



## Эффективность углеродных наноструктур в составе древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида

Л.А. Абдрахманова<sup>1\*</sup> , Р.Р. Галеев<sup>2</sup> , А.Г. Хантимиров<sup>1</sup>, В.Г. Хозин<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ), г. Казань, Россия

<sup>2</sup> Набережно-Челнинский институт Казанского федерального университета, г. Набережные Челны, Россия

\*Контакты: e-mail: laa@kgasu.ru

**РЕЗЮМЕ: Введение.** Наиболее эффективными связующими агентами в древесно-полимерных композициях на основе поливинилхлорида являются углеродсодержащие наноструктуры, приводящие к улучшению электрических, физико-механических, реологических свойств, а также структуры и долговечности композитов. Главным недостатком их является высокая степень агрегирования частиц, что обуславливает сложности смешения и переработки их в составе полимерных композиций. В связи с этим актуальной задачей является поиск таких углеродных наномодификаторов, которые имели бы низкую степень агрегирования и невысокую стоимость. **Методы и материалы.** В работе изучена эффективность в качестве связующих агентов в строительных древесно-полимерных композитах на основе поливинилхлорида механоактивированных нефтяных коксов. Механоактивация приводит к функционализации углеродных частиц кокса с образованием на поверхности кислородсодержащих групп. Рассмотрено влияние различных количеств кокса (до 10% от массы древесной муки), и установлена взаимосвязь природы коксов и их концентрации в составе полимерных композиций с основными технологическими (текучесть расплава) и эксплуатационными (прочность на растяжение и изгиб, модуль высокоэластичности, твердость, водопоглощение и термостабильность) показателями и надмолекулярной структурой древесно-полимерных композитов.

**Результаты и обсуждение.** При введении коксов наблюдается большая степень ориентации надмолекулярных структур композитов по направлению экструдирования образцов, что обуславливает повышение разрывной прочности и прочности при изгибе, а также модуля высокоэластичности. Установлены оптимальные концентрации добавок от 0,1 до 5 масс.% по отношению к древесной муке, количество которого в древесно-полимерной композиции составляет 50 на 100 м.ч. ПВХ.

**Заключение.** Осуществлено введение механоактивированных нефтяных коксов в качестве связующих агентов в древесно-полимерных композитах на основе поливинилхлорида. Механоактивация позволила уменьшить агрегирование частиц кокса в более крупные агломераты, что дает возможность эффективного введения наномодификатора в сухом виде и исключить введение наномодификатора в виде водных дисперсий, являющегося довольно энергоемкой операцией производства.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** поливинилхлорид, древесно-полимерный композит, связующий агент, углеродные наноструктуры.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Институту катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения РАН (Омский филиал) в лице Баклановой О.Н. за предоставленные образцы механоактивированных нефтяных коксов Усть-Каменогорского нефтезавода.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Абдрахманова Л.А., Галеев Р.Р., Хантимиров А.Г., Хозин В.Г. Эффективность углеродных наноструктур в составе древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Том 13, № 3. – С. 150–157. – DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-3-150-157.

### ВВЕДЕНИЕ

Древесно-полимерные композиты (ДПК) – современные композиционные материалы, получаемые путем совмещения термопластичных полимеров с органическими наполнителями. Наибольший ин-

терес в качестве наполнителя для ДПК представляет древесная мука, позволяющая получать профильно-погонажные изделия самого разного функционального назначения в строительстве. Данным изделиям характерны высокая био-, атмосферостойкость, низкое водопоглощение, однородность структуры

и хорошая комбинируемость с другими строительными материалами [1].

В качестве полимера в ДПК обычно используют полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП) и поливинилхлорид (ПВХ), однако с точки зрения эксплуатационных характеристик для строительной отрасли наиболее предпочтительно использование ПВХ [2–5].

Главным способом снижения себестоимости изделий из ДПК является увеличение степени наполнения композитов (до и более 50 м.ч.). Однако это зачастую негативно сказывается как на технологических, так и на эксплуатационных характеристиках, что связано с ухудшением адгезии между наполнителем и полимером. Наиболее эффективным способом увеличения степени взаимодействия между древесной мукой и полимерной матрицей является использование связующих агентов. В настоящее время для полимеров широко распространены связующие агенты в виде наноразмерных добавок, главным образом, имеющие углеродную основу, среди которых наиболее эффективными являются углеродные нанотрубки и наноразмерный технический углерод.

Влияние нанотрубок на свойства ПВХ-композиций изучено довольно широко [6–12]. В данных трудах подробно показаны улучшения электрических, физико-механических, реологических свойств, а также структуры и долговечности таких композитов.

Известны исследования влияния на различные полимерные композиты наноразмерного технического углерода [13–18]. Однако влияние технического углерода на свойства ПВХ-композиций мало изучено, в большей степени такие исследования проведены на основе полиолефинов. В [16] были получены полимерные композитные материалы на основе полиэтилена высокой плотности и технического углерода с размером частиц 20–35 нм. Оптимальное улучшение свойств (прочность на разрыв, деформация разрыва, предел текучести расплава, электропроводность) наблюдалось в диапазоне 12–18% масс.

В [18] были изучены составы на основе полиэтилена, наполненные фуллеренсодержащим техническим углеродом. Фуллерены группы  $C_{50}$ – $C_{92}$  содержались в наполнителе в количестве 10% масс. Было установлено, что введение фуллеренсодержащего углерода до 1,5 масс.ч. значительно повышает прочность при разрыве (в 1,5 раза), но одновременно с этим снижается предел текучести расплава, что отрицательно сказывается на перерабатываемости композиций.

Существуют две основные гипотезы [19] для объяснения эффекта усиления материала при введении технического углерода. Согласно одной из них, данный эффект объясняется наличием ван-дер-

ваальсовых сил взаимодействия между атомами углерода в частицах модификатора и полимерных цепей; другая гипотеза предполагает межфазное взаимодействие за счет наличия свободных радикалов на поверхности частиц технического углерода, способных инициировать процесс химической сшивки на границе раздела фаз.

Как известно, основным недостатком наноразмерных добавок является высокая склонность к агрегированию, за счет чего сложно добиться равномерного распределения их в объеме полимерного композита. Для решения данной проблемы нанодобавки распределяют в различных средах-носителях, предотвращающих их слипание [20–22]. Однако дополнительное распределение наноструктур в средах-носителях приводит к еще большему удорожанию и без того недешевых нанодобавок, к введению в технологию производства дополнительного оборудования.

Другим способом предотвращения агрегирования наноструктур является функционализация их поверхности, которая уже показала свою эффективность по сравнению с нативными модификаторами [23–26]. Введение функционализированных наноструктур не требует введения дополнительных технологических операций, однако данный нанопродукт сам по себе является достаточно дорогостоящим, что является существенным недостатком для производителей полимерных изделий и сказывается на себестоимости продукции.

Таким образом, актуальной задачей является поиск таких углеродных наномодификаторов, которые имели бы низкую степень агрегирования, невысокую стоимость, а также поставлялись в сухом порошкообразном виде для исключения дополнительных энергозатратных стадий в производстве ДПК-композиций.

В данной работе в качестве наномодификатора был использован механоактивированный продукт переработки нефтяного кокса, представляющий собой мелкодисперсный порошок черного цвета. Механическая активация сопровождается появлением на поверхности частиц кокса кислородсодержащих групп, которые придают отрицательный заряд, за счет чего возрастают кулоновские силы отталкивания между заряженными агрегатами, и, соответственно, предотвращается их агрегирование в более крупные агломераты. Был использован кокс с различными степенями механоактивации: 1,34 мэкв/г (кокс 1) и 0,57 мэкв/г (кокс 2). В случае применения их в составе гидрофобных полимерных композиций возможно ожидать увеличения взаимодействия на границе раздела фаз.

Целью данной работы явилось исследование влияния различных количеств кокса (до 10 на 100 м.ч. ПВХ) на эксплуатационные свойства древесно-

полимерных композитов на основе ПВХ и оценка его эффективности в качестве связующего агента по сравнению с ранее использованными нанодобавками углеродной структуры.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Составы композиций включали в себя ПВХ марки С-7059-М (100 м.ч.), стабилизатор-смазку стеарат кальция (3 м.ч.), термостабилизатор двухосновный стеарат свинца (5 м.ч.), модификатор ударной прочности FM-50 (7 м.ч.) и модифицированную коксом древесную муку марки 180 (50 м.ч.). Введение коксов осуществлялось путем их добавления и смешения в необходимом количестве в небольшую часть древесной муки (10% от необходимого количества), затем содержание коксов в древесной муке постепенно уменьшали за счет добавления и тщательного перемешивания с оставшейся частью древесной муки.

Для исследования ПВХ-композиций были получены образцы в виде пленок и экструдатов. Пленочные образцы готовились методом термопластикации на лабораторных вальцах ЛБ 200 100/100 Э при температуре валков 160–170°C образцов в течение 4–5 мин. Каждая серия образцов готовилась одновременно при одинаковом температурном режиме и при одинаковом зазоре между валками ~0,010–0,020 см.

Экструдаты изготавливались методом экструзии на лабораторном двухшнековом экструдере LabTechScientificLTE 16-40 с фильерой плоского сечения (2x20 мм) при температуре в формующей зоне 210°C и скорости вращения валков 14 об/мин в течение 10–15 мин. Все серии образцов формовались при одинаковом профиле температур экструдера.

Распределение частиц по размерам для коксов получено на лазерном анализаторе Horiba LA-950 с применением ультразвуковой обработки.

Изучение микроструктуры хрупких сколов экструдатов ДПК-композиций осуществлялось методом высокоразрешающей сканирующей электронной микроскопии на микроскопе AURIGA, совмещенном со спектрометром энергетической дисперсии (EDS) IncaEnergy 350 X-Max.

Технологические и эксплуатационные свойства образцов композитов на основе ПВХ проводились в соответствии с действующими стандартами, приведенными в табл. 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование гранулометрического состава показало, что средние размеры агломератов частиц кокса 1 составили 28 мкм, кокса 2 – 35 мкм (рис. 1). Большие размеры агрегатов кокса 2 по сравнению с агрегатами кокса 1 обусловлены тем, что у последнего степень механоактивации выше, а значит, имеется большее количество кислородосодержащих групп на поверхности частиц, приводящих к разной морфологии агрегированных частиц кокса. Следует отметить, что распределение частиц по размерам кокса 2 имеет достаточно выраженный бимодальный характер.

Важнейшим свойством углеродных структур является способность образовывать цепочные структуры. Если посмотреть распределение частиц коксов в электронный микроскоп, то можно увидеть значительную разницу в морфологии частиц двух коксов (рис. 2).

Агломераты кокса 2 выстроены в виде цепочек, а кокса 1 в виде дисперсных частиц разного размера от 6 мкм до единичных агрегатов размером до 100 мкм. За счет образования цепочечных структур можно ожидать при введении их в рецептуру полимерной композиции большей степени упрочнения полимерного композита.

Таблица 1

### Методы испытаний ПВХ-образцов

ГОСТ	Названия ГОСТ и основные определяемые характеристики
14236-81	Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение
11262-2017	Пластмассы. Метод испытания на растяжение
4650-2014	Пластмассы. Методы определения водопоглощения
11645-73	Пластмассы. Метод определения показателя текучести расплава термопластов
14041-91	Пластмассы. Определение тенденции к выделению хлористого водорода и других кислотных продуктов при высокой температуре у композиций и продуктов на основе гомополимеров и сополимеров винилхлорида. Метод конго красный
15139-69	Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы)
32618-2014	Пластмассы. Термомеханический анализ (ТМА)

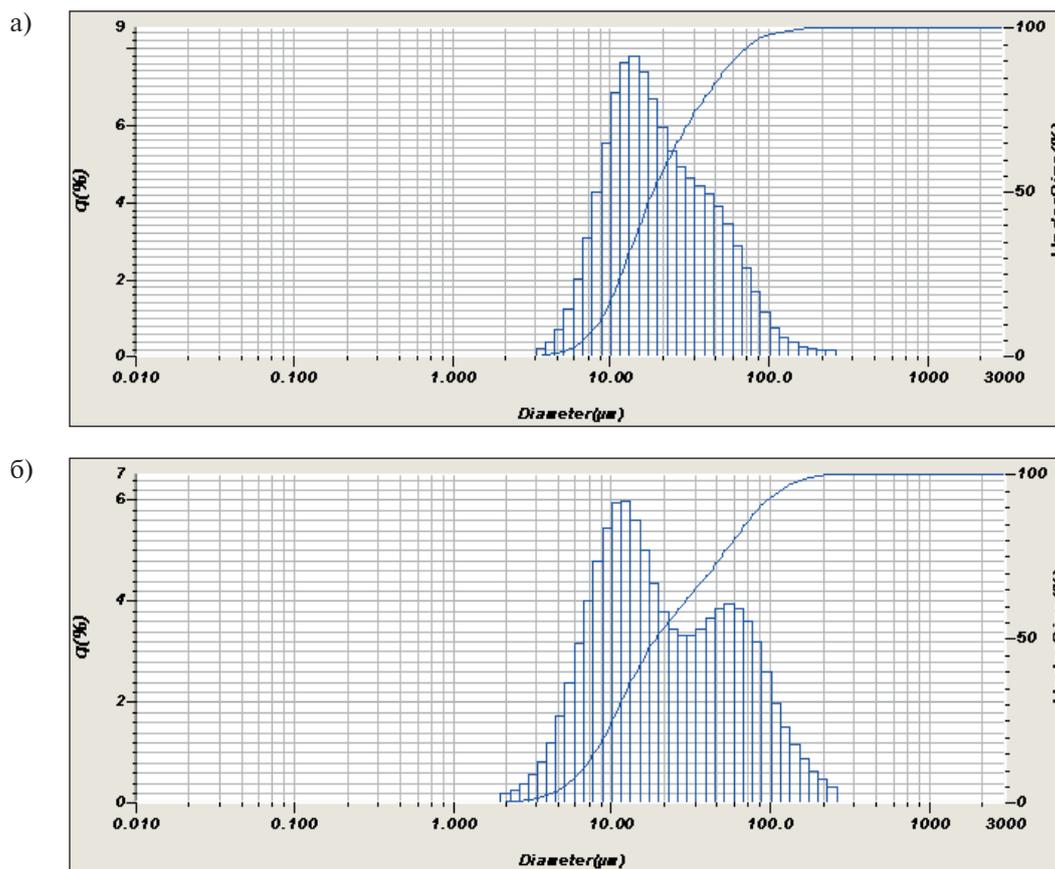


Рис. 1. Распределение частиц кокса 1 (а) и кокса 2 (б) по размерам

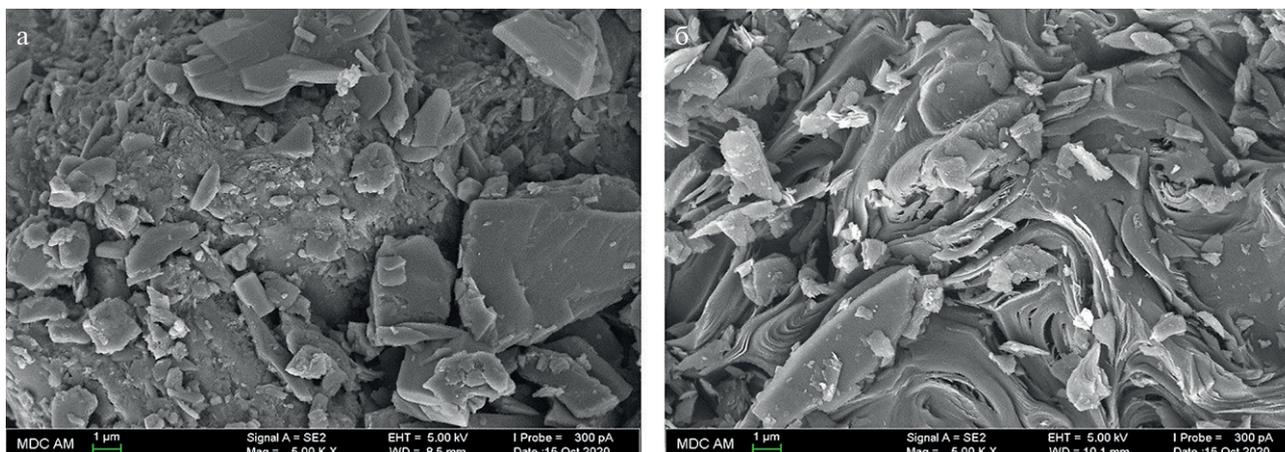


Рис. 2. Микрофотографии кокса 1 (а) и кокса 2 (б)

Из данных видно, что экстремум предела прочности при разрыве приходится на 0,1%. В целом почти у 10% модификаторов показатели прочности остаются стабильно высокими. Характерно, что в большей степени на перерабатываемость композиций оказывает влияние кокс 2 в количестве 5 и 10%, при этом наблюдается значительное снижение вязкости расплавов.

Очевидно, цепочное строение и размеры агрегатов частиц кокса, близкие с размерами волокон древесной муки, способствуют облегчению переработки расплава. Максимальное время термостабильности также приходится на композицию с 5% кокса 2.

По результатам испытаний пленочных образцов для дальнейшего изучения были выбраны следующие

Таблица 2

Зависимости прочности (а), ПТР (б) и термостабильности (в) для пленочных образцов ПВХ от концентрации модификатора

Концентрация в % от массы древесной муки	Прочность на растяжение, МПа	Показатель текучести расплава г/10 мин.	Термостабильность, мин.
<i>Кокс 1</i>			
0	32	0,49	225
0,1	40	0,31	238
0,35	38	0,76	210
1	36	0,47	226
5	31	0,47	240
10	32	0,42	197
<i>Кокс 2</i>			
0,1	37	0,15	211
0,35	34	0,52	232
1	36	0,82	241
5	35	2,43	253
10	36	1,41	234

Таблица 3

Свойства экструдированных образцов ПВХ-ДПК

Образец	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при растяжении, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Водопоглощение, % масс.	Интервал стеклования, °С	Температура текучести, °С	Модуль высокоэластичности, Н/см <sup>2</sup>
Базовый	1.156	32	85	1.68	89–125	238	17
С 0,1% кокса 1	1.175	34	86	1.61	94–127	230	26
С 5% кокса 2	1.320	40	94	1.41	87–120	236	28

оптимальные концентрации: кокс 1 – 0,1, а кокс 2 – 5% от массы древесной муки. Образцы для данных композиций были изготовлены в виде экструдатов.

Результаты ряда эксплуатационных и физических свойств экструдатов приведены в табл. 3.

Показатели (интервал стеклования, температуры стеклования и текучести, модуль высокоэластичности) получены из анализа термомеханических кривых, представленных на рис.3.

Прочность при растяжении повышается на 23% с 5% кокса 2. При данных концентрациях, очевидно, частицы кокса проникают в межглобулярное пространство макромолекул ПВХ и частиц древесной муки, заполняют пустоты и служат компатибилизатором для границы раздела «полимер-наполнитель».

В ДПК в присутствии модификаторов во всех случаях уменьшается температура текучести. Наблюдается уменьшение величины высокоэластической

деформации и, соответственно, увеличение модуля высокоэластичности.

Водопоглощение образцов уменьшается в присутствии модификаторов, что коррелирует с данными по прочности и плотности (рис. 3в). Водопоглощение композиции с коксом 1 снижается на 17% и для кокса 2 на 20%.

Для объяснения особенностей изменения свойств экструдированных композитов при введении коксов было проведено изучение микроструктуры образцов. По представленным на рис. 4 микрофотографиям в нанометровом диапазоне видно, для образцов с 0,1% кокса 1 и 5% кокса 2 наблюдается большая степень ориентации надмолекулярных структур в направлении экструдирования по сравнению с немодифицированным образцом (особенно в присутствии кокса 2), что обуславливает и большую разрывную прочность.

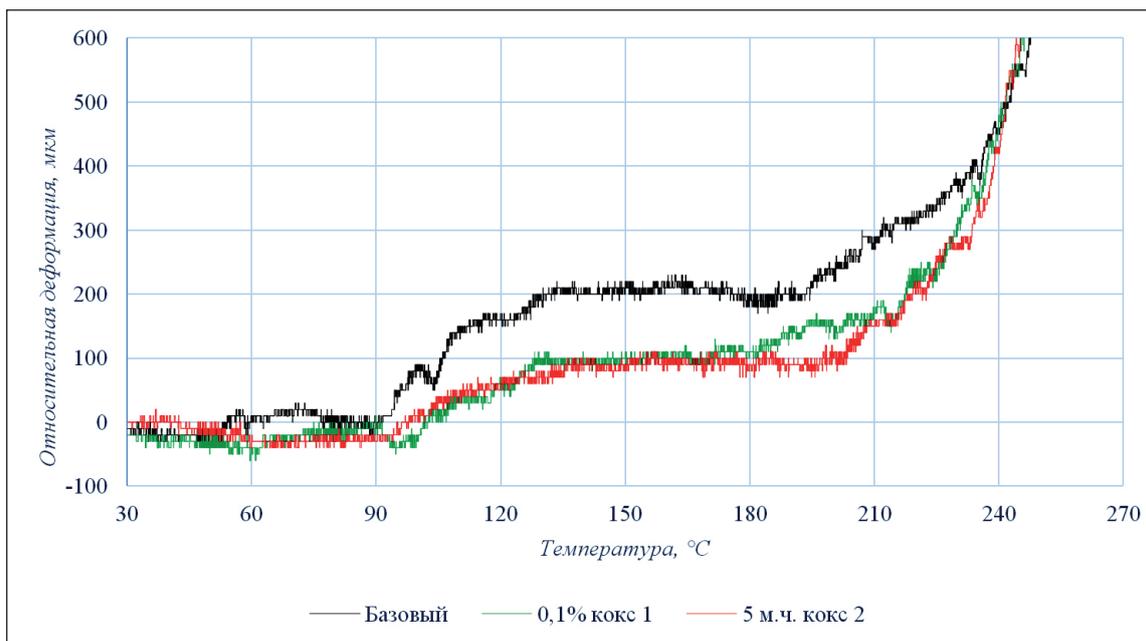


Рис. 3. Термомеханические кривые образцов ПВХ-ДПК (скорость подъема температуры 3°C/мин, удельная нагрузка сжатия 1 Н)

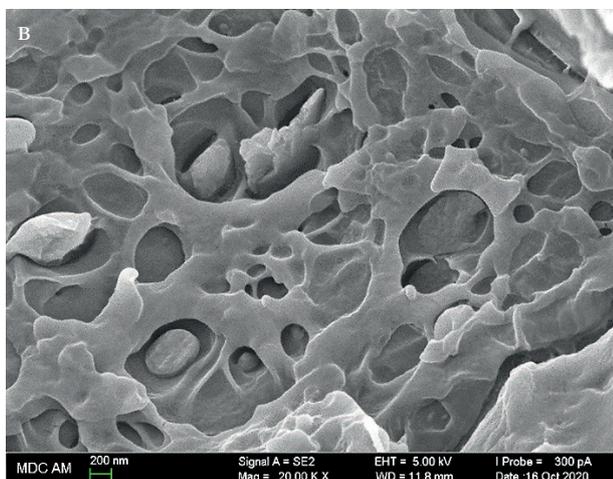
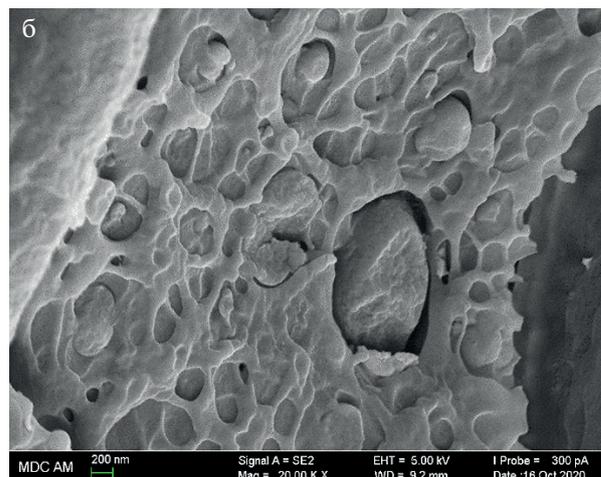
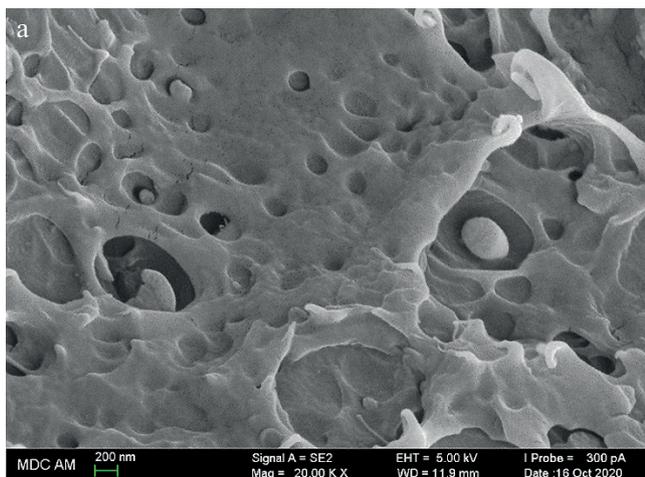


Рис. 4. Микрофотографии поверхности хрупкого скола экструдатов ПВХ-образцов:  
а – без модификатора;  
б – с 0,1% кокса 1;  
в – с 5% кокса 2 (масштаб 200 нм)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осуществлено введение механоактивированных нефтяных коксов в качестве связующих агентов в древесно-полимерных композитах на основе поливинилхлорида. Механоактивация позволила уменьшить агрегирование частиц кокса в более крупные агломераты, что дает возможность эффективно введения наномодификатора в сухом виде, а не в виде водных дисперсий, являющегося довольно энергоемкой операцией производства.

Введение кокса 1 в количестве 0,1% повышает прочность на 18%, плотность на 9% и снижает водопоглощение на 17%. В композициях с содержанием кокса 2 в количестве 5% увеличивается прочность на 23%, плотность на 12%, снижается водопоглощение на 20%; кроме того, предел текучести расплава возрастает в 5 раз по сравнению с базовой немодифицированной композицией, что особенно важно для получения качественных образцов при экструдировании профилей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клесов А.А. Древесно-полимерные композиты / А.А. Клесов. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 736 с.
2. Мацеевич Т.А., Аскадский А.А. Механические свойства террасной доски на основе полиэтилена, полипропилена и поливинилхлорида // Строительство: наука и образование. – 2017. – Том 7, №3 (24). – 48-59. – DOI: [10.22227/2305-5502.2017.3.4](https://doi.org/10.22227/2305-5502.2017.3.4).
3. Мусин И. Н., Файзуллин И. З., Новокшенов В.В., Вольфсон С.И. Влияние полимерного связующего на свойства древесно-полимерных композитов // Вестник Казанского Технологического Университета. – 2014. – Т. 17, № 14. – С. 306–309.
4. Engel R.G., Ablyasova A.G., Galimova N.Y., Kuryntsev S.V., Nizamov R.K. Composite Materials based on poly(vinyl chloride). *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies*. 2011; 5(3): 27.
5. Низамов Р.К. Полифункциональные наполнители для поливинилхлоридных композиций строительного назначения // Строительные материалы. – 2006. – № 7. – С. 68–70.
6. Silvano L.T., Vittorazzo Jr. A.L., Araujo R.G. Effect of preparation method on the electrical and mechanical properties of PVC Carbon nanotubes nanocomposites. *Materials Research*. 2018; 21(5): 1–6. Available from: [doi: 10.1590/1980-5373-MR-2017-1148](https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-1148).
7. Shieh Y.-T., Hsieh K.-C., Cheng C.-C. Carbon nanotubes stabilize polyvinyl chloride against thermal degradation. *Polymer Degradation and Stability*. 2017; 144: 221–230. Available from: [doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.08.017](https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.08.017).
8. Айгубова А.Ч., Козлов Г.В., Магомедов Г.М., Заиков Г.Е. Структурный анализ водопоглощения для нанокompозитов поливинилхлорид/углеродные нанотрубки // Вестн. Волгогр. Гос. Ун-та. – 2015. – № 4(19). – С. 40–46. – DOI: [10.15688/jvolsu10.2015.4.6](https://doi.org/10.15688/jvolsu10.2015.4.6).
9. Пачина А.Н., Кассин А.С., Тихонов Н.Н., Комиссаров Д.М. Методы повышения атмосферной стойкости поливинилхлорида // Успехи в химии и химической технологии. – 2017. – Том 31. – № 11. – С. 93–95.
10. Запорожкова И. В., Крутойров А. А., Поликарпова Н. П. Теоретические исследования полимерных нанокompозитов на основе полиэтилена, полипропилена и поливинилхлорида, армированных углеродными нанотрубками // Перспективные материалы. – 2015. – № 3. – С. 5–11.
11. Ашрапов А.Х., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хозин В.Г. Исследование поливинилхлоридных композиций с углеродными нанотрубками // Нанотехнологии в строительстве. – 2011. – Т. 3, № 3. – С. 13–24. – URL: [http://nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild\\_3\\_2011.pdf](http://nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild_3_2011.pdf) (дата обращения: 14. 04. 2021).
12. Хозин В.Г., Низамов Р.К. Полимерные нанокompозиты строительного назначения // Строительные материалы. – 2009. – № 8. – С. 32–34.
13. Vaccaro S., Cataldo F., Cecilia A., Cemmi A., Padella F., Santini A. Interaction between reinforce carbon black and polymeric matrix for industrial applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2003; 208: 191–194. Available from: [doi: 10.1016/S0168-583X\(03\)00638-4](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)00638-4).
14. Hatthapanit K., Sae-Oui P., Sombatsompop N., Sirisinha C. Enhancement of Rubber–Carbon Black Interaction by Amine-Based Modifiers and their Effect on Viscoelastic and Mechanical Properties. *Journal of Applied Polymer Science*. 2012; 1–7. Available from: [doi: 10.1002/app.36969](https://doi.org/10.1002/app.36969).
15. Mazlina M.K. Influence of Fillers Surface Characteristics on Bound Rubber Properties of Filled Natural Rubber Compounds. *Advanced Materials Research*. 2014; 412–416. Available from: [doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.845.412](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.845.412).

16. Борукаев Т.А., Гаев Д.С. Физико-механические свойства композитов на основе полиэтилена высокой плотности и технического углерода // Прикладная физика. – 2017. – № 5. – С. 76–81.
17. Saatchi M.M., Shojaei A. Effect of carbon-based nanoparticles on the cure characteristics and network structure of styrene-butadiene rubber vulcanizate. *Polym. Int.* 2012; 4: 83–93.
18. Игуменова Т.И., Клейменова Н.Л., Акатов Е.С., Попов Г.В. Применение фуллеренсодержащего технического углерода для модификации свойств полиэтилена // Вестник ТГТУ. – 2011. – Том 17. – № 4. – С. 1071–1076.
19. Свистков А.Л., Солодько В.Н., Кондюрин А.В., Елисеева А.Ю. Гипотеза о роли свободных радикалов на поверхности наночастиц технического углерода в формировании механических свойств наполненного каучука // Физическая мезомеханика. – 2016. – Том 19, № 5. – С. 84–93.
20. Амиров Р.Р., Неклюдов С.А., Амирова Л.М. Способ получения композиций на основе углеродных нанотрубок и полиолефинов // Патент РФ № 2490204, кл. В82В 3/00, С08J 3/205, С08J 7/04, С08L 23/00, С08К 3/04. – Заявитель и патентообладатель Казан. Фед. Ун-т. – 2011151928/04; заявл. 19.12.2011; опубл. 20.08.2011, бюл. № 23. – 11 с.
21. Богданова С.А., Гатауллин А.Р., Галяметдинов Ю.Г. Дисперсии углеродных нанотрубок как модифицирующие добавки для полимерных композиционных материалов // Актуальные проблемы науки о полимерах. – 2018. – С. 82.
22. Гусев К.В., Соловьев В.Г. Влияние углеродных нанотрубок на механические свойства полимерных композитов // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки. – 2017. – № 11. – С. 150–153.
23. Ferreire T., Paiva M.C., Pontes A.J. dispersion of carbon nanotubes in polyamide 6 for microinjection moulding. *Journal of Polymer Research.* 2013; 20: 301–310. Available from: [doi: 10.1007/s10965-013-0301-7](https://doi.org/10.1007/s10965-013-0301-7).
24. Paiva M., Simon F., Novais R. et al. Controlled functionalization of a solvent-free multicomponent approach. *ACS Nano.* 2010; 4(12): 7379–7386. Available from: [doi: 10.1021/nn1022523](https://doi.org/10.1021/nn1022523).
25. Nasir M., Mohammad I., Asad H. et al. Polyamide-6-based composites reinforced with pristine or functionalized multi-walled carbon nanotubes produced using melt extrusion technique. *Journal of Composite Materials.* 2014; 48(10): 1197–1207. Available from: [doi: 10.1177/0021998313484779](https://doi.org/10.1177/0021998313484779).
26. Дьячкова Т.П., Таров Д.В., Кобзев Д.Е. Исследование свойств полиэтиленовых композитов на основе функционализированных углеродных нанотрубок // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2019. – Том 25, № 1. – С. 163–173. – [DOI: 10.18721/JEST.25116](https://doi.org/10.18721/JEST.25116).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Абдрахманова Ляйля Абдулловна**, д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3905-5730>, e-mail: [laa@kgasu.ru](mailto:laa@kgasu.ru)

**Галеев Руслан Разинович**, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой, Набережно-Челнинский институт Казанского федерального университета, г. Набережные Челны, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3377-0947>, e-mail: [rooslan\\_galeyev@mail.ru](mailto:rooslan_galeyev@mail.ru)

**Хантимиров Аяз Габдрашитович**, аспирант кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Россия, e-mail: [khantimirov94@mail.ru](mailto:khantimirov94@mail.ru)

**Хозин Вадим Григорьевич**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0874-316X>, e-mail: [khozin.vadim@yandex.ru](mailto:khozin.vadim@yandex.ru)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Статья поступила в редакцию: 28.04.2021.

Статья поступила в редакцию после рецензирования: 21.05.2021.

Статья принята к публикации: 26.05.2021.