



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 678.09

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.024

 EDN: HEQMPW

ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОТВЕРЖДЕНИЯ ЭПОКСИВИНИЛЭФИРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ

Будникова Яна Николаевна ¹, Проценко Александр Евгеньевич ²,
Проценко Александра Николаевна ³

^{1, 2, 3} Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия

¹ yanabydnikova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-6324-0170>

² protsenko.ae@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5238-6388>

³ protsenko.chem@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0235-2021>

Аннотация. Данная работа была направлена на исследование каталитических систем, состоящих из трех компонентов (смола, инициатора и катализатора), которые бы обеспечивали достаточное время для полной пропитки армирующего наполнителя без добавления в систему дополнительных соединений (ингибиторов). В ходе работы были исследованы каталитические системы отверждения полимерного связующего на основе эпоксивинилэфирной смолы марки Derakene Momentum 411-350 и инициатора полимеризации метилэтилкетонпероксида марки Butanox M50. В качестве катализаторов использовались новые комплексы на основе солей кобальта и меди с азотосодержащими гетероциклическими соединениями. После смешения компонентов связующего отслеживалось время желатинизации и время отверждения. На основе результатов дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрии была изучена динамика процессов отверждения и деструкции образцов полимерных связующих. Для подтверждения каталитического действия выбранных комплексов были рассчитаны значения энергии активации для некоторых образцов и образца без добавления катализаторов. Отвержденные образцы исследовались на твердость по методу Шора.

Ключевые слова: каталитические системы отверждения, полимерное связующее, эпоксивинилэфирная смола.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01137.

Для цитирования: Будникова Я. Н., Проценко А. Е., Проценко А. Н. Исследование новых каталитических систем отверждения эпоксивинилэфирных связующих // Ползуновский вестник. 2024. № 2, С. 186–192. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.024. EDN: <https://elibrary.ru/HEQMPW>.

Original article

RESEARCH OF NEW CATALYTIC SYSTEMS FOR CURING PROCESS OF EPOXY VINYL ESTER BINDERS

Yana N. Budnikova ¹, Alexander E. Protsenko ², Alexandra N. Protsenko ³

^{1, 2, 3} Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

¹ yanabydnikova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-6324-0170>

² protsenko.ae@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5238-6388>

³ protsenko.chem@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0235-2021>

Abstract. This work was aimed at the study of catalytic systems consisting of three components (resin, initiator and catalyst), which would provide sufficient time for complete impregnation of the reinforcing filler without adding additional compounds (inhibitors) to the system. In the course of the work, catalytic systems for curing a polymer binder based on epoxy vinyl ester resin of the Derakene Momentum 411-350 and the of methyl ethyl ketone peroxide (Butanox M50) as initiator of polymerization

© Будникова Я. Н., Проценко А. Е., Проценко А. Н., 2024

were investigated. New complexes based on cobalt and copper salts with nitrogen-containing heterocyclic compounds were used as catalysts. Gelation time and curing time were monitored after mixing the binder components. Based on the results of differential scanning calorimetry and thermogravimetry, the dynamics of the curing and destruction processes of polymer binder samples were studied. To confirm the catalytic action of the selected complexes, activation energy values were calculated for some samples and a sample without the addition of catalysts. The cured samples were examined for hardness by the Shore method.

Keywords: catalytic curing systems, polymer binder, epoxy vinyl ether resin.

Acknowledgements: The study was financially supported by the Russian Science Foundation within the framework of the scientific project No. 23-79-01137.

For citation: Budnikova, Y.N., Protsenko, A.E. & Protsenko, A.N. (2024). Research of new catalytic systems for curing process of epoxy vinyl ester binders. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 186-192. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.02.024. EDN: <https://HEQMPW>.

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы благодаря своим уникальным свойствам широко применяются во многих сферах производства. Примером использования ПКМ является производство крупногабаритных изделий, таких как корпуса и надстройки кораблей [1–5]. Основной проблематикой производства данных изделий является то, что продолжительности жизни связующего может быть недостаточной для полной пропитки сухого армирующего наполнителя [6]. Отверждение связующего до завершения пропитки приводит к образованию дефектов в структуре композиционного материала. Внутренние напряжения, вызванные неоднородностью структуры, снижают устойчивость изделий к механическим воздействиям [7]. Разработка эффективных методов отверждения полимерных связующих становится важным аспектом для улучшения прочностных характеристик изделий из ПКМ. Основные подходы к решению данной проблемы включают в себя модификацию химического состава связующего, которая осуществляется или посредством варьирования соотношения компонентов, или путем введения в систему дополнительных соединений [8].

Радикальный механизм является одним из способов протекания реакции отверждения полимерных связующих за счет распада инициатора на свободные радикалы. С целью продления жизни связующего в такие системы вводят ингибиторы, которые замедляют процесс отверждения [9]. В качестве ингибиторов используют хиноны, которые блокируют свободные радикалы, образованные вследствие распада пероксидного инициатора, и вторичные радикалы, полученные передачей реакционного центра на мономер [9]. Также замедлить процесс отверждения возможно введением соединений, способных образовывать прочные комплексы или хелаты с ионами металлов, снижая их реакционную способность в

образовании свободных радикалов из перекиси [10, 11].

К недостаткам использования ингибиторов следует отнести, что они вводятся в систему в очень небольшом количестве [9]. Ошибка при внесении может привести к значительному увеличению процесса отверждения либо к застыванию связующего до завершения пропитки.

Данная работа направлена на исследование новых каталитических систем отверждения эпоксивинилэфирных связующих с целью упрощения их рецептуры и обеспечению достаточного времени для полной пропитки армирующего наполнителя без добавления в систему дополнительных соединений ингибиторов.

МЕТОДЫ

Работа проводилась с трехкомпонентным связующим на основе смолы, инициатора и катализатора. Компоненты связующего брались в следующем соотношении, мас. ч.: смола – 100, инициатор – 2, катализатор – 0,2.

В работе использовались: эпоксивинилэфирная смола марки Derakane Momentum 411-350, метилэтилкетонпероксид (МЭКП) марки Butanox M50. В качестве образца сравнения использовался образец с добавлением однопроцентного раствора октоата кобальта $\text{Co}(\text{Oct})_2$ марки NL-49P (Akzo Nobel). В качестве исследуемых катализаторов были выбраны комплексы на основе солей кобальта и меди с азотосодержащими гетероциклическими соединениями (таблица 1).

Термический анализ связующих и полимерных образцов осуществлялось методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ) на приборе синхронногетермического анализа Netzsch STA 409 PC Luxx. Исследования проводились в воздушной атмосфере в динамическом режиме нагрева со скоростью 10 °С/мин до температуры 900 °С. Скорость потока газа

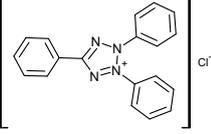
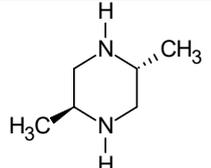
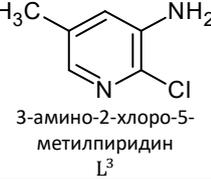
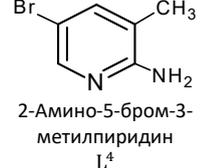
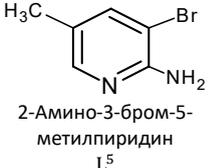
в весовую камеру составляла 30 мл/мин, а в испытательную – 50 мл/мин.

Энергия активации реакции отверждения связующего определялась в соответствии с методикой Киссенджера [12]. Для этого исследовался первый пик в интервале температур 67–127 °С, соответствующий процессу отверждения. Для каждого исследуемого образца проводилось несколько ДСК-измерений с различными скоростями нагрева: 5, 10 и 20 °С/мин. На основе результатов ДСК анализа производились расчеты, необходимые для построения графика зависимости $\ln(\beta/T_m^2)$ от $1000/T_m$. По графику определялся тангенс угла наклона прямой, с помощью которого рассчитывалась энергия активации.

Измерение твёрдости проводилось по методу Шора (ГОСТ 24621-2015) с помощью цифрового измерителя Shore D Durometer.

Таблица 1 – Катализаторы отверждения

Table 1 - Curing catalysts

№	Ссылка	Катализатор	АнионL
1	[13]	$(L^1)_2[CoCl_4]$	 2,3,5-трифенилтетразолий хлористый L^1
2	[13]	$(L^1)_2[CuCl_4]$	
3	[13]	$(H_2L^2)[CoCl_4]$	 транс-2,5-диметилпиперазин L^2
4	[13]	$(H_2L^2)[CuCl_4]$	
5	[13]	$(H_2L^2)[CuBr_4]$	
6	[14]	$(HL^3)_2[CuCl_4] \cdot H_2O$	 3-амино-2-хлоро-5-метилпиридин L^3
7	[15]	$(HL^4)_2[CoCl_4]$	 2-Амино-5-бром-3-метилпиридин L^4
8	[15]	$(HL^4)_2[Cu_2Cl_8]$	
9	[15]	$(HL^4)_2[CuBr_4]$	
10	[16]	$(HL^5)_2[CoCl_4] \cdot 2H_2O$	 2-Амино-3-бром-5-метилпиридин L^5
11	[16]	$(HL^5)_2[CuCl_4] \cdot 2H_2O$	
12	[16]	$(HL^5)_2[CuBr_4] \cdot 2H_2O$	

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Соединения, представленные в таблице 1, являются твердыми веществами плохо растворимыми в связующем. С целью создания каталитической системы был произведен подбор растворителей, обеспечивающих устойчивые растворы соединений и совместимые со связующим. Возможность создания каталитических систем отверждения на основе соединений исследуемого ряда также подтверждается результатами работы [17]. На данном этапе исследований лучше всего себя зарекомендовали: тетрагидрофуран (ТГФ) и диметилсульфоксид (ДМСО), с которыми были получены растворы с концентрацией 5 и 8 %.

Таблица 2 – Растворы катализаторов

Table 2 - Solutions of catalysts

Катализатор	Растворитель	Процент катализатора в растворителе, %
$(L^1)_2[CoCl_4]$	$(CH_3)_2OS$	5
$(L^1)_2[CuCl_4]$		
$(H_2L^2)[CoCl_4]$	$(CH_3)_2OS$	8
$(H_2L^2)[CuCl_4]$		
$(H_2L^2)[CuBr_4]$	$(CH_3)_2OS + C_4H_8O$	8
$(HL^3)_2[CuCl_4] \cdot H_2O$	$(CH_3)_2OS$	5
$(HL^4)_2[CoCl_4]$		
$(HL^4)_2[Cu_2Cl_8]$		
$(HL^4)_2[CuBr_4]$		
$(HL^5)_2[CoCl_4] \cdot 2H_2O$		
$(HL^5)_2[CuCl_4] \cdot 2H_2O$		
$(HL^5)_2[CuBr_4] \cdot 2H_2O$		

После смешения компонентов связующего отслеживалось время желатинизации и время отверждения.

Время желатинизации и время отверждения образца сравнения представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Время желатинизации и отверждения образца сравнения

Table 3 - Gelation and curing time of the comparison sample

Катализатор	Время желатинизации образца, ч:мин	Время отверждения образца, ч:мин
$Co(Okt)_2$	0:47	0:55

Связующее на основе смолы и отвердителя (соотношение мас. ч.: 100/2 соответственно) без использования катализатора не отверждается при нормальных условиях. Однако было обнаружено, что образцы без катализатора, но с добавлением растворителей

ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОТВЕРЖДЕНИЯ ЭПОКСИВИНИЛЭФИРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ

диметилсульфоксида и / или тетрагидрофурана способны отверждаться в течение 2 дней, что может свидетельствовать о каталитическом действии ДМСО и ТГФ.

В таблице 4 представлены результаты отверждения исследуемых образцов связующих с исследуемыми комплексами.

Из полученных данных видно, что исследуемые комплексы влияют на продолжительность процесса отверждения связующего. Образец 2 имеет наиболее длительное время желатинизации, которое составило 4 часа 34 минуты. Полное отверждение зафиксировано спустя 8 часов 35 минут, в то время как образец 3 по времени желатинизации и отверждения эквивалентно составу, отверждаемому в присутствии $\text{Co}(\text{Oct})_2$.

Таблица 4 – Время желатинизации и отверждения исследуемых образцов

Table 4 - Gelation and curing time of the studied samples

Образец	Время желатинизации образца, ч:мин	Время отверждения образца, ч:мин
1	1:53	2:11
2	4:34	8:35
3	0:51	1:01
4	4:17	4:44
5	2:12	2:43
6	3:13	5:06
7	1:58	2:11
8	3:00	4:28
9	3:17	5:32
10	1:42	1:54
11	4:26	6:05
12	4:30	7:50

На основании полученных данных можно сделать заключение, что все исследуемые соединения являются катализаторами. При этом реактивность большинства данных соединений ниже, чем у $\text{Co}(\text{Oct})_2$.

В ходе наблюдения за отверждением образцов также фиксировались особенности протекания процессов. Было обнаружено, что все образцы на основе солей кобальта сильно нагреваются при отверждении, что свидетельствует о протекании экзотермических процессов. Для таких образцов характерен быстрый рост вязкости. После нагрева вследствие экзотермического эффекта образцы полностью отверждаются.

Термический анализ позволил определить температурные диапазоны, термостабильность образцов и энтальпию пика отверждения. Основные термические характеристики исследуемых образцов представлены в таблице 5.

Наибольшую температуру деструкции имеет образец без добавления катализатора, наименьшую – образец 1. Разница между этими значениями составляет приблизительно 18 К. Это может говорить о том, что добавление катализатора в систему лишь незначительно снижает температуру деструкции образца.

Для исследуемых образцов была зафиксирована потеря массы на стадии отверждения (таблица 6), которая возникает вследствие процесса удаления легколетучих веществ, содержащихся в образце связующего. Основная потеря массы, которая происходит на данной стадии, является результатом процесса удаления стирола и растворителей.

Таблица 5 – Данные термического анализа

Table 5 - Thermal analysis data

Образец	Температура пика, К		Энтальпия пика отверждения Дж/г
	отверждения	деструкции	
сравнения	364,8	660,35	129,1
без катализатора	394,5	675,6	153
1	375,1	657,75	141
2	385,7	659,95	151,1
3	367,6	664,45	148,3
4	384,2	668,6	159,3
5	385,4	673,3	162,1
6	386,6	666,25	170
7	372,6	663,75	148,8
8	387	658,1	165,6
9	388,4	665,35	167,9
10	374,4	668,5	157
11	385,3	666,1	166
12	389,7	664,15	167,4

Таблица 6 – Потеря массы образцов на стадии отверждения

Table 6 - Mass loss of samples at the curing stage

Образец	Потеря веса, %
Сравнения	2,26
Без катализатора	3,72
1	3,09
2	5,38
3	1,62
4	2,71
5	3,71
6	5,02
7	3,78
8	3,47
9	4,18
10	3,42
11	3,54
12	3,75

С целью подтверждения каталитического действия выбранных комплексов были рассчитаны значения энергии активации для образцов

с добавлением катализаторов $(L^1)_2[CoCl_4]$, $(L^1)_2[CuCl_4]$, $(H_2L^2)[CoCl_4]$, $(H_2L^2)[CuCl_4]$, $(H_2L^2)[CuBr_4]$. Полученные результаты для исследуемых образцов сравнивались с расчётными значениями энергии активации образца без добавления катализатора и образца сравнения.

Образец 2 имеет наибольшее значение энергии активации из всех исследуемых образцов, что свидетельствует о наличии высокого энергетического барьера, препятствующего процессу отверждения. Образцы с высокими значениями активации менее активны, следовательно, имеют более продолжительное время жизни. Это подтверждают результаты измерения времени желатинизации и времени отверждения образцов (таблица 4).

Таблица 7 – Сводная таблица полученных данных по энергии активации

Table 7 - Summary table of the received data on activation energy

Образец	Энергия активации E_a , кДж/моль
Без катализатора	85,80
Сравнения	36,32
1	36,24
2	44,24
3	38,82
4	41,35
5	38,40

Основываясь на полученных результатах, можно предположить, что связующее на основе смолы и инициатора (соотношение мас. ч.: 100/2 соответственно) без использования катализатора не отверждается при нормальных условиях, поскольку данная система имеет высокое значение энергии активации.

Твёрдость измерялась у всех полученных образцов, в том числе и у пластиков, отвержденных без катализатора, но с добавлением растворителей ДМСО и / или ТГФ. Измерения выполнялись до и после выдержки образцов в печи при температуре 120 °С в течение 2 часов.

Результаты измерений твердости различных образцов приведены в таблицах 8–10.

Измерить твердость образцов без катализаторов до выдержки в печи не представлялось возможным, так как они имели остаточный липкий слой вследствие неполного отверждения.

Из полученных данных видно, что для всех исследуемых образцов характерен прирост твердости после термообработки. Для образцов на основе солей кобальта значения твердости до и после выдержки отличаются незначительно. Можно предположить, что данные образцы достигают более высоких стадий сшивки молекулярной структуры, так как самопроизвольно нагреваются в процессе отверждения. Поэтому термообработка таких

190

образцов в меньшей степени влияет на изменение значений твердости.

Образцы с ДМСО, ТГФ и их комбинацией имеют значения твердости после выдержки относительно близкие друг к другу: ДМСО – 76,5, ТГФ – 77,4, ДМСО + ТГФ – 77,1. При этом данные значения существенно ниже твердости образца сравнения. Образцы 5 и 10 после выдержки демонстрируют наибольшие значения среди всех представленных образцов – 84,9 и 83,3 соответственно. Образцы 2 и 12 имеют наименьшие значения твердости после выдержки – 74,8 и 70,8 соответственно. С целью дальнейшего применения для производства изделий методом вакуумной инфузии наибольший интерес представляют образцы 5 и 10.

Таблица 8 – Твёрдость образца сравнения

Table 8 - Hardness of the comparison sample

Катализатор	Показатель твёрдости	
	До выдержки	После выдержки
Co(Oct) ₂	81,7	81,8

Таблица 9 – Твёрдость исследуемых образцов

Table 9 - Hardness of the test samples

Образец	Показатель твёрдости	
	До выдержки	После выдержки
1	83,7	83,8
2	67,7	74,8
3	79,4	81,1
4	79,9	82,8
5	81,9	84,9
6	72,2	77,3
7	75,4	76,3
8	76,1	76,7
9	76,1	81
10	83,2	83,3
11	74,3	82,3
12	62,1	70,8

Таблица 10 – Твёрдость образцов без катализаторов

Table 10 - Hardness of the samples without catalysts

Растворитель	Показатель твёрдости	
	До выдержки	После выдержки
ДМСО	-	76,5
ТГФ	-	77,4
ДМСО + ТГФ (1:1)	-	77,1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, были исследованы новые каталитические системы отверждения эпоксивинилэфирного связующего на примере Derakene Momentum 411-350. В ходе работы были изготовлены каталитические системы, состоящие из трех компонентов: эпоксивинилэфирной смолы, пероксидного

ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОТВЕРЖДЕНИЯ ЭПОКСИВИНИЛЭФИРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ

инициатора и катализатора. В качестве катализаторов использовались новые комплексы на основе солей кобальта и меди с азотосодержащими гетероциклическими соединениями. Система отверждения 3 обладает параметрами отверждения идентичными образцу, полученному в присутствии $\text{Co}(\text{Okt})_2$. Остальные образцы катализаторов также способствовали отверждению при нормальных условиях, но за больший промежуток времени. У полученных систем исследованы твердости. Образцы, содержащие в качестве катализаторов растворы комплексов 5 и 10, представляют наибольший интерес. Время желатинизации находится в районе двух часов, что позволит обеспечить пропитку изделий крупных размеров и сложной конфигурации. Также образцы полученных связующих обладают твердостью эквивалентной стандартному образцу. Также установлено, что максимальная твердость образца 10 достигается без проведения операции постотверждения. Данный факт, по-видимому, может быть связан с большим экзотермическим эффектом реакции отверждения.

Для ряда систем отверждения были установлены значения энергии активации. Результаты подтвердили гипотезу о том, что исследуемые комплексные соединения являются катализаторами отверждения эпоксивинилэфирных связующих. Энергия активации таких систем ниже, чем у образца без катализатора. Однако эти значения выше, чем для системы, отверждаемой в присутствии раствора $\text{Co}(\text{Okt})_2$, что также подтверждает меньшую реакционную способность исследуемых соединений.

Таким образом, растворы катализаторов отверждения эпоксивинилэфирных связующих на основе солей кобальта и меди с азотосодержащими гетероциклическими соединениями могут иметь потенциальное применение в композитной с целью получения сложных крупногабаритных конструкций методом вакуумной инфузии, требующей длительной пропитки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Birman V., Kardomateas G.A. Review of Current Trends in Research and Applications of Sandwich Structures. *Compos B Eng* 2018, 142, 221–240, doi : 10.1016/j.compositesb.2018.01.027.
2. Булкин В.А., Федонюк Н.Н., Шляхтенко А.В. Применение перспективных композиционных материалов в надводном судостроении. *Морской вестник* 2013, 1, 7–8.
3. Блинов А.В., Булкин В.А., Ефимова О.Г., Федонюк Н.Н. Применение в судостроении трехслойных конструкций с гофрированным средним слоем. *Морской вестник* 2012, 2, 79–82.
4. Rubino F., Nisticò A., Tucci F., Carlone P. Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering* 2020, Vol. 8, Page 26 2020, 8, 26, doi : 10.3390/JMSE8010026.
5. Kappenthuler S., Seeger S. Assessing the Long-Term Potential of Fiber Reinforced Polymer Composites for Sustainable Marine Construction. *J Ocean Eng Mar Energy* 2021, 7, 129–144, doi : 10.1007/S40722-021-00187-X/TABLES/9.
6. Хуанг Ч.-П. Моделирование процессов вакуумной инфузии в производстве крупногабаритных композитных конструкций. *Известия Южного федерального университета. Технические науки* 2021, 172–185, doi :10.18522/2311-3103-2021-3-172-185.
7. Колпачков Е.Д., Петрова А.П., Курносков А.О., Соколов И.И. Методы формования изделий авиационного назначения из ПКМ (Обзор). *Труды ВИАМ* 2019, 83, 22–36, doi : 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36.
8. Ткачук А.И., Терехов И.В., Гуревич Я.М., Григорьева К.Н. Исследования влияния природы модифицирующих добавок на реологические и термомеханические характеристики фотополимерной композиции на основе эпоксивинилэфирной смолы. *Авиационные материалы и технологии* 2019, 56, 31–40, doi :10.18577/2071-9140-2019-0-3-31-40.
9. Li L., Lee L.J. Effects of Inhibitors and Retarders on Low Temperature Free Radical Crosslinking Polymerization Between Styrene and Vinyl Ester Resin; 2001; Vol. 41.
10. Protsenko A.E., Telesh V.V., Potkalov A.K. The Use of Inhibited Layers to Improve Mechanical Properties of Thermoset Composite Materials. *IOP ConfSer Mater Sci Eng* 2020, 734, 012023, doi : 10.1088/1757-899X/734/1/012023.
11. Li L., Lee L.J. Effects of a Chelating Agent - 2,4-Pentanedione on Low Temperature Composite Molding of Vinyl Ester and Unsaturated Polyester Resins. *Polym Compos* 2002, 23, 971–990, doi : 10.1002/PC.10494.
12. Slopicka K., Bartocci P., Fantozzi F. Thermogravimetric Analysis and Kinetic Study of Poplar Wood Pyrolysis. *Appl Energy* 2012, 97, 491–497, doi : 10.1016/J.APENERGY.2011.12.056.
13. Protsenko A.N., Garfova V.V., Shakirova O.G. Structure and Properties of Copper(II) and Cobalt(II) Halide Complexes with n-Heterocycles of Composition $(\text{H})_n[\text{MHal}_4]$. *Lecture Notes in Networks and Systems* 2021, 200, 265–275, doi:10.1007/978-3-030-69421-0_28.
14. Shakirova O., Protsenko A., Protsenko A., Kuratieva N., Fowles S., Turnbull M.M. Syntheses, Structures and Properties of Copper(II) and Cobalt(II) Complexes with 5(3)-Amino-2-Chloro-3(5)-Methylpyridine Isomer Cations. *Inorganica Chim Acta* 2020, 500, 119246, doi : 10.1016/J.ICA.2019.119246.
15. Проценко А.Н., Шуляк Д.А., Проценко А.Е., Шакирова О.Г. Исследование новых галогенидных комплексов меди(II) и кобальта(II) с 2-амино-5-бром-3-метилпиридином: синтез, структура, свойства. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 2023. 155, 62–70, doi :10.26730/1999-4125-2023-1-62-70.
16. Проценко А.Н., Шуляк Д.А., Проценко А.Е., Шакирова О.Г. Синтез, структура и спектральные характеристики галогенидных комплексов меди(II) и кобальта(II) с 2-амино-3-бром-5-метилпиридином. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 2023, 155, 71–78, doi :10.26730/1999-4125-2023-1-71-78.
17. Protsenko A.E., Protsenko A.N., Shakiro-

va O.G., Zhelevskaya D.D. Coordination Compound (2,3,5-Triphenyltetrazolium)₂[CuBr₄] as Catalyst for the Curing Process of Epoxy Vinyl Ester Binders. *Int J MolSci* 2023, 24, doi : 10.3390/ijms241411808.

Информация об авторах

Я. Н. Будникова – студент-магистр Комсомольского-на-Амуре государственного университета.

А. Е. Проценко – кандидат технических наук, доцент кафедры «ХиХТ» Комсомольского-на-Амуре государственного университета.

А. Н. Проценко – кандидат химических наук, доцент кафедры «ХиХТ» Комсомольского-на-Амуре государственного университета.

REFERENCES

1. Birman, V.; Kardomateas, G.A. Review of Current Trends in Research and Applications of Sandwich Structures. *Compos B Eng* 2018, 142, 221-240, doi:10.1016/j.compositesb.2018.01.027.
2. Bulkin, V.A.; Fedonyuk, N.N.; Shlyakhtenko, A.V. Application of Advanced Composite Materials in Surface Shipbuilding. *Marine Bulletin* 2013, 1, 7-8.
3. Blinov, A.V.; Bulkin, V.A.; Efimova, O.G.; Fedonyuk, N.N. Application of Three-Layer Structures with A Corrugated Middle Layer in Shipbuilding. *Marine Bulletin* 2012, 2, 79-82.
4. Rubino, F.; Nisticò, A.; Tucci, F.; Carlone, P. Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering* 2020, Vol. 8, Page 26 2020, 8, 26, doi : 10.3390/JMSE8010026.
5. Kappenthuler, S.; Seeger, S. Assessing the Long-Term Potential of Fiber Reinforced Polymer Composites for Sustainable Marine Construction. *J Ocean Eng Mar Energy* 2021, 7, 129-144, doi:10.1007/S40722-021-00187-X/TABLES/9.
6. Jyun-Ping Huang Modeling of the vacuum infusion processes in the manufacturing of the large polymeric composite. *Southern Federal University. Technical sciences* 2021, 172-185, doi : 10.18522/2311-3103-2021-3-172-185.
7. Kolpachkov, E.D.; Petrova, A.P.; Kurnosov, A.O.; Sokolov, I.I. Methods of Molding Aviation Products from Pcm (Review). *Works of VIAM* 2019, 83, 22-36, doi : 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36.
8. Tkachuk, A.I.; Terekhov, I.V.; Gurevich, Ya.M.; Grigoreva, K.N. Research of the Influence of the Modifying Additives Nature on the Rheological and Thermomechanical Properties of a Photopolymer Composition Based on Epoxy Vinyl Ester Resin. *Aviation materials and technologies* 2019, 56, 31-40, doi : 10.18577/2071-9140-2019-0-3-31-40.
9. Li, L.; Lee, L.J. Effects of Inhibitors and Retarders on Low Temperature Free Radical

Crosslinking Polymerization Between Styrene and Vinyl Ester Resin; 2001; Vol. 41.

10. Protsenko, A.E.; Telesh, V.V.; Potkalov, A.K. The Use of Inhibited Layers to Improve Mechanical Properties of Thermoset Composite Materials. *IOP ConfSer Mater Sci Eng* 2020, 734, 012023, doi : 10.1088/1757-899X/734/1/012023.

11. Li, L.; Lee, L.J. Effects of a Chelating Agent - 2,4-Pentanedione on Low Temperature Composite Molding of Vinyl Ester and Unsaturated Polyester Resins. *Polym Compos* 2002, 23, 971-990, doi : 10.1002/PC.10494.

12. Slopiecka, K.; Bartocci, P.; Fantozzi, F. Thermogravimetric Analysis and Kinetic Study of Poplar Wood Pyrolysis. *Appl Energy* 2012, 97, 491-497, doi : 10.1016/J.APENERGY.2011.12.056.

13. Protsenko, A.N.; Garifova, V.V.; Shakirova, O.G. Structure and Properties of Copper(II) and Cobalt(II) Halide Complexes with n-Heterocycles of Composition (H)_n[MHal₄]. *Lecture Notes in Networks and Systems* 2021, 200, 265-275, doi : 10.1007/978-3-030-69421-0_28.

14. Shakirova, O.; Protsenko, A.; Protsenko, A.; Kuratieva, N.; Fowles, S.; Turnbull, M.M. Syntheses, Structures and Properties of Copper(II) and Cobalt(II) Complexes with 5(3)-Amino-2-Chloro-3(5)-Methylpyridine Isomer Cations. *Inorganica Chim Acta* 2020, 500, 119246, doi : 10.1016/J.ICA.2019.119246.

15. Protsenko, A.N.; Shulyak, D.A.; Protsenko, A.E.; Shakirova, O.G. Study of New Halide's Copper(II) And Cobalt(II) Complex With 2-Amino-5-Bromo-3-Methyl Pyridine: Synthesis, Structure, Properties. *Bulletin of Kuzbass State Technical University* 2023, 155, 62-70, doi : 10.26730/1999-4125-2023-1-62-70.

16. Protsenko, A.N.; Shulyak, D.A.; Protsenko, A.E.; Shakirova, O.G. Synthesis, Structure, and Spectral Characteristics of Copper(II) and Cobalt(II) Halide Complexes with 2-Amino-3-Bromo-5-Methyl Pyridine. *Bulletin of Kuzbass State Technical University* 2023, 155, 71-78, doi : 10.26730/1999-4125-2023-1-71-78.

17. Protsenko, A.E.; Protsenko, A.N.; Shakirova, O.G.; Zhelevskaya, D.D. Coordination Compound (2,3,5-Triphenyltetrazolium)₂[CuBr₄] as Catalyst for the Curing Process of Epoxy Vinyl Ester Binders. *Int J Mol Sci* 2023, 24, doi : 10.3390/ijms241411808.

Information about the authors

A.E. Protsenko - Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department of "Chemistry and Chemical Technology" Komsomolsk-na-Amur State University.

A.N. Protsenko - Candidate of Chemical Sciences Associate Professor of the Department of " Chemistry and Chemical Technology " Komsomolsk-na-Amur State University.

Y.N. Budnikova - master student of Komsomolsk-na-Amur State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30 октября 2023; одобрена после рецензирования 29 февраля 2024; принята к публикации 06 мая 2024.

The article was received by the editorial board on 30 Oct 2023; approved after editing on 29 Feb 2024; accepted for publication on 06 May 2024.