



Влияние модификации на долговечность поливинилхлоридных древесно-полимерных композитов

А.Г. Хантимиров¹, А.М. Сулейманов¹, Л.А. Абдрахманова¹,
Р.К. Низамов¹, О.В. Хохряков¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Одной из главных проблем в строительном материаловедении является получение долговечных материалов. Для древесно-полимерных композитов данный вопрос стоит особо остро: использование древесного наполнителя и эксплуатация в суровых климатических условиях негативно сказываются на свойствах. Общеизвестна положительная роль различных модификаторов на физико-механические свойства древеснонаполненных композитов, таких как добавки на углеродной основе и волокнистые наполнители. Однако подобные модифицированные композиты недостаточно изучены с точки зрения долговечности. Цель работы заключается в изучении свойств древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида в условиях искусственного ускоренного старения. Задачами исследования являются: исследование влияния климатических воздействий на прочностные свойства и внешний вид модифицированных древесно-полимерных композитов и прогнозирование срока их службы.

Результаты. В работе представлены результаты ускоренных испытаний на климатические воздействия модифицированных древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида. В качестве модификаторов были использованы углеродные нанодобавки и волокнистые наполнители, ранее показавшие свою эффективность для усиления древеснонаполненных композитов. Наиболее эффективными модификаторами по результатам испытаний являются углеродные добавки (механоактивированные нефтяные коксы и нанотрубки), показавшие снижение потери прочности при изгибе после ускоренного старения на 1,9-4,1%.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что прогнозирование срока службы древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида с повышенными прочностными свойствами позволит расширить область применения изделий на их основе, в том числе и конструкционного назначения.

Ключевые слова: поливинилхлорид, древесно-полимерный композит, базальтовая фибра, асбест, волокнистый модификатор, климатические испытания, испытания на ускоренное старение

Для цитирования: Хантимиров А.Г., Сулейманов А.М., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хохряков О.В. Влияние модификации на долговечность поливинилхлоридных древесно-полимерных композитов // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 26-35, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_26, EDN: CMSMHV

The effect of modification on the durability of polyvinyl chloride wood-polymer composites

A.G. Khantimirov¹, A.M. Sulejmanov¹, L.A. Abdrakhmanova¹, R.K. Nizamov¹,
O.V. Khokhryakov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* One of the main problems in building materials science is the production of durable materials. For wood-polymer composites, this issue is particularly acute: the use of wood filler and operation in harsh climatic conditions negatively affect the properties. The positive effect of various modifiers on the physical and mechanical properties of wood-filled composites, such as carbon-based additives and fibrous fillers, is well known. However, such modified composites have not been sufficiently studied in terms of durability. The purpose of the work is to study the properties of wood-polymer composites based on polyvinyl chloride in conditions of artificial accelerated aging. The objectives of the study are: to study the influence of climatic factors on the strength properties and appearance of modified wood-polymer composites and to predict their service life.

Results. The paper presents the results of accelerated tests for climatic effects of modified wood-polymer composites based on polyvinyl chloride. Carbon nanoadditives and fibrous fillers, which had previously shown their effectiveness for strengthening wood-filled composites, were used as modifiers. The most effective modifiers according to the test results are carbon additives (mechanically activated petroleum cokes and nanotubes), which showed a decrease in bending strength loss after accelerated aging by 1.9-4.1%.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is that forecasting the service life of wood-polymer composites based on polyvinyl chloride with increased strength properties will expand the scope of products based on them, including structural purposes.

Key words: polyvinyl chloride, wood-polymer composite, basalt fiber, asbestos, fiber modifier, climatic tests, accelerated aging tests

For citation: Khantimirov A.G., Sulejmanov A.M., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Khokhryakov O.V. The effect of modification on the durability of polyvinyl chloride wood-polymer composites // News KSUAE, 2023, № 3(65), p. 26-35, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_26, EDN: CMSMHV

1. Введение

Важным показателем всех строительных материалов является их долговечность [1-3], которая выражается в сохранении как физико-механических свойств, так и эстетичного внешнего вида, что для конечного потребителя зачастую становится главным фактором при выборе изделий. Особенно это касается продукции из древесно-полимерных композитов (ДПК), которая в основном используются для наружного применения.

Большая популярность изделий из ДПК в последние годы обуславливается расширением ассортимента предлагаемых изделий [4]. Активно идет внедрение ДПК для использования в конструкционных изделиях, таких как столбы заборов, опоры различных навесов, брусья для частного домостроения (замена деревянным брусьям), погонажные изделия для стропильных систем (балки, обрешетка и т.д.), способные выдержать значительные снеговые и ветровые нагрузки. Усиление ДПК может осуществляться в двух направлениях: изменение рецептуры (выбор оптимального полимерного связующего, модификация связующими агентами и волокнистыми наполнителями) и увеличение момента инерции изделий (усовершенствование геометрии поперечного сечения профилей, дополнение изделий внутренними металлическими вставками).

Многочисленными работами было показано, что наиболее оптимальным полимером для создания ДПК является поливинилхлорид (ПВХ) [5-7]. За счет высоких физико-механических свойств ДПК-ПВХ конструкционные изделия из них в меньшей степени нуждаются в металлических усиливающих вставках, по сравнению с ДПК на основе полипропилена (ПП) и полиэтилена (ПЭ) [8].

В качестве связующих агентов наиболее эффективными в составе ДПК-ПВХ являются углеродные модификаторы, в частности, нанотрубки и технический углерод [9-11]. Также общеизвестно положительное влияние волокнистых наполнителей на прочностные свойства полимерных композитов, в том числе, древеснонаполненных [12-14].

Авторами данной статьи ранее были проведены исследования по модификации ДПК-ПВХ углеродными нанотрубками [15-17] и волокнистыми наполнителями на основе базальтовой фибры [18]. Работа является логическим продолжением исследований ранее полученных ДПК-ПВХ с повышенными прочностными свойствами для прогнозирования их долговечности.

Наиболее уязвимым компонентом в составе ДПК является органический наполнитель, который под действием внешних факторов достаточно быстро теряет свои свойства. Полимерное связующее, обволакивая древесные частицы, способствует их защите. Но невозможно в полной мере оградить наполнитель от пагубного действия окружающей среды, особенно в поверхностных слоях. Изменения в первую очередь связаны с деструкцией лигнина, от чего разрушается скелет древесной структуры и изменяется цвет.

В введенном недавно ГОСТ Р 59555-2021 «Изделия профильные из древесно-полимерного композита. Технические условия» описывается режим испытаний образцов на ускоренное старение. По данной методике были испытаны полимерно-минеральные композиты на основе поливинилхлорида [19], наполненные золами ТЭС в количестве от 40 до 80 м.ч. на 100 м.ч. ПВХ. Потеря прочности на изгиб образцов составила менее 5%, что соответствует сроку службы более 10 лет. При этом потеря цвета составила $\Delta E=3,72-7,06$. Изменение цвета за 24 ч УФ-облучения (условная светостойкость) составила Ц1 ($\Delta E=1,38$). В результате испытаний получились достаточно высокие показатели долговечности изделий. Это связано как с использованием в качестве наполнителя минеральных зол ТЭС, являющиеся достаточно устойчивыми к действию внешних неблагоприятных факторов, так и мягкими условиями испытаний, рассчитанными для композитов с органическими наполнителями.

В работе [6] проводились климатические испытания образцов промышленно выпускаемых ДПК на основе ПВХ. Исследования проводили с помощью световой камеры (везерометра) при облучении с интенсивностью УФ-облучения 65 Вт/м^2 . Один цикл испытаний включал в себя воздействие света в течение 110 ч, выдержку в климатической камере при $-40 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 1,5 ч и при $+60 - 1$ ч. Полученные данные свидетельствуют о высокой устойчивости материала к действию климатических факторов, а именно сохранению стойкости к удару при $+23^\circ\text{C}$ и -20°C и небольшими изменениями координат цветов ($\Delta E=3,13$). Авторы отмечают, что основные изменения во внешнем виде происходят на начальных стадиях и проявляются в виде увеличения на поверхности числа светлых точек (древесного наполнителя), приводящего к незначительному осветлению образцов. Однако полученные по данной методике результаты не дают четкого понимания относительно срока службы, так как нет установленной корреляции с изменением свойств образцов.

Авторами [20] была проведена визуальная оценка изменения геометрии ДПК-профилей на основе ПЭ, ПП и ПВХ. Условия испытаний на светостойкость и атмосферостойкость образцов соответствовали эксплуатации под дождем и солнцем в течение 2,5 лет. Наименьшие изменения в геометрии показали образцы ДПК-ПВХ, для остальных образцов характерна достаточно высокая степень коробления.

Таким образом, проведенный анализ показал отсутствие литературных данных по климатическим испытаниям древеснонаполненных ПВХ-композитов согласно актуальному стандарту с установлением срока службы.

Целью работы является изучение свойств модифицированных ДПК-ПВХ в условиях искусственного ускоренного старения.

Объектом исследований являются модифицированные ДПК на основе ПВХ. Предмет исследований – влияние модификаторов на физико-механические свойства и внешний вид ДПК-ПВХ после проведения климатических испытаний.

Задачами исследования являются:

- изучение влияния климатических воздействий на прочностные свойства модифицированных ДПК на основе ПВХ и прогнозирование срока их службы;
- оценка влияния модификаторов на изменение внешнего вида образцов ДПК-ПВХ после ускоренного старения.

2. Материалы и методы

В исследованиях использован суспензионный ПВХ марки С-7059-М (ГОСТ 14332-78); модификаторы полимерной матрицы: комплексный стабилизатор – двухосновный стеарат свинца АКСТАВ Рb BLS 51 (CAS 56189-09-4), стабилизатор-смазка – стеарат кальция (ТУ 6-09-4104-87), акриловый модификатор ударной прочности марки KaneAce FM50; наполнитель – древесная мука из хвойных пород марки M180 (ГОСТ 16361-87).

В качестве модификаторов применялись:

- 2 вида механоактивированных отходов производства нефтяных коксов (Павлодарский НХЗ, г. Павлодар, Казахстан). Представляют собой мелкодисперсный порошок черного цвета, имеют разные степени окисления и обозначены как кокс 1 (1,34 мэкв/г) и кокс 2 (0,57 мэкв/г).

- составной стабилизирующий процессинговый комплекс CM-1230 (Arkema, Dipol Innovation, Франция). Черные гранулы размером 1-2 мм, имеющие следующий состав: МУНТ Graphistrength C100 - 30 %, монтановые воска - 50 %, антиоксиданты Ирганокс 1010 - 10 % и Ирграфос 168 - 10 %.

- базальтовая фибра с длиной волокон 6,4 и 12,7 мм и диаметром 13 и 17 мкм соответственно (ООО «Каменный век», г. Дубна, Россия). Обработаны силановым замасливателем KB13.

- асбест хризотилковый со средней длиной 2 мм из шнура ШАОН 5 (ГОСТ 1779-83). Средний диаметр агрегатов волокон распущенного шнура составляет 10 мкм.

- сухие многослойные углеродные нанотрубки Таунит $M_{\text{функ}}$, функционализированные алкильными группами (ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов, Россия). Средний внешний диаметр 8-15 нм, длина более 2 мкм, степень функционализации 11,5 % (по массе).

Состав базовой композиций представлен в табл. 1. Испытания проводились на образцах с оптимальными концентрациями модификаторов, которые приведены в табл. 2.

Таблица 1

Состав базовой композиций

| Компонент | Содержание, м.ч. |
|---|------------------|
| 1 | 2 |
| ПВХ С-7059-М | 100 |
| Модификатор ударной прочности FM-50 | 7 |
| Стабилизатор-смазка стеарат кальция | 3 |
| Термостабилизатор двухосновный стеарат свинца | 5 |
| Древесная мука M180 (ДМ) | 50 |

Таблица 2

Модификаторы и их содержание в композиции

| Компонент | Содержание (% от массы ДМ, м.ч. на 100 м.ч. ПВХ) |
|--------------------------|--|
| 1 | 2 |
| Кокс 1 | 0,1 % |
| Кокс 2 | 5% |
| Таунит $M_{\text{функ}}$ | 0,35% |

Окончание таблицы 2

| 1 | 2 |
|---------------|----------|
| СМ-1230 | 2,6 м.ч. |
| Фибра 6,4 мм | 10 м.ч. |
| Фибра 12,7 мм | 10 м.ч. |
| Асбест 2 мм | 7,5 м.ч. |

Образцы подвергали испытаниям на ускоренное старение согласно ГОСТ Р 59555-2021 по режиму: облучение УФ-источником света в течение 500 ч с последующими 20 циклами по следующему порядку: выдержка в 3%-ном растворе соли – 1 ч, замораживание при -30°C – 5 ч, выдержка в воде при 22°C , нагрев до 60°C – 17 ч. Прогнозируемый срок службы композитов определялся по проценту потери прочности при изгибе. Изменение цвета после циклических испытаний и условную светостойкость устанавливали по порогу серой шкалы и по методу цветовых координат.

3. Результаты и обсуждение

Результаты испытаний модифицированных композитов на ускоренное старение представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний модифицированных ДПК на ускоренное старение

| Модификатор | Потеря прочности при изгибе, % | Прогнозируемый срок службы, лет |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Базовый состав | 4,8 | более 10 |
| Кокс 1 | 2,9 | более 10 |
| Кокс 2 | 2,3 | более 10 |
| Таунит $M_{\text{функ}}$ | 2,0 | более 10 |
| СМ-1230 | 0,7 | более 10 |
| Баз. фибра 6,4 мм | 3,4 | более 10 |
| Баз. фибра 12,7 мм | 3,1 | более 10 |
| Асбест 2 мм | 2,7 | более 10 |

Примечание – прогнозируемый срок службы составляет более 10 лет при потере прочности при изгибе менее 5% и 5-10 лет при 5% и выше.

Для всех составов потеря прочности при изгибе составляет менее 5%, что соответствует прогнозируемому сроку службы изделий более 10 лет. Наименьшую потерю прочности показывают образцы с углеродными наномодификаторами: благодаря черному цвету и нанометровому размеру нанотрубки эффективно поглощают и изменяют длину волны деструктивного ультрафиолетового спектра. Кроме того, полости внутри самих трубок способны адсорбировать молекулы кислорода, предотвращая окисление углеродной цепи ПВХ [21, 22]. Наличие в гранулах комплекса СМ-1230 антиоксидантов Ирганокса 1010 и Иргафоса 168 усиливает стабилизирующее действие нанотрубок, что приводит к минимальной потере прочности при изгибе 0,7%.

Волокнистые наполнители оказывают положительное влияние на долговечность ДПК за счет высокой атмосферостойкости самих базальтовых и асбестовых волокон. Наибольшее изменение прочности имеет исходная композиция, показатели которой близки значениям для срока службы 5-10 лет.

Стоит отметить, что зачастую старение композитов на основе ПВХ сопровождается увеличением прочности, что обусловлено процессами сшивания макромолекул при их деструкции [23]. Однако в случае введения древесного наполнителя прочность после климатического воздействия снижается вследствие деструкции компонентов древесной муки (в особенности, лигнина, отвечающего за прочность древесных волокон).

При воздействии атмосферных факторов также изменяются геометрические размеры профилей из ДПК. Изменение размеров (набухание) и гигроскопичность ДПК определяют после выдержки образцов в кипящей воде в течение 2 ч. Стандартное водопоглощение (в воде комнатной температуры в течение 24 ч) не позволяет определить геометрическую стабильность материала в условиях агрессивных атмосферных

воздействий, так как капельно-жидкая влага не в состоянии проникнуть через полимерную пленку. При кипячении же образуется паровоздушная (молекулярная) влага, которая способна внедриться в толщу композита и вызвать разбухание древесных частиц.

Свойства образцов после кипячения в воде представлены в табл. 4.

Все модифицированные композиты имеют меньшее набухание и водопоглощение по сравнению с базовым составом. Минимальные показатели водопоглощения имеют образцы с модификаторами на углеродной основе, что связано с образованием более плотной структуры ДПК. При введении волокнистых модификаторов в композитах возможно локальное образование микропустот в зонах переплетения волокон, что и обуславливает большие значения водопоглощения.

Таблица 4

Показатели набухания и водопоглощения после кипячения

| Модификатор | Набухание в кипящей воде за 2 ч по толщине, % | | | Водопоглощение в кипящей воде за 2 ч, % |
|-------------------------|---|-----------|----------|---|
| | по толщине | по ширине | по длине | |
| Базовый состав | 1,52 | 0,93 | 0,30 | 3,91 |
| Кокс 1 | 1,50 | 0,48 | 0,20 | 3,22 |
| Кокс 2 | 1,45 | 0,47 | 0,20 | 2,48 |
| Таунит М _{фнк} | 1,27 | 0,47 | 0,15 | 2,83 |
| СМ-1230 | 0,96 | 0,45 | 0,23 | 2,96 |
| Баз. фибра 6,4 мм | 1,43 | 0,84 | 0,30 | 3,30 |
| Баз. фибра 12,7 мм | 1,20 | 1,01 | 0,25 | 3,34 |
| Асбест 2 мм | 1,49 | 0,93 | 0,39 | 3,00 |

Стоит отметить, что наименьшие значения набухания в кипящей воде характерно для композитов с СМ-1230, что обусловлено наличием в его составе большого количества армирующих нанотрубок (0,8 м.ч.). Тем не менее, водопоглощение образцов несмотря на наличие гидрофобного монтажного воска не имеет минимальные значения, что связано с плавлением последнего при температуре выше 70-80°C.

До введения стандарта для ДПК-композитов водопоглощение в кипящей воде также использовали для оценки срока службы изделий. Кипячение проводили до тех пор, пока водопоглощение не превысит значения 5%, при этом 1 ч кипения приравнивали к 5 годам эксплуатации. Однако данный показатель для определения срока службы является достаточно условным, так как такие факторы эксплуатации, как воздействие УФ-излучения, атмосферных осадков, агрессивных сред и значительные перепады знакопеременных температур, заменялись тепловым, хоть и интенсивным воздействием в водной среде. В целом, все полученные композиты по обоим методикам (водопоглощение в кипящей воде и потеря прочности при изгибе после циклических испытаний) имеют срок службы более 10 лет.

Для архитекторов, дизайнеров и конечных потребителей важным критерием выбора любого строительного отделочного материала является внешний вид изделий и его стабильность с течением времени. Древесная мука в поверхностных слоях ДПК наиболее подвержена изменениям цвета. В первую очередь это связано с неблагоприятным воздействием атмосферных осадков и УФ-излучения на лигнин в составе древесины. В связи с этим для ДПК нормируется такой показатель, как условная светостойкость за 24 ч УФ-облучения и потеря цвета при циклических испытаниях на ускоренное старение. Первый показатель отвечает за изменение цвета в начальный период эксплуатации ДПК, когда происходит изменение цвета древесных частиц на поверхностных слоях, что может повлиять на оттенок композита в целом. Второй параметр показывает изменение цвета наполнителя и полимерной матрицы в долгой перспективе до окончания срока службы.

Внешний вид образцов до и после испытаний на ускоренное старение показан на рис. 1. Численные значения изменения окраски представлены в табл. 5.

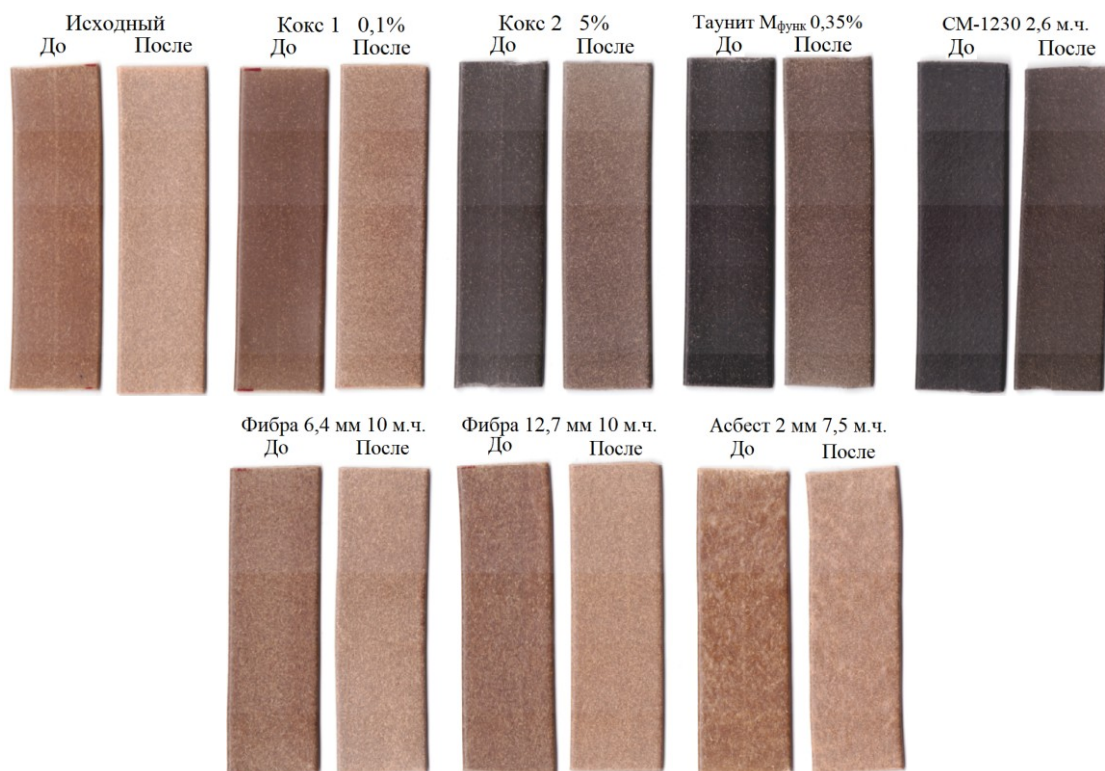


Рис. 1. Образцы ДПК-ПВХ до и после испытаний на ускоренное старение

Fig. 1. WPC-PVC samples before and after accelerated aging tests

Таблица 5

Изменения окраски ДПК-ПВХ после климатических воздействий

| Модификатор | Светостойкость за 24 ч | Изменение цвета после циклических испытаний | |
|---------------------------------|--|---|---------------------------------|
| | по методу координат, ΔE (балл) | по порогу серой шкалы, балл | по методу координат, ΔE |
| Базовый состав | 2,5 (Ц2) | 3 | 11,9 |
| Кокс 1 | 1,3 (Ц1) | 3-4 | 9,2 |
| Кокс 2 | 1,2 (Ц1) | 4 | 9,0 |
| Таунит $M_{\text{функ}} 0,35\%$ | 1,1 (Ц1) | 4-5 | 8,4 |
| СМ-1230 | 1,1 (Ц1) | 4-5 | 8,1 |
| Баз. фибра 6,4 мм | 1,3 (Ц1) | 4 | 9,3 |
| Баз. фибра 12,7 мм | 1,3 (Ц1) | 4 | 8,8 |
| Асбест 2 мм | 1,2 (Ц1) | 4 | 8,7 |

Все полученные модифицированные композиты соответствуют нормативу, балл по светостойкости составляет Ц1, при этом изменение координат цвета в 2 раза меньше, чем для базового состава. После циклических испытаний также наблюдается значительное снижение потери цвета образцов, что подтверждается как визуальным, так и инструментальным методами. Среди модифицированных композитов механоактивированные коксы в большей степени способствовали изменению окраски, что связано с отсутствием в их частицах внутренних полостей, как у нанотрубок, которые могли бы эффективнее поглощать и нивелировать негативное воздействие ультрафиолетовых лучей. Высокую стабильность цвета показали образцы с комплексом СМ-1230, имеющего в составе нанотрубки и антиоксиданты. Приведенные ранее литературные данные [19] показывают, что разработанные модифицированные древесно-полимерные композиты имеют светостойкость за 24 ч на уровне значений полимерно-минеральных композитов ($\Delta E=1,38$), которые достаточно стойки к изменениям цвета.

4. Заключение

Проведенное исследование влияния климатических воздействий на прочностные свойства ДПК-ПВХ показало значительное снижение потерь прочности при изгибе для всех модифицированных составов. Наименьшее изменение прочности характерно для образцов с углеродными добавками, что обусловлено их способностью эффективно поглощать и изменять длину волны ультрафиолета благодаря высокой дисперсности и черному цвету, тем самым препятствуя распространению разрушительного спектра. А наличие в гранулах комплекса СМ-1230 (с 30% УНТ) антиоксидантов усиливает стабилизирующее действие нанотрубок, что практически не изменяет прочность при изгибе (потеря составила 0,7%).

Оценка влияния модификаторов на изменение цвета образцов после 24 ч облучения показала двукратное снижение потери окраски (с $\Delta E=2,5$ для исходного до $\Delta E=1,1-1,3$ для модифицированных). В целом, все составы по долговечности соответствуют ГОСТ 59555-2021 и имеют прогнозируемый срок службы более 10 лет.

Список литературы/ References

1. Сулейманов А.М. Актуальные задачи в прогнозировании долговечности полимерных строительных материалов // Строительные материалы. 2015. № 5. С. 10-13 [Suleymanov A.M. Topical tasks in forecasting the durability of polymeric building materials // Stroitel'nye Materialy [Construction materials]. 2015. Iss. 5. P. 10-13]
2. Konstantinos F. et al. A review on the durability of PVC sewer pipes: research vs. practice // Structure and Infrastructure Engineering. 2020. Iss. 6. P. 880-897. DOI: 10.1080/15732479.2019.1673442.
3. Frigione, M. et al. Assessment of the Ageing and Durability of Polymers // Polymers. 2022. Iss. 14. P. 1934. DOI: 10.3390/polym14101934.
4. Никольская В. Дополнительная нагрузка для ДПК // ЛесПром Информ. 2021. Т. 157, № 3. С. 80-86 [Nikolskaya V. Additional load for WPC // LesPromInform. 2021. Vol. 157, Iss. 3. P. 80-86]
5. Мацевич Т.А. Террасные доски: состав, изготовление, свойства. Часть 1. Механические свойства // Строительные материалы. 2018. № 1-2. С. 101-105 [Matseevich T.A. et al. Terrace boards: composition, manufacture, properties. Part 1. Mechanical properties // Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2018. Iss. 1-2. P. 101-105]
6. Мацевич Т.А. и др. Террасные доски: состав, изготовление, свойства. Часть 2. Термические свойства, водопоглощение, истираемость, твердость, устойчивость к климатическим воздействиям, использование вторичных полимеров // Строительные материалы. 2018. № 3. С. 55-61 [Matseevich T.A. et al. Decking: structure, manufacturing, properties. Part 2. Thermal properties, water absorption, abrasion, hardness, resistance to climatic influences, the use of recycled polymers. Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2018. Iss. 3. P. 55-61]
7. Khuziakhmetova K.R. et al. Polyvinyl Chloride Compounds for Construction Industry // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. P. 191-200.
8. Хантимиров А. Г. и др. Исследование свойств наномодифицированных древесно-полимерных композитов на основе полиэтилена // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2023. Т. 15, № 2. С. 110-116. [Khantimirov A. G. et al. Study of the properties of nanomodified wood-polymer composites based on polyethylene // Nanotechnologies in construction: scientific online journal. 2023. Vol. 15, No. 2. P. 110-116] DOI 10.15828/2075-8545-2023-15-2-110-116. – EDN HCMIRC.
9. Ge Sh. et al. Potential use of different kinds of carbon in production of decayed wood plastic composite // Arabian Journal of Chemistry. 2017. Vol. 11, Iss. 6. P. 838-843.
10. Zhang X. et al. Thermal and mechanical properties of wood-plastic composites filled with multiwalled carbon nanotubes // Journal of Applied Polymer Science. 2018. Vol. 135, Iss. 22. P. 1-7. DOI: 10.1002/app.46308.

11. Lukawski D. et al. Enriching WPCs and NFPCs with Carbon Nanotubes and Graphene // *Polymers*. 2022. Iss. 14. DOI: 10.3390/polym14040745
12. Yu M. et al. Mechanical and thermal properties of R-high density polyethylene composites reinforced with wheat straw particleboard dust and basalt fiber // *International Journal of Polymer Science*. 2018. P. 1–11. DOI: 10.1155/2018/5101937.
13. Jiang L. et al. Wear and thermal behavior of basalt fiber reinforced rice husk / polyvinyl chloride composites // *Applied Polymer science*. 2020. Iss. 8. P. 1-7. DOI: 10.1002/app.50094.
14. Saddem M. et al. Effect of fiber and polymer variability on the rheological properties of wood polymer composites during processing // *Polymer Composites*. 2019. Vol. 40. P. E609–E616. DOI: 10.1002/pc.24909.
15. Абдрахманова Л.А. и др. Эффективность углеродных наноструктур в составе древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида // *Нанотехнологии в строительстве*. 2021. Т. 13, № 3. С. 150–157. DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-3-150-157 [Abdrakhmanova L.A. et al. Efficiency of carbon nanostructures in wood-polymer composites based on polyvinyl chloride // *Nanotechnologies in construction*. 2021. Vol. 13, Iss. 3. P. 150-157. DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-3-150-157.]
16. Абдрахманова Л.А. и др. Древесно-полимерные наномодифицированные поливинилхлоридные строительные композиты // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13, № 4 (115). С. 426–434. DOI: 10.22227/1997–0935.2018.4.426-434 [Abdrakhmanova L.A. et al. Wood-polymer nanomodified Polyvinyl chloride Building Composites // *Vestnik MGSU*. 2018. Vol. 13, Iss. 4 (115). P. 426-434. DOI: 10.22227/1997–0935.2018.4.426-434]
17. Galeev R. Resource-saving polymer compositions for construction purposes // *IOP conference series: Materials Science and Engineering, Kazan, 29 april – 15 may 2020*. Vol. 890. Kazan, Russia: IOP Science, 2020. P. 012111. DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012111. – EDN LOMNOQ.
18. Хантимиров А.Г. и др. Наполнение древесно-полимерных композитов базальтовыми волокнами // *Известия вузов. Строительство*. 2022. № 10. С.5-13. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-766-10-5-13 [Khantimirov A.G. et al. Filling of wood-polymer composites with basalt fibers // *Izvestiya vuzov. Construction*. 2022. Iss. 10. P. 5-13. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-766-10-5-13]
19. Барахтенко В.В. Оценка потребительских характеристик изделий из высоконаполненного полимерно-минерального композиционного материала на основе поливинилхлорида и отходов ТЭС // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. №3. С. 17-24 [Barakhtenko V.V. Evaluation of consumer characteristics of products made of highly filled polymer-mineral composite material based on polyvinyl chloride and waste from thermal power plants // *Civil Engineering journal*. 2014. Iss. 3. P. 17-24.]
20. Мусин И.Н. и др. Влияние полимерного связующего на свойства древесно-полимерных композитов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т. 17. № 14. С. 306-309. [Musin I.N. and others. The influence of a polymer binder on the properties of wood-polymer composites // *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2014. T. 17. No. 14. P. 306-309.]
21. Pyo S. et al. A fully transparent, flexible, sensitive, and visible-blind ultraviolet sensor based on carbon nanotube–graphene hybrid // *Advancad electronic materials*. 2018. 1800737. P. 1-8. DOI: 10.1002/aelm.201800737.
22. Nguyen T. et al. Impact of UV irradiation on multiwall carbon nanotubes in nanocomposites: Formation of entangled surface layer and mechanisms of release resistance // *Carbon*. 2017. Vol. 116. P. 191-200. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.01.097.
23. Низамов Р.К. Поливинилхлоридные композиции строительного назначения с полифункциональными наполнителями: дис. докт. техн. Наук. Казань, 2007. 369 с. [Nizamov R.K. Polyvinyl chloride compositions for construction purposes with multifunctional fillers: dis. doct. tech. sciences'. Kazan, 2007. 369 p.]

Информация об авторах

Хантимиров Аяз Габдрашитович, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: khantimirov94@kgasu.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: sulejmanov@kgasu.ru

Абдрахманова Ляйля Абдулловна, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: laa@kgasu.ru

Низамов Рашит Курбангалиевич, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: Nizamov@kgasu.ru

Хохряков Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: olvik@list.ru

Information about the authors

Ayaz G. Khantimirov, post-graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: khantimirov94@kgasu.ru

Alfred M. Sulejmanov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: sulejmanov@kgasu.ru

Lyaylya A. Abdrakhmanova, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: laa@kgasu.ru

Rashit K. Nizamov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: Nizamov@kgasu.ru

Oleg V. Khokhryakov, doctor of technical sciences, docent, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: olvik@list.ru