покрытий составляет $9,7 \pm 0,4$ кОм. Использование гидрозоля в качестве пленкообразующей системы приводит к формированию покрытия, слабо соединенного с подложкой, но обладающего чувствительностью к парам воды в 3,75 отн. ед. при температуре подложки в 24 °С. Чувствительность к парам воды при комнатной температуре у образцов, полученных из смеси 1 : 1, составляет 2,69 раза. Время отклика и время восстановления увеличились по сравнению с результатами образцов, полученных из гидрозоля. Однако образцы, полученные из смеси 1 : 1, более устойчивы к истиранию.

3. Состав пленкообразующей системы мало влияет на кристалличность получаемых покрытий. Все полученные пленки являются нано-структурированными. Пленки, полученные из системы на этаноле, обладают пропусканием 80–85 % в видимой и ближней инфракрасной области и не пропускают ультрафиолетовую область спектра. Сопротивление таких пленок порядка 10 кОм.

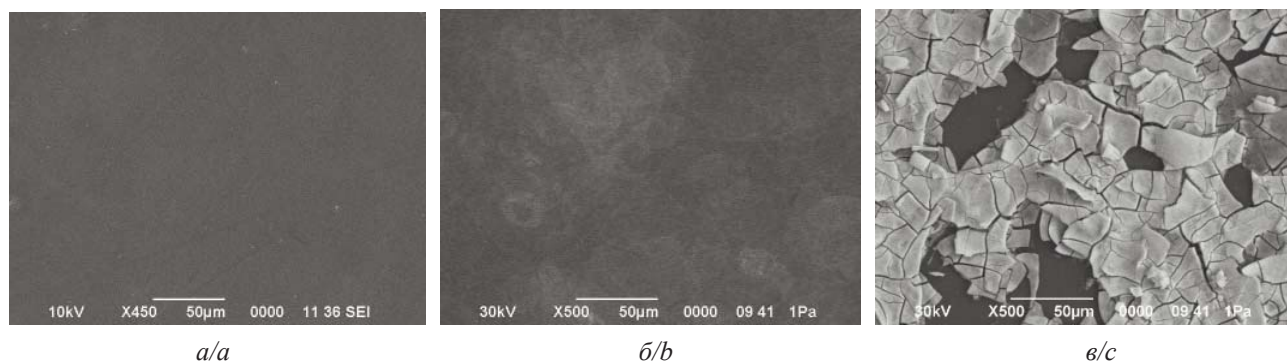


Рис. 2. СЭМ изображения поверхности пленки, полученной из системы на этаноле (а); из смеси систем (б); из золя (в)

Fig. 2. SEM images of the film surface obtained from the ethanol system (a); from the mixture of systems (b); from the sol (c)

Выводы

1. В статье приведены результаты исследований влияния параметров нанесения и состава пленкообразующей системы на свойства получаемых покрытий. Показано, что из системы тетраоксида олова в этаноле получают однородные по структуре покрытия, обладающие хорошей прозрачностью в видимом диапазоне порядка 80–85 %. Сопротивление этих покрытий составляет порядка 10 кОм.

2. Результаты исследований могут быть полезными при изготовлении стекол техники для открытых горных работ. Пленки, полученные из системы на этаноле, обладают хорошим светопропусканием в видимой и ближней инфракрасной области и не пропускают ультрафиолетовую область спектра. Высокое сопротивление позволяет использовать их в качестве нагревательного

элемента, питающегося от аккумулятора горной техники.

3. Результаты исследований также могут быть полезными при изготовлении чувствительных элементов на пары воды в приборах, контролирующих рабочие условия в шахтах. Нанесенные на рабочие поверхности датчиков пленки, полученные из гидрозоля, обладают чувствительностью к парам воды при комнатной температуре (24 °C). Покрытия из смеси систем обладают прозрачностью порядка 70 % и чувствительностью к парам воды в 2,69 отн. ед. Смесь пленкообразующих систем, в соотношении 1 : 1, приводит к формированию покрытия со сплошной структурой, что делает ее более устойчивой к истиранию. Использование этой пленкообразующей системы для создания чувствительного элемента продлит срок его службы.

Список литературы

1. Zinovieva O.M., Smirnova N.A. On the issue of assessing the reliability of technical devices at mining enterprises // *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* – 2024. – No. 1. – pp. 157–168. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_1_0_157.
2. Kongar-Syuryun C., Klyuev R., Golik V., Oganessian A., Solovykh D., Khayrutdinov M., Adigamov D. Principles of Sustainable Development of Georesources as a Way to Reduce Urban Vulnerability // *Urban Science*. – 2024. – V. 8. – No. 2. – P. 44. <https://doi.org/10.3390/urbansci8020044>.
3. Orlov V., Tynchenko V., Nizameeva A., Shalaeva D., Ageev D. Development of a multifunctional cross-platform system for automation of energy data and resource management // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – V. 460(24). – P. 07002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346007002>.
4. Tynchenko V.S., Stashkevich A., Muzyka P., Leontieva A.A., Degtyareva K.V. Effective energy management tools: inventory management and monitoring of energy consumption by personnel // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – V. 458. – P. 01011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345801011>.
5. Смолин А.В. О проектировании системы обеспечения безопасности труда на горнодобывающих предприятиях // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 5-2. – С. 233–242. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_233.
6. Каунг П.А., Исаков А.Е., Панфилов И.А., Тынченко В.В., Ступина А.А. Принципы формирования экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого освоения георесурсов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2024. – № 7-1. – С. 159–175. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_71_0_159.
7. Pashkov E.N. An investigation into autobalancing devices with multireservoir system // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2014. – V. 66(1). – P. 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/66/1/012014>.
8. Kravtsov K., Tynchenko V., Semenova E., Shalaeva D., Pinchuk I. Workflow automation and performance improvement based on PostgreSQL // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – V. 458. – P. 09022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345809022>.
9. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating Source // *Key Engineering Materials*. – 2016. – V. 712. – P. 105–111. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105>.
10. Панфилова Т.А., Тынченко В.С., Кукарцев В.А., Башмур К.А., Кондратьев В.В. К концепции выщелачивания металлосодержащего сырья в дезинтеграторе // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2023. – № 11-1. – С. 239–251. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_239.
11. Vidayev I.G. The resource efficiency assessment technique for the foundry production // *Advanced Materials Research*. – 2014. – V. 880. – P. 141–145. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141>.
12. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых // *Устойчивое развитие горных террито-*

- рий. – 2021. – Т. 13. – № 3. – С. 405–415. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415>.
13. Brigida V.S., Golik V.I., Dzeranov B.V. Modeling of Coalmine Methane Flows to Estimate the Spacing of Primary Roof Breaks // *Mining*. – 2022. – V. 2. – P. 809–821. <https://doi.org/10.3390/mining2040045>.
14. Босиков И.И., Ключев Р.В., Ажмухамедов И.М., Ревазов В.Ч. Оценка управления проветриванием угольных шахт с помощью методов статистической динамики // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2021. – № 11. – С. 123–135. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_11_0_123.
15. Kukartsev V.A., Trunova A.I., Kukartsev V.V., Tynchenko V.S., Kurashkin S.O., Tynchenko Y.A., Vivián I.F., Bashmur K.A. Increasing the Efficiency of Synthetic Iron Production by the Use of New Kit Lining // *Metals*. – 2023. – V. 13(7). – P. 1184. <https://doi.org/10.3390/met13071184>.
16. Ardashkin I.B., Yakovlev A.N. Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: Methodological aspect // *Advanced Materials Research*. – 2014. – V. 1040. – P. 912–916. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912>.
17. Sherov K.T., Sikhimbayev M.R., Absadykov B.N., Balgabekov T.K., Zhakaba A.D. Study of temperature distribution during rotary turning of wear-resistant cast iron // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. – 2022. – V. 2. – No. 452. – P. 271–282. <https://doi.org/10.32014/2022.2518-170X.175>.
18. Tananykhin D., Korolev M., Stecyuk I., Grigorev M. An Investigation into Current Sand Control Methodologies Taking into Account Geomechanical, Field and Laboratory Data Analysis // *Resources*. – 2021. – V. 10. – P. 125. <https://doi.org/10.3390/resources10120125>.
19. Tananykhin D., Palyanitsina A., Rahman A. Analysis of Production Logging and Well Testing Data to Improve the Development System for Reservoirs with Complex Geological Structure // *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. – 2020. – V. 7. – P. 629–648.
20. Toshov J.B., Sherov K.T., Sikhimbayev M.R., Absadykov B.N., Esirkepov A. Analysis of interaction of rock breaking tool with rock in the drilling process // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. – 2024. – V. 1. – No. 463. – P. 271–281. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-170X.380>.
21. Кукарцев В.В., Кравцов К.И., Тынченко Я.А., Панфилова Т.А. Влияние горных факторов на избыточность солей и токсичность почвы в горных условиях // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2023. – V. 15(3). – P. 784–797. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-784-797>.
22. Тынченко Я.А., Кукарцев В.В., Гладков А.А., Панфилова Т.А. Оценка качества технической воды в горнопромышленном производстве на основе методов машинного обучения // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2024. – V. 16(1). – P. 56–69. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-56-69>.
23. Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Lesovik R.V., Ageeva M.S., Fomina E.V., Ayubov N.A. Development of alkali-activated binders based on technogenic fibrous materials // *Construction Materials and Products*. – 2023. – V. 6(1). – P. 60–73. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73>.
24. Kondrat'ev V.V., Ershov V.A., Shakhrai S.G., Ivanov N.A., Karlina A.I. Formation and Utilization of Nanostructures Based on Carbon During Primary Aluminum Production // *Metallurgist*. – 2016. – V. 60(7–8). – P. 877–882.
25. Ma L., Ghorbani Y., Kongar-Syuryun C.B., Khayrutdinov M.M., Klyuev R.V., Petenko A., Brigida V. Dynamics of backfill compressive strength obtained from enrichment tails for the circular waste management // *Resources, Conservation and Recycling Advances*. – 2024. – V. 23. – P. 200224. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2024.200224>.
26. Vasileva V., Kukartsev V., Suprun E., Shalaeva D., Ageev D. Integration of automated information systems and architectural solutions in industrial enterprises // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – V. 458. – P. 09021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345809021>.
27. Голик В.И., Титова А.В., Титов Г.И. К утилизации хвостов обогащения руд цветных металлов // *Горная промышленность*. – 2023. – No. 5. – P. 96–101. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-96-101>.
28. Малых И.Б., Корнев А.В., Коршунов Г.И., Серёгин А.С. К вопросу проветривания подземных горных выработок при работе дизель-гидравлических локомотивов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 6-1. – С. 140–156. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_140.
29. Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Zolotareva S.V., Shchekina N.A., Shorstova E.S., Lesovik R.V., Ayubov N.A. Experimental studies of the processes of structure formation of composite mixtures with technogenic mechanoactivated silica component // *Construction Materials and Products*. – 2023. – V. 6(2). – P. 5–18. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18>.
30. Кабанов Е.И. Определение допустимого профессионального риска травмирования работников угледобывающих предприятий // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 5. – С. 167–180. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_5_0_167.

References

1. Zinovieva O.M., Smirnova N.A. On the issue of assessing the reliability of technical devices at mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2024, no. 1, pp. 157–168. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_1_0_157.
2. Kongar-Syuryun C., Klyuev R., Golik V., Oganessian A., Solovykh D., Khayrutdinov M., Adigamov D. Principles of Sustainable Development of Georesources as a Way to Reduce Urban Vulnerability. *Urban Science*, 2024, vol. 8, no. 2, p. 44. <https://doi.org/10.3390/urbansci8020044>.
3. Orlov V., Tynchenko V., Nizameeva A., Shalaeva D., Ageev D. Development of a multifunctional cross-platform system for automation of energy data and resource management. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 460(24), p. 07002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346007002>.
4. Tynchenko V.S., Stashkevich A., Muzyka P., Leontieva A.A., Degtyareva K.V. Effective energy management tools: inventory management and monitoring of energy consumption by personnel. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 458, p. 01011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345801011>.
5. Smolin A.V. About the design of the labor safety system at mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2022, no. 5-2, pp. 233–242. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_233.
6. Kaung P.A., Isakov A.E., Panfilov I.A., Tynchenko V.V., Stupina A.A. Principles for forming environmentally safe and economically effective sustainable development of geo resources. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2024, no. 7-1, pp. 159–175. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_71_0_159.
7. Pashkov E.N. An investigation into autobalancing devices with multireservoir system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66(1), p. 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/66/1/012014>.
8. Kravtsov K., Tynchenko V., Semenova E., Shalaeva D., Pinchuk I. Workflow automation and performance improvement based on PostgreSQL. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 458, p. 09022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345809022>.
9. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating Source. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 712, pp. 105–111. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105>.
10. Panfilova T.A., Tynchenko V.S., Kukartsev V.A., Bashmur K.A., Kondratiev V.V. To the concept of leaching metal-containing raw materials in the dizintegrator. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2023, no. 11-1, pp. 239–251. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_239.
11. Vidayev I.G. The resource efficiency assessment technique for the foundry production. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 141–145. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141>.
12. Rybak Y., Khayrutdinov M., Kongar-Syuryun C., Tyulyayeva Y. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2021, vol. 13(3), pp. 405–415. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415>.
13. Brigida V.S., Golik V.I., Dzeranov B.V. Modeling of Coalmine Methane Flows to Estimate the Spacing of Primary Roof Breaks. *Mining*, 2022, vol. 2, pp. 809–821. <https://doi.org/10.3390/mining2040045>.
14. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Azhmukhamedov I.M., Revazov V.Ch. Statistical dynamics-based estimation of ventilation control in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2021, no. 11, pp. 123–135. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_11_0_123.
15. Kukartsev V.A., Trunova A.I., Kukartsev V.V., Tynchenko V.S., Kurashkin S.O., Tynchenko Y.A., Vivián I.F., Bashmur K.A. Increasing the Efficiency of Synthetic Iron Production by the Use of New Kit Lining. *Metals*, 2023, vol. 13(7), p. 1184. <https://doi.org/10.3390/met13071184>.
16. Ardashkin I.B., Yakovlev A.N. Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: Methodological aspect. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1040, pp. 912–916. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912>.
17. Sherov K.T., Sikhimbayev M.R., Absadykov B.N., Balgabekov T.K., Zhakaba A.D. Study of temperature distribution during rotary turning of wear-resistant cast iron. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 2022, vol. 2, no. 452, pp. 271–282. <https://doi.org/10.32014/2022.2518-170X.175>.
18. Tananykhin D., Korolev M., Stecyuk I., Grigorev M. An Investigation into Current Sand Control Methodologies Taking into Account Geomechanical. *Field and Laboratory Data Analysis. Resources*, 2021, vol. 10, p. 125. <https://doi.org/10.3390/resources10120125>.
19. Tananykhin D., Palyanitsina A., Rahman A. Analysis of Production Logging and Well Testing Data to Improve the Development System for Reservoirs with Complex Geological Structure. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 2020, vol. 7, pp. 629–648.
20. Toshov J.B., Sherov K.T., Sikhimbayev M.R., Absadykov B.N., Esirkepov A. Analysis of interaction of rock breaking tool with rock in the drilling process. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 2024, vol. 1, no. 463, pp. 271–281. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-170X.380>.

21. Kukartsev V.V., Kravtsov K.I., Tynchenko Ya.A., Panfilova T.A. Influence of mountain factors on salt excess and soil toxicity in mountain conditions. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2023, vol. 15(3), pp. 784–797. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-784-797>.
22. Tynchenko Ya.A., Kukartsev V.V., Gladkov A.A., Panfilova T.A. Assessment of technical water quality in mining based on machine learning methods. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2024, vol. 16(1), pp. 56–69. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-56-69>.
23. Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Lesovik R.V., Ageeva M.S., Fomina E.V., Ayubov N.A. Development of alkali-activated binders based on technogenic fibrous materials. *Construction Materials and Products*, 2023, vol. 6(1), pp. 60–73. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73>.
24. Kondrat'ev V.V., Ershov V.A., Shakhrai S.G., Ivanov N.A., Karlina A.I. Formation and Utilization of Nanostructures Based on Carbon During Primary Aluminum Production. *Metallurgist*, 2016, vol. 60(7–8), pp. 877–882.
25. Ma L., Ghorbani Y., Kongar-Syuryun C.B., Khayrutdinov M.M., Klyuev R.V., Petenko A., Brigida V. Dynamics of backfill compressive strength obtained from enrichment tails for the circular waste management. *Resources, Conservation and Recycling Advances*, 2024, vol. 23, p. 200224. <https://doi.org/10.1016/j.rcr-adv.2024.200224>.
26. Vasileva V., Kukartsev V., Suprun E., Shalaeva D., Ageev D. Integration of automated information systems and architectural solutions in industrial enterprises. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 458, p. 09021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345809021>.
27. Golik V.I., Titova A.V., Titov G.I. On utilization of concentration tailings of non-ferrous metal ores. *Russian Mining Industry*, 2023, no. 5, pp. 96–101. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-96-101>.
28. Malykh I.B., Kornev A.V., Korshunov G.I., Seregin A.S. To the question of ventilation of underground mine workings during operation of diesel-hydraulic locomotives. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2022, no. 6-1, pp. 140–156. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_140.
29. Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Zolotareva S.V., Shchekina N.A., Shorstova E.S., Lesovik R.V., Ayubov N.A. Experimental studies of the processes of structure formation of composite mixtures with technogenic mechano activated silica component. *Construction Materials and Products*, 2023, vol. 6(2), pp. 5–18. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18>.
30. Kabanov E.I. Allowable occupational injury risk assessment in coal mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2022, no. 5, pp. 167–180. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_5_0_167.

Сведения об авторах

Дмитриева Елена Анатольевна – кандидат физико-математических наук, Физико-технический институт, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы, 050000, ул. Сатпаева, 22, dmitriyeva2017@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1280-2559>



Елемесов Касым Коптлеуевич – кандидат технических наук, профессор, кафедра материаловедения, нанотехнологий и инженерной физики, Институт энергетики и машиностроения, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы, 050000, ул. Сатпаева, 22, k.yelemessov@satbayev.university. <https://orcid.org/0000-0001-6168-2787>



Information about the authors

Elena A. Dmitriyeva – Cand. Sc., Institute of Physics and Technology, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, 22, Satpayeva str., Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, dmitriyeva2017@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1280-2559>

Kassym K. Yelemessov – Cand. Sc., Professor, Department of Materials Science, Nanotechnology and Engineering Physics, Institute of Energy and Mechanical Engineering, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, 22, Satpayeva str., Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, k.yelemessov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-6168-2787>

Автор-корреспондент: Дмитриева Е.А., dmitriyeva2017@mail.ru

Corresponding author: Dmitriyeva E.A., dmitriyeva2017@mail.ru

Критерии авторства

Авторы внесли равноценный вклад в подготовку данной статьи.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the writing of this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Получена редакцией 15.07.2024
Получена после рецензии 07.08.2024
Принята к печати 30.08.2024

Received: 15.07.2024
Revised: 07.08.2024
Accepted: 30.08.2024