

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 6. С. 197–211.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2025; 27 (6): 197–211.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.276

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-197-211

EDN: MIGBLX

# ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЭПОКСИДНО-ПОЛИЭФИРНОЙ ПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ВОЛОКОН ХРИЗОТИЛА

**Людмила Николаевна Наумова**

*Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

**Аннотация.** Актуальность исследования заключается в возможности использования модифицированных волокон хризотила в качестве наполнителя эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции для улучшения физико-химических свойств состава и получения термоотверждаемого полимерного покрытия с улучшенными свойствами.

**Цель** настоящей работы – исследование химического состава исходной и наполненной модифицированными волокнами хризотила порошковой композиции и оценка физико-химических свойств полимерных покрытий.

**Результаты.** Установлено изменение химического состава исходной порошковой композиции при введении модифицированных волокон хризотила. Показано повышение соле- и кислотостойкости полученных полимерных покрытий. Установлено снижение пористости покрытий, наполненных волокнами, по сравнению с ненаполненными. Представлена термостойкость полученных полимерных покрытий на модифицированных волокнистых наполнителях при температуре 190 и 550 °С, отличающихся повышенной величиной.

**Ключевые слова:** порошковая композиция, эпоксидно-полиэфирное связующее, термоотверждаемое покрытие, модифицированные волокна, хризотил, коррозионная устойчивость, пористость, адгезия, термостойкость

**Благодарности:** работа выполнена с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

**Для цитирования:** Наумова Л.Н. Изменение химического состава эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции на основе модифицированных волокон хризотила // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 197–211. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-197-211. EDN: MIGBLX

## ORIGINAL ARTICLE

**CHEMICAL COMPOSITION OF EPOXY-POLYESTER POWDERS BASED ON MODIFIED CHRYSOTILE FIBER****Lyudmila N. Naumova***Belgorod Shukhov State Technological University, Belgorod, Russia*

**Abstract.** Modified chrysotile fiber can be used as a filler in the epoxy-polyester powder composition to improve its physicochemical properties and obtain a thermosettable polymer coating with improved properties.

**Purpose:** The aim of this work is to study the chemical composition of the initial and fiber-modified chrysotile powder composition and evaluate physicochemical properties of polymer coatings.

**Research findings:** It is shown that the chemical composition of the initial powder composition changes after the addition of modified chrysotile fiber. The salt and acid resistance of the obtained polymer coatings increases. The porosity of coatings filled with fibers decreases in comparison with unfilled ones. The heat resistance of the obtained polymer coating with the addition of modified fibrous fillers grows at heating at 190 and 550 °C.

**Keywords:** powder composition, epoxy-polyester powder, thermosettable coating, modified fiber, chrysotile, corrosion resistance, porosity, adhesion, heat resistance

**Acknowledgment:** the authors like to express their gratitude towards the management of the High Technology Center of the Belgorod State Technological University for equipment employed in these studies.

**For citation:** Naumova L.N. Chemical Composition of Epoxy-Polyester Powders Based on Modified Chrysotile Fiber. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (6): 197–211. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-197-211. EDN: MIGBLX

**Введение**

В настоящее время вопросы, связанные с улучшением эксплуатационных характеристик полимерных порошковых покрытий, их рецептур продолжают оставаться актуальными и вызывают интерес [1, 2]. Формирование состава наполненных композиций направлено также на подбор полимерных связующих, пластификаторов, стабилизаторов, пигментов, катализаторов, наполнителей, различных добавок, улучшающих качество расплава по поверхности окрашиваемого материала.

Преимущества полимерных порошковых покрытий связаны с точки зрения технологичности процесса, экономической составляющей, экологических подходов. Использование существующих технологий нанесения порошка позволяет получать покрытия с необходимыми физико-химическими, декоративными и эксплуатационными свойствами. Сегодня возможно окрашивать силикатные, древесные и другие поверхности и материалы [3, 4].

В качестве порошковых покрытий функционального назначения широко используются порошковые краски на эпоксидной, полиэфирной и гибридных (эпоксидно-полиэфирных) основах [5–7]. В промышленных составах порошковых красок на полиэфирной основе в основном содержатся: смолы, отвердители – 40–60 %; пигменты, наполнители – 30–50 %; различные добавки – 5–10 %. Отвердителями полиэфирных связующих являются амины, ангидриды, заблокирован-

ные изоцианаты, эпоксидных – аминные и полиэтиленполиаминные. Эпоксидно-полиэфирные порошковые краски предполагают замену от 50 до 70 % эпоксидной смолы твердыми полиэфирами. Неорганическими пигментами для порошковых красок служат диоксид титана, оксид железа, микронизированный карбонат кальция, сажа и др. Органические пигменты – фталоцианин, бензидин, бензимидазол, хинакридон. Наполнителями выступают бариты, бланфикс, доломиты, слюда, тальк, в качестве разбавителей – силицид алюминия, литопон, полиакрилаты, адсорбированные на диоксиде кремния. Порошковые краски являются полидисперсными, размер их частиц составляет 5–350 мкм. Выбор метода нанесения порошковой краски на поверхность изделия зависит от ее дисперсности [8, 9].

### Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использован состав порошковой окрасочной композиции турецкого производства BPCOAT-PU, Pulver: Micropul. Маркировка упаковки: 02.27 W2 H 7040 – RAL 7040; GRI PUTURLU YARI PARLAK, что соответствовало – гибридная (эпоксидно-полиэфирная), полуглянцевая, серого цвета, термоотверждаемая.

Механическая обработка хризотилowych волокон, предварительно высушенных, заключалась в их измельчении до размера фракции 50 мкм. Обработку проводили с использованием керамической мельницы в лабораторных условиях. Суммарное время обработки волокон составило 60 мин.

Обработка хризотилowych волокон [10] в дистиллированной воде заключалась в их выдержке в данной среде сроком до 4 дней. pH водных вытяжек хризотила невыветрелых пород составляет 9,5–10,2. Ранее [10] экспериментальным путем было установлено, что значение электрокинетического потенциала ( $\zeta$ -потенциал) исходного хризотила в дистиллированной воде (удельная электропроводность воды 4,64 мкСм/см, pH = 6,1,  $t = 19^\circ\text{C}$ ) составляет +18,8 мВ. Анализ полученного значения  $\zeta$ -потенциала показал, что исходный хризотил в дистиллированной воде имеет положительный знак заряда поверхности волокон при комнатной температуре, ввиду преимущественной диссоциации ионов  $\text{OH}^-$  и избытка ионов  $\text{Mg}^{+2}$ . Кроме этого, вследствие диссоциации ионов  $\text{OH}^-$  отмечается значительное увеличение удельной электропроводности воды (177,6 мкСм/см) при добавлении хризотила для получения суспензии. По окончании выдержки хризотила в водной среде его подвергали распушке путем перемешивания в лабораторной пропеллерной мешалке. Вода, проникая в межволоконное пространство пучков волокон, способствует их расщеплению на тонкие волокна и увеличивает их сопротивление при изломе в процессе обработки в мешалке. Степень распушки хризотилowych волокон в водной среде составила около 90 %.

Модифицирование волокон хризотила химическим способом проведено с использованием 5%-го раствора хлорида аммония ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) и с последующей отмывкой до нейтральной среды (pH 6,9–7,1) [10]. Выбор концентрации раствора и используемого электролита опирался на предварительный экспериментальный подход и сравнительный анализ полученных ранее [11, 12] результатов работы по модифицированию волокон хризотила под воздействием различных модифицирующих факторов. Обработка исходных волокон хризотила 5%-м водным раствором хлористого аммония (слабого электролита) способствует пе-

резарядке поверхности волокон и увеличению абсолютной величины отрицательного заряда поверхности, что объясняется выщелачиванием магния из поверхностного слоя волокон хризотила.

Модифицированные волокна хризотила вводили в состав эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции для повышения антикоррозионной и термической стойкости покрытия.

Количество модифицированных волокон хризотила, вводимых в состав порошка, составляло 30 % от его массы. Данное количество наполнителя соответствовало равномерному распределению частиц хризотила в порошковой композиции и было предварительно опробовано в составе смеси при получении покрытия. Порошковую краску наносили на металлические пластины из стали Ст3. Размер пластин составлял 50×100 мм. Покрытие наносилось электростатическим распылением в распылительной камере, полимеризация и отверждение происходили при обжиге в печи в заводских условиях. Температура полимеризации покрытия – 180 °С, время полимеризации – 15 мин.

Электронно-микроскопические исследования полученных полимерных покрытий без наполнителя и наполненных модифицированными волокнами хризотила проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения марки TESCAN MIRA 3 LMU. Методом энергодисперсионного анализа был определен элементный химический состав порошковых композиций.

Идентификацию компонентного состава исходной эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции и наполненной, а также модифицированных волокон хризотила анализировали с использованием метода инфракрасной спектrophотометрии [13–15]. Спектры поглощения исследуемых образцов были получены с помощью ИК-Фурье в спектрометре VERTEX 70 в области 4000–500 см<sup>-1</sup> фирмы-изготовителя Bruker Optik GmbH (Германия).

Определение стойкости полученных полимерных покрытий к действию агрессивных сред проводили по ГОСТ 9.302–88 и ГОСТ 9.403–80 методом погружения пластин в растворы: 25 % HCl, 5 % NaCl, 20 % CuSO<sub>4</sub>. Сущность метода состояла в погружении образцов в испытуемый раствор и выдержке в нем в течение необходимого времени. При определении коррозионной устойчивости покрытий в кислом и солевом растворах образцы выдерживали в течение 24 ч. В каждом коррозионном испытании использовали по 3 образца, один из которых был выбран в качестве контрольного. Перед испытанием производили взвешивание образцов на аналитических весах с точностью до 4-го знака после запятой.

Изменение массы образцов после каждого периода испытания в коррозионной среде ( $\Delta M$ ) вычисляли по формуле

$$\Delta M = M_1 - M, \quad (1)$$

где  $M$  – масса испытуемого образца до первого погружения его в химический реагент, г;  $M_1$  – масса испытуемого образца после выдержки его в химическом реагенте, г.

Определение пористости покрытий проводили в соответствии с ГОСТ 9.302–88. Метод основан на взаимодействии исследуемой поверхности со средой реагента и образованием окрашенных соединений в местах пор. При проведении контроля выбран метод погружения образцов в раствор, ука-

занный в стандартной методике: калий железосинеродистый – 3 г/дм<sup>3</sup>; натрий хлористый – 10 г/дм<sup>3</sup>. Исследование проводили при температуре 22 °С и выдержке стандартных образцов (100×150 мм) в растворе в течение 5 мин. По прошествии времени с помощью электронного микроскопа подсчитывали число синих точек, соответствующих числу пор.

Среднее число пор ( $N_{\text{ср}}$ ) вычисляли по формуле

$$N_{\text{ср}} = \frac{N_{\text{общ}}}{S}, \quad (2)$$

где  $N_{\text{ср}}$  – общее число пор на контролируемой поверхности;  $S$  – площадь контролируемой поверхности, см<sup>2</sup>.

Адгезионные свойства покрытий оценивали в соответствии с ГОСТ 9.302–88. Метод контроля адгезионных свойств покрытия заключался в нагреве образцов в сушильном шкафу до температуры 190 °С в течение 1 ч. По прошествии времени образцы охлаждали на воздухе. Перед испытанием производили взвешивание образцов на аналитических весах с точностью до 4-го знака после запятой.

Изменение ( $\Delta M$ ) массы образцов после испытания на адгезионную прочность после их выдержки при 190 и 550 °С вычисляли по формуле

$$\Delta M = M_0 - M_1, \quad (3)$$

где  $M_0$  – масса испытуемого образца до его нагрева, г;  $M_1$  – масса испытуемого образца после выдержки его при указанной температуре, г.

Оценку воспламеняемости покрытий проводили в соответствии с ISO 4589 (ASTMD 2863). В зависимости от фактора окружающей среды исследуемые образцы подвергают испытаниям при температурах: 550, 650, 750, 850 и 960 °С. Соответствующая температура испытания выбирается с учетом риска недопустимого нагрева изделий, их воспламенения и распространения пламени. На основании данного факта была выбрана минимальная температура для испытания. Испытанию подвергались образцы стандартных размеров 100×150 мм. Перед испытанием производили взвешивание образцов на аналитических весах с точностью до 4-го знака после запятой. Выдержку образцов проводили в муфельной печи при температуре 550 °С в течение 1 ч с последующим охлаждением в ней до полного остывания в течение 24 ч.

### Результаты и обсуждение

Анализ полученных спектров поглощения модифицированных волокон хризотила (рис. 1) свидетельствует об увеличении интенсивности пиков, характерных для волокон, обработанных хлоридом аммония и измельченных, по сравнению с обработанными водой. Данный факт позволяет заключить, что слабокислая среда раствора хлорида аммония и механическая обработка волокон хризотила способствуют изменению состояния их поверхности за счет формирования реакционноактивных центров. В водной среде происходит увеличение удельной поверхности хризотила за счет распушивающего эффекта волокон.

В табл. 1 представлены полученные значения спектров поглощения модифицированных волокон хризотила и характерные для них колебания типов связи.

Анализ данных, представленных в табл. 1, позволяет заключить, что при механической обработке волокон появляются полосы спектров поглощения

в области 1024 и 748  $\text{см}^{-1}$ , связанные с валентными колебаниями связи Si–O. Для волокон, модифицированных водной средой, данный тип колебания связи появляется в области спектра 631  $\text{см}^{-1}$ ; для волокон механомеханической и кислотной обработок аналогичный тип связи смещается в область спектра 617  $\text{см}^{-1}$ . Валентные колебания OH-групп в области 3775, 3688, 3638 и 3427  $\text{см}^{-1}$  свидетельствуют об их увеличении за счет обнажения бруситового слоя при активации поверхности волокон хризотила, по сравнению с обработанными водой волокнами. Механическая и кислотная обработка волокон способствуют деформационным колебаниям данного вида связей в области 2945  $\text{см}^{-1}$ , которые отсутствуют у волокон, выдержанных в водной среде.

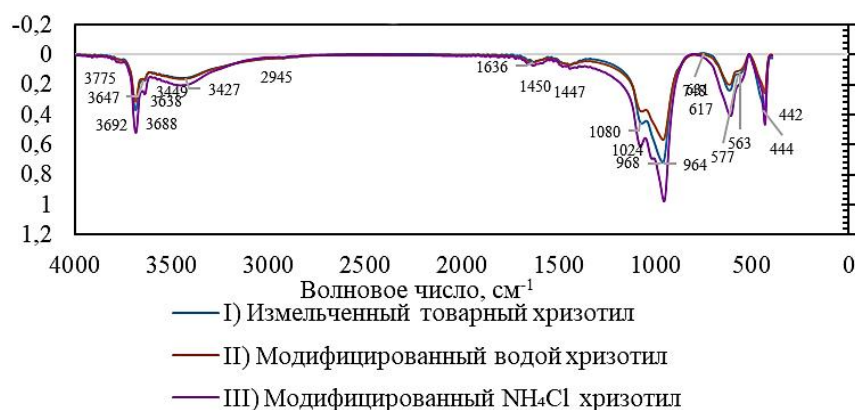


Рис. 1. ИК-спектры модифицированных волокон хризотила

Fig. 1. IR spectra of modified chrysotile fiber

Таблица 1

**Характеристические частоты и функциональные группы модифицированных волокон хризотила**

Table 1

**Characteristic frequencies and functional groups of modified chrysotile fiber**

ИК-спектры поглощения, см <sup>-1</sup>			Связь	Тип колебаний
Способ обработки				
Механический	Химический			
Измельчение	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> Cl		
3775	–	3775	ОН <sup>-</sup>	Валентные
3688	3692	3688	ОН <sup>-</sup>	Валентные
3638	3647	–	ОН <sup>-</sup>	Валентные
3427	3449	3427	ОН <sup>-</sup>	Валентные
2945	–	2945	ОН <sup>-</sup>	Деформационные
1636	1636	1636	ОН <sup>-</sup>	Деформационные
1450	1447	1450	ОН <sup>-</sup>	Деформационные
1080	1080	1080	Si–O	Валентные
1024	–	–	Si–O	Валентные
964	968	964	Si–O	Асимметричные

Окончание табл. 1

End of table 1

ИК-спектры поглощения, см <sup>-1</sup>			Связь	Тип колебаний
Способ обработки				
Механический	Химический			
Измельчение	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> Cl		
748	—	—	Si–O(SiO <sup>2–</sup> <sub>4</sub> ) <sub>тетр</sub>	Тетраэдральные
—	631	—	Si–O	Тетраэдральные
617	—	617	Si–O–Si	Тетраэдральные
563	577	563	Si–O–Mg <sup>2+</sup>	Тетраэдральные
442	444	442	(SiO <sup>2–</sup> <sub>4</sub> ) <sub>тетр</sub> , отчасти Si–O–Mg <sup>2+</sup>	Деформационные

Сравнительный анализ полученных кривых спектров поглощения (рис. 2) эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции без волокнистого наполнителя и с модифицированными волокнами хризотила свидетельствует об увеличении интенсивности пиков и появлении дополнительных спектров поглощения в пользу присутствующих в составе смеси волокон.

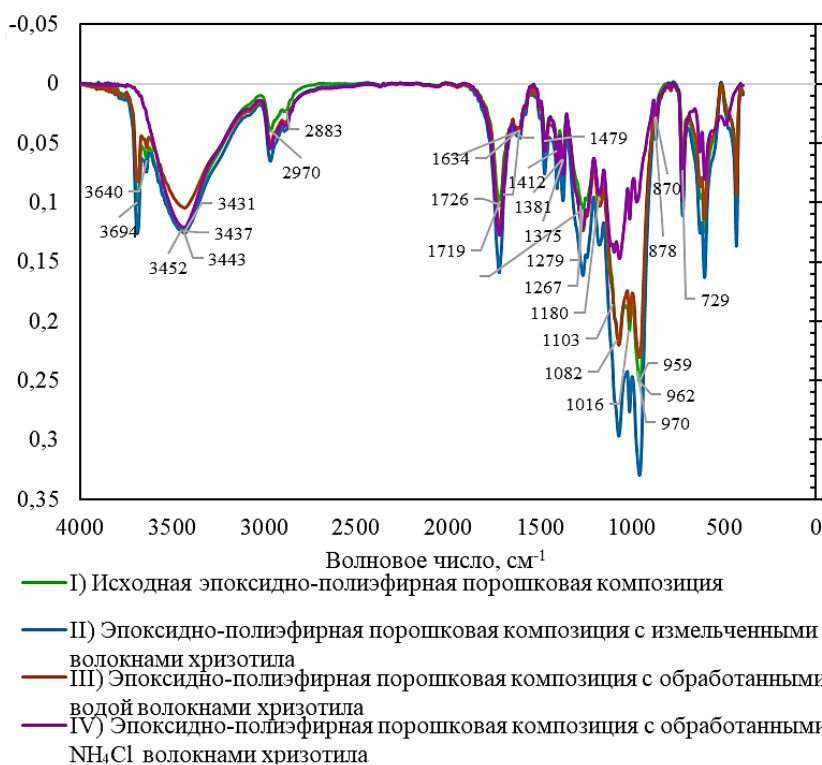


Рис. 2. ИК-спектры эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции без наполнителя и с наполнителем – модифицированными волокнами хризотила

Fig. 2. IR spectra of epoxy-polyester powder composition with and without the addition of modified chrysotile fiber

При введении модифицированных волокон хризотила в эпоксидно-полиэфирную порошковую композицию (рис. 2, табл. 2) происходит изменение интенсивности и некоторое смещение полос спектров поглощения. Наиболее показательно в области: 1730–1300; 1280–1000; 970–500 см<sup>-1</sup>, по сравнению с исходной – ненаполненной. Интенсивность пиков свидетельствует о степени полимеризации полимера при введении волокон хризотила в порошковую композицию.

Таблица 2

**Характеристические частоты и функциональные группы исходной и наполненной эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции**

Table 2

**Characteristic frequencies and functional groups of the epoxy-polyester powder composition with and without the addition of modified chrysotile fiber**

ИК-спектры поглощения, см <sup>-1</sup>				Связь	Примечание
Наполнение композиции волокнами хризотила					
Исходная, без напол- нителя	Измель- ченными	Модифици- рованными водой	Модифи- цирован- ными NH <sub>4</sub> Cl		
–	3692	3692	3694	ОН	Валентные колебания ОН-групп хризотила
–	3638	3640	–	ОН	Валентные колебания ОН-групп хризотила
3452	3443	3437	3431	ОН	Валентные колебания ОН-групп хризотила
2970	2976	2972	2974	C–H (–CH <sub>2</sub> )	Асимметричные связи
2883	2889	2878	2889	C–H (–CH <sub>2</sub> )	Асимметричные связи
1719	1726	1726	1726	C=O	Карбонильная сложноэфирная
1634	1616	1611	1628	C=O	Валентные колебания эфирной связи
1479	1479	1477	1475	CH <sub>2</sub>	Ножничные колебания
1412	–	1412	–	C–H (–CH <sub>2</sub> ) (–CH <sub>3</sub> )	Деформационные колебания
1375	1375	–	1381	C–H (–CH <sub>3</sub> )	Деформационные колебания
1271	1267	1273	1279	C–O–C	Деформационные ко- лебания эфирной связи
1180	1186	1182	1177	C–O–C	Колебания сложно- эфирной группы
1103	–	–	–	C–O; C–C; C–O–C; C–H	Колебания эпексид- ных, эфирных, арома- тических групп



Окончание табл. 2

End of table 2

ИК-спектры поглощения, см <sup>-1</sup>				Связь	Примечание
Наполнение композиции волокнами хризотила					
Исходная, без напол- нителя	Измель- ченными	Модифици- рованными водой	Модифи- цирован- ными NH <sub>4</sub> Cl		
–	1080	1078	1082	Si–O	Валентная переменная связи Si–O
1016	1016	1018	1018	Si–O	Валентная переменная связи Si–O
970	–	–	–	C–H; C=C	Асимметричные колебания
–	959	962	968	Si–O	Колебания Si–O в тет- раэдрических группах SiOH
870	870	878	–	Si–O; C–H	Колебания связей Si–O, ароматического кольца
729	729	729	729	C–H (–CH <sub>2</sub> )	Деформационные колебания
636	636	636	636	Si–O–Mg Me–O	Деформационные колебания связей Si–O–Mg; Me–O
609	609	608	611	Me–O	Колебания металлов в октаэдрических позициях
500	–	–	–	Me–O	Колебания металлов в октаэдрических позициях
–	486	478	–	Si–O–Me	Колебания силикатных тетраэдров
–	434	436	434	Si–O–Me	Колебания силикатных тетраэдров

Валентные колебания вдоль связи Si–O в тетраэдрических группах SiOH в области 1016–1080, 959–878 см<sup>-1</sup> говорят о влиянии полимера на поверхность модифицированных волокон хризотила, что подтверждается увеличением интенсивности пиков. При введении в композит измельченных и обработанных хлоридом аммония волокон исчезают деформационные колебания связей C–H в группах –CH<sub>2</sub> и –CH<sub>3</sub> (табл. 2) в области 1412 см<sup>-1</sup>. Данный факт можно объяснить изменением угла связи между атомами и колебаниями связей при близких частотах. Колебания связей в области 1103 и 970 см<sup>-1</sup>, характерные для колебаний эпоксидных, эфирных, ароматических групп исходной полимерной

композиции при введении волокнистых частиц, не проявляются при введении модифицированных волокон хризотила, что может говорить о колебании энергетически равноценных групп атомов. Также можно заключить, что полоса в области  $970\text{ см}^{-1}$  может сместиться в область полос  $959, 962, 968\text{ см}^{-1}$  ввиду появления колебаний связи Si–O в тетраэдрических группах SiOH.

В области полосы  $500\text{ см}^{-1}$  спектра колебаний связи Me–O исходной полимерной композиции происходит ее смещение в область полос  $486, 478, 436, 434\text{ см}^{-1}$  с образованием связей Si–O–Me, что также может свидетельствовать о взаимодействии металлосодержащих наполнителей порошковой эпоксиодно-полиэфирной композиции с кремнекислородными связями хризотиловых частиц.

Химический состав порошковых композиций без наполнителя и с модифицированными волокнами хризотила представлен на рис. 3–5.

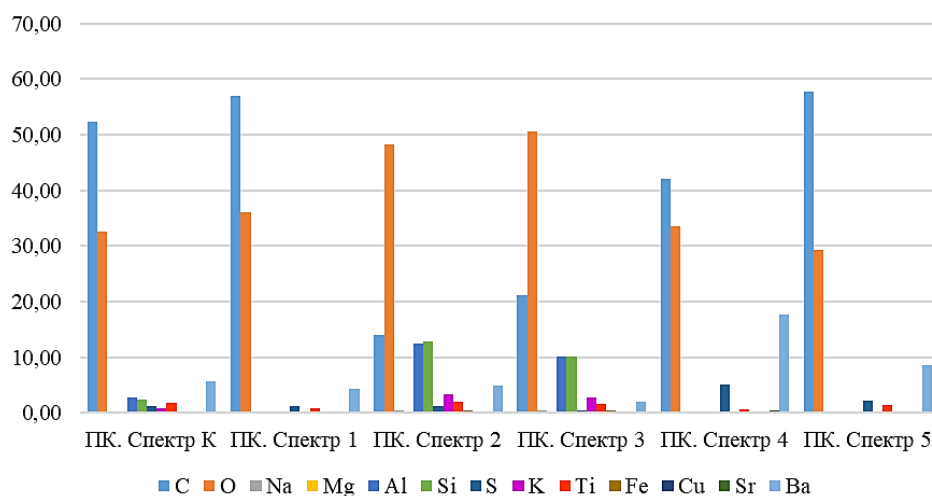


Рис. 3. Химический состав исходной полимерной композиции  
Fig. 3. Chemical composition of the initial polymer composition

Основными элементами химического состава исходной эпоксиодно-полиэфирной порошковой композиции (рис. 3) являются углерод, кислород, барий, кремний, алюминий, сера, медь, магний, титан, железо. Данные химические элементы соответствуют эпоксиодно-полиэфирной матрице, наполнителям и пигментам, улучшающим качественные показатели готового покрытия. Барий в составе бланфикса, оксид титана, сульфидсодержащую медь вводят в состав порошка в качестве пигментирующих, оттеночных составляющих. Кремний, магний, алюминий, натрий, калий находятся в составе слюды, в зависимости от ее типа. Слюда в качестве наполнителя порошковой системы улучшает физико-механические свойства покрытий, придает устойчивость к фактору внешних воздействий и декоративность. Алюминийсодержащий компонент может находиться в составе композиции в качестве наполнителя, улучшающего объем, адгезию порошка по поверхности металла. Оксид кремния вводят в состав порошковой системы для регулирования вязкости расплава, повышения текучести и адгезионных свойств порошка.

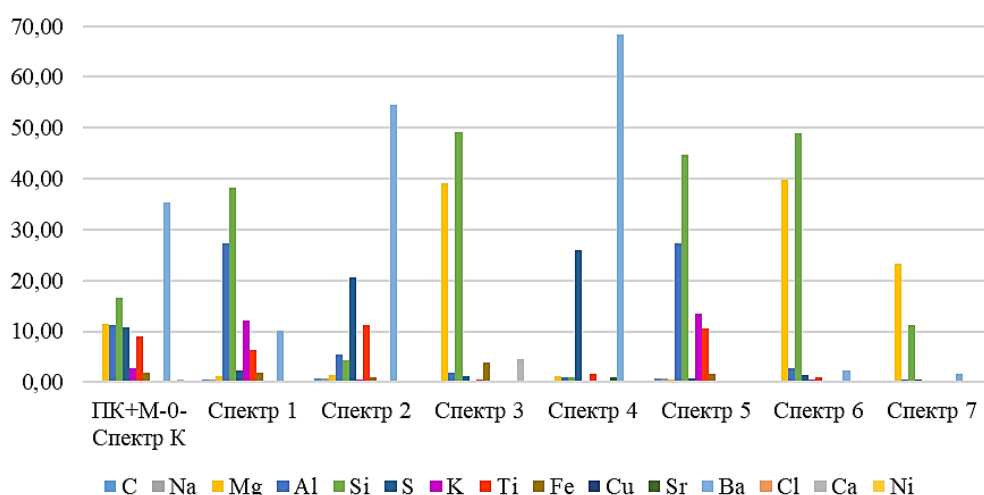


Рис. 4. Химический состав полимерной композиции с измельченными волокнами хризотила  
Fig. 4. Chemical composition of polymer composition with milled chrysotile fiber

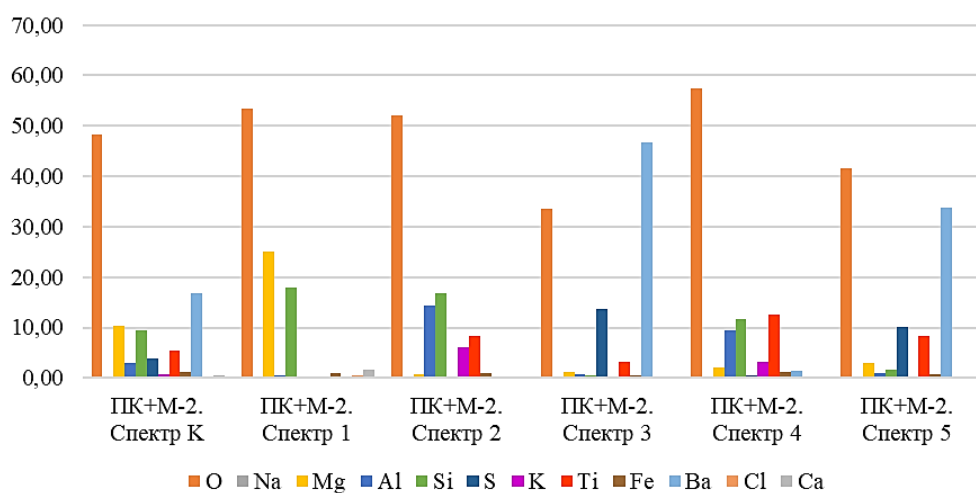


Рис. 5. Химический состав полимерной композиции с обработанными  $\text{NH}_4\text{Cl}$  волокнами хризотила  
Fig. 5. Chemical composition of polymer composite with  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -modified chrysotile fiber

При введении в исходную эпоксидно-полиэфирную композицию измельченных волокон хризотила (рис. 4) происходит увеличение содержания магния, кремния, алюминия, железа, что объясняется химическим составом волокон. Алюминий и железо могут присутствовать в качестве примесных элементов в составе природных волокон хризотила.

Химический состав порошковой композиции (рис. 5) с модифицированными  $\text{NH}_4\text{Cl}$  волокнами хризотила показывает появление в ее составе кислорода и уменьшение количественного состава вышеприведенных элементов. Данный факт можно объяснить тем, что при обработке волокон хризотила хлоридом ам-

мония происходит изменение их электроповерхностных свойств [10], что способствует перераспределению элементов композиции на поверхности волокон.

Результаты испытаний эпоксидно-полиэфирных покрытий на коррозионную устойчивость в агрессивных средах представлены на рис. 6.

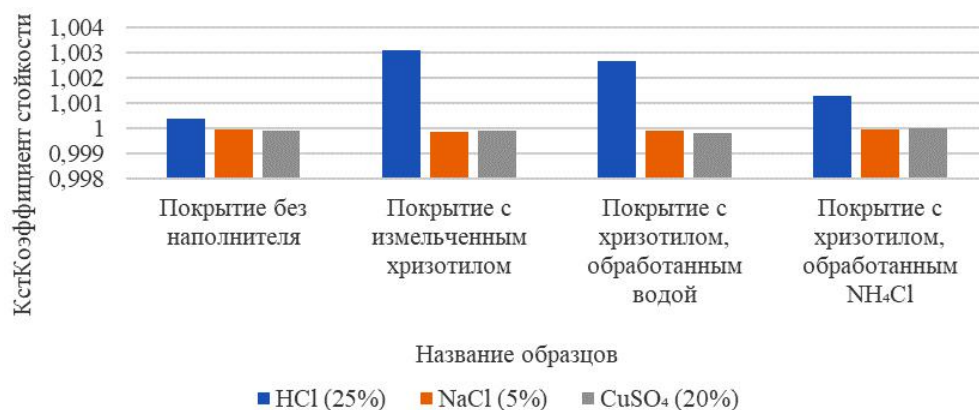


Рис. 6. Химическая стойкость эпоксидно-полиэфирных покрытий  
Fig. 6. Chemical resistance of epoxy-polyester coatings

Анализируя полученные данные по химической устойчивости эпоксидно-полиэфирных покрытий (рис. 6) с модифицированными волокнами хризотила, можно отметить повышение коррозионной устойчивости наполненных покрытий: в среде 25%-го раствора HCl; в среде 20%-го раствора CuSO<sub>4</sub> – для покрытия с волокнами, модифицированными 5%-м раствором NH<sub>4</sub>Cl; в среде 5%-го раствора NaCl – с измельченными волокнами хризотила. Отклонения показателя химической стойкости полимерного покрытия на 1 % считаются допустимыми, в соответствии с государственными стандартами.

Результаты анализа пористости эпоксидно-полиэфирных покрытий без наполнителя и с модифицированными волокнами хризотила, а также диаграммы их температурной устойчивости представлены на рис. 7, 8.



Рис. 7. Пористость эпоксидно-полиэфирных покрытий  
Fig. 7. Porosity of epoxy-polyester coatings

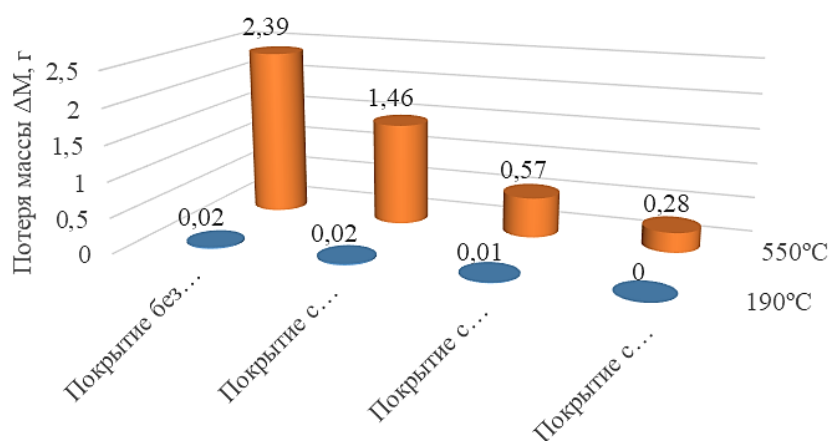


Рис. 8. Температурная устойчивость эпоксидно-полиэфирных покрытий  
Fig. 8. Temperature resistance of epoxy-polyester coatings

Представленные на рис. 7 диаграммы пористости эпоксидно-полиэфирных покрытий свидетельствуют о снижении пористости покрытий с использованием в качестве наполнителя модифицированных волокон хризотила.

Анализируя представленные на рис. 8 диаграммы температурной устойчивости эпоксидно-полиэфирных покрытий, выдержанных при температурах 190 и 550 °С, можно отметить, что меньше всего потеряли массу образцы с модифицированными волокнами хризотила.

### Заключение

Таким образом, в работе представлены результаты исследования химического состава исходной и наполненной модифицированными волокнами хризотила эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции. Показано химическое взаимодействие между компонентами порошковой композиции и волокнами хризотила.

Наполненные полимерные покрытия имеют повышенную химическую устойчивость в среде 25%-го раствора HCl, для покрытий с измельченными и обработанными хлоридом аммония волокнами соответственно в средах 5%-го раствора NaCl и 20%-го раствора CuSO<sub>4</sub>.

Установлено, что пористость эпоксидно-полиэфирных покрытий с наполнителями на основе модифицированных волокон хризотила меньше на 40–70 % по сравнению с ненаполненными.

При 550 °С потери массы для наполненных эпоксидно-полиэфирных покрытий на 11 и 23 % меньше по сравнению с ненаполненными.

Результаты проведенных исследований подтверждают возможность использования модифицированных волокон хризотила в качестве наполнителя эпоксидно-полиэфирных покрытий для улучшения их физико-химических свойств. Дальнейшая работа будет направлена на совершенствование и оптимизацию состава порошковой краски с использованием отечественных ингредиентов, а также на отработку способов модификации хризотиловых волокон и их введения в состав порошка.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федяев В.Л., Галимов Э.Р., Беляев А.В. и др. Многофакторная параметризация адгезионной прочности полимерных порошковых покрытий // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2023. Т. 79. № 3. С. 63–69. EDN: OXGZLY
2. Нестерова А.Г., Кирпаль Ю.Г. Современное производство порошковых лакокрасочных материалов // Химическая промышленность сегодня. 2022. № 4. С. 44–52. DOI: 10.53884/27132854\_2022\_4\_44
3. Бондарь М.А., Латыпов О.Р., Бугай Д.Е. Разработка состава интеллектуального покрытия для защиты от коррозии оборудования нефтепереработки // Инженерная физика. 2023. № 7. С. 3–6. DOI: 10.25791/infizik.7.2023.1339. EDN: HVGCS
4. Прокопчук Н.Р., Шутова А.Л., Казаков П.П. Химия и физика пленкообразующих веществ. Минск : БГТУ, 2014. 365 с. ISBN 978-985-530-310-8. EDN: UYQDIQ
5. Осовская И.И., Зверева В.А. Порошковая полиэфирная краска для полимерных покрытий // Вестник ТвГУ. Серия: Химия. 2018. № 2. С. 111–117. EDN: YMJWTZ
6. Гусева Е.А., Константинова М.В. Порошковые полимерные покрытия как альтернативный способ защиты металлов от коррозии // Вестник ИрГТУ. 2015. № 10 (105). С. 71–76. EDN: VCPCKJ
7. Яковлев А.Д. Актуальные вопросы технологии порошковых лакокрасочных материалов и покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. 2002. № 4. С. 20–25.
8. Кухта Т.Н., Прокопчук Н.Р. Пленкообразователи порошковых красок и их отвердители // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2018. № 1 (205). С. 40–52. EDN: YXOINE
9. Кухта Т.Н., Прокопчук Н.Р. Эксплуатационные свойства покрытий из порошковых полиэфирных красок // Труды БГТУ. Химия и технология органических веществ, материалов и изделий. 2015. № 4. С. 139–146. EDN: XBWOFJ
10. Наумова Л.Н., Черкашина Н.И. Изменение электрокинетического потенциала волокон гидросиликата магния при обработке хлоридом аммония // Коллоидный журнал. 2018. Т. 80. № 5. С. 551–555. DOI: 10.1134/S0023291218050117. EDN: XWMXTV
11. Наумова Л.Н. Структурно-морфологические изменения характеристик хризотила под действием модифицирующих факторов // Казанская наука. 2010. № 10. С. 55–57.
12. Наумова Л.Н. Влияние кислой среды на свойства хризотилцементной пыли // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. № 2. С. 24–26. EDN: NYATFD
13. Коровкин М.В., Ананьева Л.Г. Инфракрасная спектроскопия карбонатных минералов. Томск : Изд-во ТПУ, 2016. 96 с.
14. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений / под ред. Ю.А. Пентина ; пер. с англ. Л.В. Христенко. Москва : Мир, 1991. 536 с.
15. Дехант И. Инфракрасная спектроскопия полимеров : пер. с нем. / под ред. Э.Ф. Олейника. Москва : Химия, 1976. 472 с.

## REFERENCES

1. Fedyaev V.L., Galimov E.R., Belyaev A.V., et al. Multifactorial Parameterisation of Adhesive Strength of Polymer Powder Coatings. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2023; 79 (3): 63–69. EDN: OXGZLY (In Russian)
2. Nesterova A.G., Kirpal' Yu.G. Modern Production of Powder Coatings. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*. 2022; (4): 44–52. DOI:10.53884/27132854\_2022\_4\_44 (In Russian)
3. Bondar' M.A., Latypov O.R., Bugai D.E. Development of Intelligent Coating Composition for Corrosion Protection of Oil Refining Equipment. *Inzhenernaya fizika*. 2023; (7): 3–6. DOI: 10.25791/infizik.7.2023.1339. EDN: HVGCS (In Russian)
4. Prokopchuk N.R., Shutova A.L., Kazakov P.P. Chemistry and Physics of Film-Forming Substances. Minsk: BG TU, 2014. 365 p. ISBN: 978-985-530-310-8. (In Russian)
5. Osovskaya I.I., Zvereva V.A. Powder Polyester Paint for Polymer Coatings. *Vestnik TvGU. Ser.: Khimiya*. 2018; (2): 111–117. (In Russian)

6. Guseva E.A., Konstantinova M.V. Powder Polymer Coatings as an Alternative Method of Protecting Metals from Corrosion. *Vestnik IrGTU*. 2015; 10 (105): 71–76. (In Russian)
7. Yakovlev A.D. Relevant Issues in Powder Coating Technology and Coatings. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*. 2002; (4): 20–25. (In Russian)
8. Kuhta T.N., Prokopchuk N.R. Film Formers for Powder Paints and Their Hardeners. *Trudy BGTU. Ser. 2: Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologiya, geoekologiya*. 2018; 1 (205): 40–52. EDN: YXOIHE (In Russian)
9. Kuhta T.N., Prokopchuk N.R. Performance Properties of Powder Polyester Paint Coatings. *Trudy BGTU. Khimiya i tekhnologiya organicheskikh veshchestv, materialov i izdelij*. 2015; (4): 139–146. (In Russian)
10. Naumova L.N., Cherkashina N.I. Variations in the Electrokinetic Potential of Magnesium Hydro-silicate Fibers upon Treatment with Ammonium Chloride. *Colloid Journal*. 2018; 80 (5): 522–526.
11. Naumova L.N. Changes in Chrysotile Structure and Morphology due to Modifying Factors. *Kazanskaya nauka*. 2010; (10): 55–57. (In Russian)
12. Naumova L.N. Acidic Environment Effect on Properties of Chrysotile Cement Dust. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2011; (2): 24–26. (In Russian)
13. Korovkin M.V., Anan'eva L.G. Infrared Spectroscopy of Carbonate Minerals. Tomsk: TPU, 2016. 96 p. (In Russian)
14. Nakamoto K. IR and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds. Yu.A. Pentin, Ed., Moscow: Mir, 1991. 536 p. (Russian translation)
15. Dechant J., et al. Ultrarotspektroskopische Untersuchungen an Polymeren. E.F. Oleinik, Ed., Moscow: Khimiya, 1976. 472 p. (Russian translation)

#### Сведения об авторе

Наумова Людмила Николаевна, канд. техн. наук, доцент, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, naumova\_ln@mail.ru

#### Author Details

Lyudmila N. Naumova, PhD, A/Professor, Belgorod Shukhov State Technological University, 46, Kostyukov Str., 308012, Belgorod, Russia, naumova\_ln@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.07.2025  
Одобрена после рецензирования 05.08.2025  
Принята к публикации 09.10.2025

Submitted for publication 15.07.2025  
Approved after review 05.08.2025  
Accepted for publication 09.10.2025