



УДК 678.743.22.

**Исламов Анвар Махмутович**

кандидат технических наук, старший преподаватель

Email: iam16@yandex.ru

**Фахрутдинова Венера Хафизовна**

кандидат химических наук, доцент

Email: faxrutdinova1963@mail.ru

**Абдрахманова Ляйля Абдулловна**

доктор технических наук, профессор

Email: laa@kgasu.ru

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Закирова Камила Ильгамовна**

техник ПТО

Email: kamilka.zakirova@mail.ru

**ООО «Строй Инжиниринг»**

Адрес организации: 445045, Россия, г. Тольятти, ул. Ярославская, д. 12

### **Поверхностная модификация поливинилхлорида водной коллоидной дисперсией графеновых нанопластинок**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* В работе исследовались возможность и влияние на свойства получаемых композитов водной коллоидной дисперсии графеновых нанопластинок при поверхностной модификации поливинилхлорида.

*Результаты.* Показано, что в результате диффузионной пропитки поливинилхлоридом в коллоидной дисперсии графеновых нанопластинок до оптимальной степени набухания (0,17 %) и последующего температурного воздействия в поверхностных слоях композитов, происходит образование упорядоченных структур, что обуславливает увеличение поверхностной микротвердости на 36 %, стойкости к истиранию – на 81 % и др.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в разработке технологических параметров диффузионной модификации ПВХ для получения изделий с усиленными поверхностными свойствами и высоким сопротивлением к действию различных эксплуатационных факторов.

**Ключевые слова:** поливинилхлорид, графеновые нанопластины, диффузия, набухание, градиент.

**Для цитирования:** Исламов А. М., Фахрутдинова В. Х., Абдрахманова Л. А., Закирова К. И. Поверхностная модификация поливинилхлорида водной коллоидной дисперсией графеновых нанопластинок // Известия КГАСУ. 2021. № 2 (56). С. 13–21. DOI: 10.52409/20731523\_2021\_2\_13.

#### **1. Введение**

Благодаря ценному сочетанию технологических и эксплуатационных свойств, современное строительное материаловедение невозможно представить без использования полимерных композиционных материалов. Среди них, особое место занимают материалы на основе поливинилхлорида (ПВХ) – термопластичного полимера, обладающего высокой способностью к модификации, что позволяет на его основе выпускать широкую номенклатуру изделий [1, 2].

Как правило, все свойства этих материалов однородны по сечению изделий и конструкций. А между тем во время эксплуатации поверхностная часть изделий, в том числе и полимерных, подвергается влиянию различных эксплуатационных факторов, которые распределяются не по всему объему изделия, а концентрируются на поверхности, содержащей повышенное количество локальных напряжений и дефектов, возникающих в процессе переработки. Поверхностные дефекты наиболее опасны, с

поверхности начинается механическое разрушение, химическая коррозия, старение, термическая и термоокислительная деструкция, что снижает период эксплуатации готовых изделий [3-5].

Поэтому упрочняющая или другая функциональная обработка поверхности полимерных изделий практически без изменения структуры внутренней части является перспективным направлением и развивается в последние годы, что позволяет на основе известных полимеров получать качественно новые материалы с комплексом улучшенных физико-химических и эксплуатационных свойств.

Возможных путей усиления поверхностных слоев достаточно много. Существует множество различных методов модификации полимерных материалов с целью увеличения их твердости, износостойкости, стойкости к царапанию и т.д. Чаще всего модификацию поверхности полимеров осуществляют путем механического [4, 5], энергетического [6] и диффузионного [7-9] воздействия на поверхность готовых изделий без изменения структуры и состава внутренних слоев. Модификация поверхности различными жидкими реагентами является наиболее эффективной. В процессе диффузии жидкого модификатора в блок полимера образуется неотделимый поверхностный слой, свойства которого изменяются по толщине образца, то есть по градиенту. Меняя условия диффузионной пропитки, можно регулировать глубину проникания и тем самым толщину поверхностного градиентного слоя. Диффузионный метод, позволяющий заполнять модификатором поры в структуре полимера, является принципиально новым методом модификации полимеров в изделиях [5].

Теоретическими предпосылками для осуществления поверхностной обработки полимерных изделий с целью их упрочнения является неоднородность надмолекулярной структуры самих полимеров. Как известно, макромолекулы в поверхностных слоях укладываются более рыхло, что приводит к деформации плотных глобулярных образований. Это приводит к увеличению свободного объема по сравнению с внутренней частью и к сохранению молекулярной подвижности. Поверхностные слои напрямую подвергаются воздействиям внешних факторов при переработке и эксплуатации, что приводит к накоплению напряжений, дефектов структуры и макромолекул [10-12]. Следовательно, актуальной представляется модификация слабых поверхностных слоев, так как они наиболее доступны для диффузионного проникновения.

Надмолекулярная структура полимеров отличается большим многообразием, благодаря тому, что макромолекулы способны принимать в пространстве большое множество конформаций, образуя различные элементы структуры (клубок, пачка, глобула, кристаллит). Как правило, размеры надмолекулярных элементов и свободного пространства между ними составляют несколько десятков нанометров, поэтому полимеры всегда являются «естественными наноструктурными образованиями» [13]. Это позволяет использовать в качестве диффузантов не только растворы, но и коллоидные дисперсии, содержащие наноразмерные частицы.

Ранее авторами была показана эффективность использования водных золь кремниевой кислоты для поверхностной наномодификации ПВХ. Золи представляли собой коллоидные растворы, содержащие наноразмерные мицеллы аморфного кремнезема (средний размер частиц 5-9,5 нм). Их использование позволяет получать материалы с усиленными поверхностными свойствами в результате не только заполнения слабых зон поверхностных слоев ПВХ частицами модификатора и возникновения межмолекулярного взаимодействия, но и упорядочения возникающих структур [14].

Различные по природе вещества и соединения имеют потенциальную возможность использования в качестве диффузантов, поэтому работа по выявлению эффективности новых модификаторов для повышения эксплуатационных свойств ПВХ материалов продолжается. В качестве таких модификаторов большой интерес представляют графеновые нанопластины (ГНП) – небольшие стопки монослоев графита, обладающие уникальными свойствами (высокая электро- и теплопроводность, механическая прочность, низкая стоимость и т.д.). Имеющиеся исследования показывают, что объемное наполнение ПВХ малыми количествами ГНП (0,1-2,5 % по массе) приводит к улучшению прочностных, термических и термомеханических свойств получаемых нанокмозитов [15, 16]. Авторы связывают это с тем, что ГНП хорошо диспергируется в матрице ПВХ,

вследствие чего образуются водородные связи между нанонаполнителем и полимером. Это приводит к перестройке аморфных полимерных цепей ПВХ в окружении частиц ГНП, приводящей к более эффективной передаче нагрузки между полимером и наполнителем.

Таким образом, представляет большой теоретический и практический интерес модифицирование структуры поверхности готовых ПВХ-изделий частицами ГНП, но в рамках поверхностных слоев, и осуществление его в процессе диффузионной пропитки. Для достижения этого в данной работе была рассмотрена коллоидная дисперсия ГНП, получение которой описано в работе [17].

Целью настоящей работы является создание полимерных композиционных материалов с усиленными поверхностными свойствами путем диффузионной модификации ПВХ водной дисперсией ГНП.

Задачей исследования явилась оптимизация технологических режимов получения композитов и определение их основных физико-механических и эксплуатационных характеристик.

## 2. Материалы и методы

Для проведения экспериментальных исследований использовались образцы ПВХ, не содержащие каких-либо функциональных добавок. Композиция включала в себя 100 м.ч. порошкообразной ПВХ-смолы марки С-7058-М, соответствующей ГОСТ 14332-78, и 3 м.ч. стабилизатора-смазки стеарата кальция, соответствующего ТУ 6-09-4104-87. Изначально путем термопластикации на вальцах получались пленочные материалы, которые затем прессовались в блочные образцы размерами 20×20×4 мм.

Поверхностная модификация ПВХ осуществлялась водной коллоидной дисперсией ГНП AV-74. Данный модификатор использовался в качестве диффузанта, который представлял собой непрозрачную жидкость, состоящую по массе на 98 % из дистиллированной воды, на 1 % из фенолформальдегидной смолы и на 1 % из равномерно распределенных частиц графеновых нанопластинок.

Модификация осуществлялась путем пропитки исходных ПВХ-образцов в модификаторе до необходимой степени набухания и последующей температурной выдержки при 100 °С в течение 3 часов для удаления жидкой фазы модификатора.

## 3. Результаты и обсуждение

Первым этапом поверхностной модификации ПВХ является пропитка в коллоидной дисперсии ГНП. Образцы выдерживаются в модификаторе при определенной температуре в течение заданного времени, при этом происходит процесс набухания. Поэтому кинетика процесса диффузии определялась по изменению массы и линейных размеров полимерных образцов.

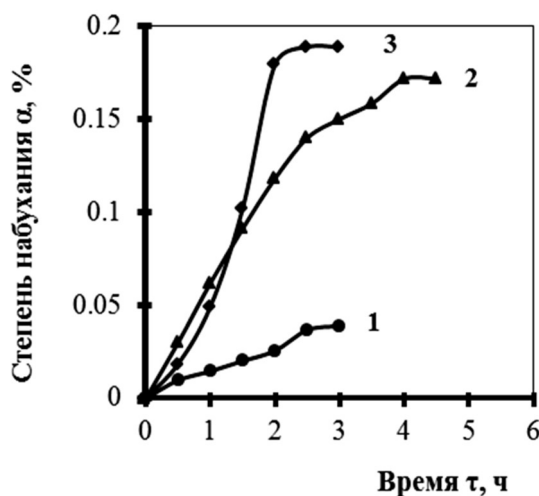


Рис. 1. Кинетические кривые набухания ПВХ-образцов в дисперсии ГНП при температуре 20°C (1), 60°C (2) и 80°C (3) (иллюстрация авторов)

На рис. 1 показано, что кинетические кривые являются типичными кривыми насыщения с выходом на плато. Возрастание температуры приводит к снижению времени достижения соответствующей степени набухания. Однако, в целом, для всех образцов характерны низкие показатели насыщения, значения которых не превышают 0,2 % по массе, что свидетельствует о малой совместимости ГНП и матрицы ПВХ даже при высокой температуре пропитки, близкой к стеклованию ПВХ. Это особенно заметно по невысоким значениям характеристик процесса диффузии, представленным в табл. 1.

Тем не менее, повышение температуры пропитки является обоснованным и более предпочтительным, поскольку позволяет модификатору проникать в большем объеме, что позволяет существенно повлиять на структуру модифицированного ПВХ.

Таблица 1

#### Характеристики процесса пропитки ПВХ-образцов в водной дисперсии ГНП

Температура пропитки, °С	Время пропитки $\tau$ , мин	Степень набухания $\alpha$ , %	Коэффициент диффузии $D$ , $\times 10^{-6}$ см <sup>2</sup> /с	Коэффициент сорбции $S$ , г/см <sup>3</sup>	Коэффициент проницаемости $P$ , $\times 10^{-8}$ г $\times$ см/см <sup>2</sup> $\times$ с
20	90	0,04	3,89	0,0005	0,19
60	84	0,17	4,21	0,0023	0,97
80	87	0,19	4,25	0,0024	1,02

Технологический процесс диффузионной модификации ПВХ будет определяться только двумя параметрами – температурой пропитки и временем выдержки изделий в диффузантах. Для этой цели были построены изолинии равной степени пропитки (рис. 2), которые позволяют подобрать параметры для достижения требуемой степени набухания. Они наглядно показывают, что увеличение температуры приводит к уменьшению времени, необходимого для достижения определенной степени набухания.

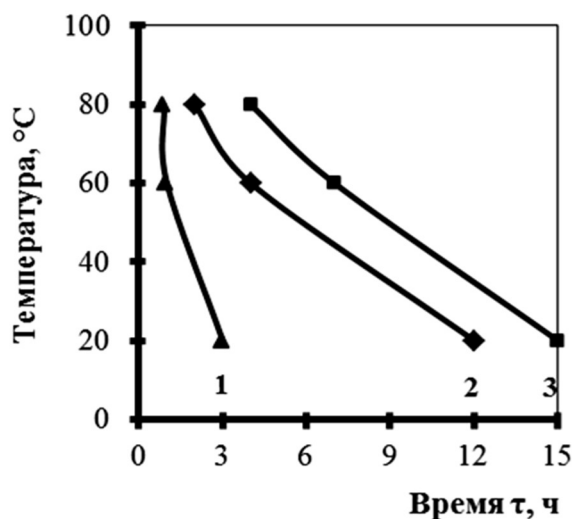


Рис. 2. Линии равной степени пропитки образцов ПВХ в дисперсии ГНП при степени набухания 0,04 % (1); 0,17 % (2); 0,19 % (3). (иллюстрация авторов)

На следующем этапе ПВХ-образцы подвергались термической обработке для удаления жидкой фазы модификатора и «закрепления» частиц ГНП в структуре материала. Особенностью диффузионной модификации является то, что модификатор проникает не на всю толщину полимерного изделия, а концентрируется в поверхностном слое. Его содержание, как правило, плавно уменьшается от поверхности вглубь образца – по градиенту. Тем самым реальная концентрация модификатора в поверхностном слое образцов намного выше. Рассчитано, что для образцов со степенью набухания 0,04 % средняя локальная концентрация дисперсии ГНП в поверхностном слое ПВХ составляет 17,7 %, при степени набухания 0,17 % – соответственно 34 %.

Несомненно, эти изменения в структуре модифицированных образцов отразятся на их свойствах. При этом изменение будет происходить неравномерно по объёму материала, а по градиенту от поверхности вглубь. Для определения неравномерного влияния диффузионной пропитки проводилось определение поверхностной микротвердости по толщине образцов. Данный метод исследования позволяет определять микромеханические свойства в локальных масштабах, сопоставимых с отдельными фазами или структурными составляющими, что имеет большое значение для неоднородных материалов. В работах [18, 19] была показана определенная зависимость между микротвердостью полимеров и концентрацией диффузанта. Поэтому по изменению микротвердости можно косвенно судить о характере распределения модификатора в поверхностном слое полимерного образца.

Анализ полученных данных (рис. 3) показал, что исходный ПВХ-образец по толщине имеет неоднородное изменение свойств. В глубине образцов микротвердость немного выше по сравнению с поверхностью, связанной с наличием дефектов и неоднородностей структуры.

В результате пропитки в водной дисперсии ГНП поверхностная микротвердость ПВХ снижается. Таким образом, диффузанта оказывает пластифицирующее действие.

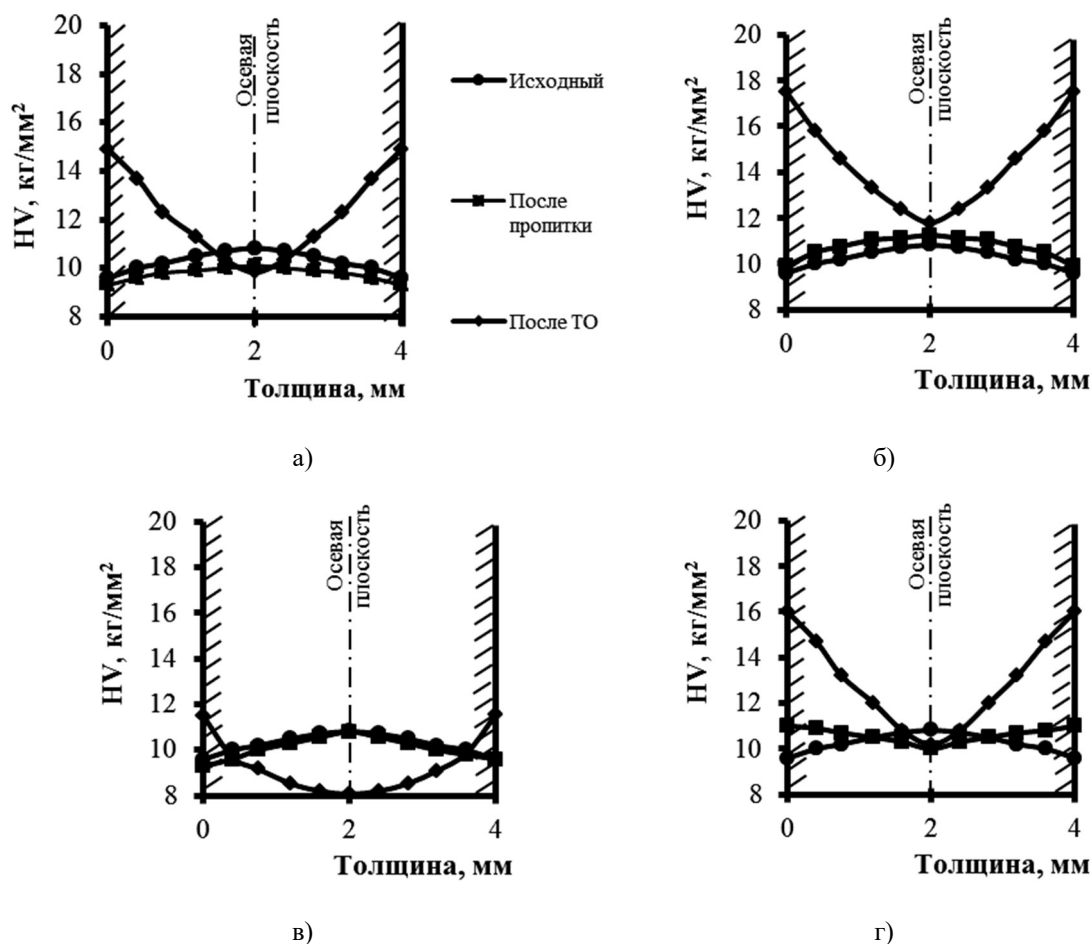


Рис. 3. Кривые распределения микротвердости по толщине ПВХ-образцов со степенью набухания 0,04 % (а), 0,17 % (б), 0,19 % (в) в дисперсии ГНП и 0,15 % (г) в дистиллированной воде. (иллюстрация авторов)

После тепловой обработки при 100°C в течение 3 часов наблюдается усиление образцов с инверсией кривых микротвердости. Наибольший прирост на 82 % достигается для образцов со степенью набухания ПВХ 0,17 %, которую можно достичь за 4 часа пропитки при температуре 60°C, либо менее чем за 2 часа при 80°C. При содержании

модификатора в количестве превышающим оптимальные значения, происходит снижение прироста микротвердости как на поверхности, так и внутри материала.

Механизм усиления поверхности ПВХ в результате модификации достаточно сложный, поскольку в нем задействовано множество элементов. В результате диффузионной обработки не только вводятся частицы ГНП в рыхлоупакованные области ПВХ, но и изменяется структура и физическое состояние поверхностных слоев полимерного изделия. К тому же нужно учитывать влияние дисперсионной среды диффузанта, так как глубина его проникновения в полимер всегда больше, чем у самого модификатора. Как известно, вода обладает высокой проникающей способностью в полимеры и может взаимодействовать с их полярными центрами. Таким образом, усиление ПВХ можно связать со следующими процессами: во-первых, с образованием межмолекулярного взаимодействия между наполнителем и полимером, приводящим к структурированию матрицы ПВХ в окружении частиц ГНП; во-вторых, с возникновением водородных связей и упорядочением структуры воды в условиях полярных групп ПВХ [20].

Для проверки этого факта была осуществлена пропитка ПВХ-образцов в дистиллированной воде при 60°C и определена их поверхностная микротвердость. Выявлено, что кривая набухания ПВХ в воде практически идентична кривой набухания в дисперсии ГНП при аналогичной температуре и времени выдержки. Таким же образом, после тепловой обработки происходит усиление поверхности образцов с инверсией кривых микротвердости с приростом 67 % (рис. 3г). Полученные результаты показывают существенный вклад дисперсионной среды модификатора в усиление поверхности ПВХ, которые составляют около 82 %, а оставшиеся 18 % на частицы ГНП. Несмотря на то, что во время тепловой обработки удаляется значительная часть физически связанной воды, оставшаяся вода (либо следы ее присутствия) совместно с частицами ГНП приводят к структурным изменениям ПВХ, оказывая благоприятное изменение свойств.

Об этом свидетельствуют данные термомеханического анализа (табл. 2). Увеличение степени набухания приводит к закономерному росту температуры стеклования ПВХ-образцов и, соответственно, плотности узлов физической сетки. Это дополнительно подтверждает, что в результате модификации в поверхностном слое устраняются дефекты и области с пониженной молекулярной упаковкой путем заполнения их частицами модификатора. Структура поверхности ПВХ становится более плотной, упорядоченной, и при механических воздействиях мало деформируется. Возрастает стойкость модифицированных образцов к абразивному воздействию и действию растворителя. Несмотря на то, что модификации подвергается лишь поверхность образца, в конечном счете, улучшение свойств наблюдается для всего материала в целом.

Таблица 2

**Данные термомеханического анализа, экстрагирования и истираемости для ПВХ композитов с различной степенью набухания в дисперсии ГНП**

Степень набухания ПВХ в дисперсии ГНП (%)	Интервал температуры стеклования (°C)	Эффективная плотность узлов сетки $v_e$ (моль/г $\times 10^{-6}$ )	Количество экстрагируемых в циклогексаноне (%)	Истираемость (мкм)
0	75-79	52,6	100	528
0,04	78-97	53,3	96,5	477
0,17	85-108	55,5	89,6	291
0,18	100-105	63,1	93,4	280

#### 4. Заключение

1. Показана возможность и эффективность использования водной коллоидной дисперсии графеновых нанопластин AV-74 в качестве модификатора поверхностных свойств ПВХ-материалов.

2. Оптимальным режимом диффузионной модификации является пропитка ПВХ до степени набухания 0,17 % с последующей температурной обработкой при 100°C в течение 3

часов. Результатом модификации ПВХ является увеличение поверхностной микротвердости на 82 %, стойкости к истиранию на 81 %, рост интервала стеклования на 10°C и др.

3. Усиливающее действие может быть связано с упрочнением структуры поверхностных слоев модифицированного ПВХ в результате образования межмолекулярного взаимодействий между полимером и компонентами диффузанта.

4. Модифицированные таким образом ПВХ-материалы могут быть использованы в качестве полимерных изделий и конструкций, способных работать в условиях воздействия агрессивных сред, абразивного износа, трения, царапания (трубы, профильно-погонажные изделия, листовой винипласт, бипластмассовые трубы, царги).

### Благодарность

Авторы выражают огромную благодарность ООО «НаноТехЦентр» (г. Тамбов) за предоставленные образцы углеродных наноматериалов.

### Список библиографических ссылок

1. Абдрахманова Л. А., Хатимиров А. Г., Низамов Р. К., Хозин В. Г. Древесно-полимерные наномодифицированные поливинилхлоридные строительные композиты // Вестник МГСУ. 2018. № 4 (115). С. 426–434. DOI: 10.22227/1997–0935.2018.4.426-434.
2. Абдрахманова Л. А., Хузиахметова К. Р., Низамов Р. К., Хозин В. Г. Модификаторы для жестких поливинилхлоридных композиций строительного назначения // Строительные материалы. 2020. № 12. С. 34–39. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-787-12-34-39.
3. Sabbatini L. Polymer Surface Characterization. Berlin : De Gruyter, 2014. 308 p.
4. Wolf R.A. Plastic surface modification: surface treatment and adhesion. Munich : Carl Hanser Verlag, 2016. 244 p.
5. Mincheva R., Raquez J. M. The Surface of Polymers // Surface Modification of Polymers: Methods and Applications. 2019. Iss. 1. P. 1–30. DOI: 10.1002/9783527819249.ch1.
6. Grace J. M., Gerenser L. J. Plasma treatment of polymers // Journal of Dispersion Science and Technology. 2003. Vol. 24. Iss. 3–4. P. 305–341. DOI: 10.1081/dis-120021793.
7. Назаров В. Г. Поверхностная модификация полимеров. М. : МГУП, 2008. 474 с.
8. Kharitonov A. P., Kharitonova L. N. Surface modification of polymers by direct fluorination. A convenient approach to improve commercial properties of polymeric articles // Pure and Applied Chemistry. 2009. Vol. 81. Iss. 3. P. 451–471. DOI: 10.1351/pac-con-08-06-02.
9. Sacristán J., Reinecke H., Mijangos C. Surface modification of PVC films in solvent-non solvent mixtures // Polymer. 2000. Vol. 41. Iss. 15. P. 5577–5582. DOI: 10.1016/s0032-3861(99)00784-3.
10. Волынский А. Л., Ярышева А. Ю., Рухля Е. Г., Ярышева Л. М., Бакеев Н. Ф. Особенности структуры и свойств растворов, расплавов и твердых полимеров в ограниченных нанометровых объемах // Успехи химии. 2014. Т. 83. № 11. С. 1003–1026.
11. Paeng K., Richert R., Ediger M. D. Molecular mobility in supported thin films of polystyrene, poly(methyl methacrylate), and poly (2-vinyl pyridine) probed by dye reorientation // Soft Matter. 2012. Vol. 8. Iss. 3. P. 819–826. DOI: 10.1039/c1sm06501g.
12. Wilkes C. E., Daniels C. A., Summers J. W., Krauskopf L. G., Godwin A. PVC Handbook. Munich : Hanser Publications, 2005. 723 p.
13. Ivanchev S. S., Ozerin A. N. Nanostructures in polymer systems // Polymer Science Series B. 2006. Vol. 48. Iss. 4. P. 213–225. DOI: 10.1134/s1560090406070153.
14. Islamov A. M., Fakhrutdinova V. Kh. Surface modification of PVC by silica sol // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 890. 012083. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012083.
15. Ahmed R. M., Ibrahim A. A., El-Bayoumi A. S., Atta M. M. Structural, mechanical, and dielectric properties of polyvinylchloride/graphene nano platelets composites //

- International Journal of Polymer Analysis and Characterization. 2021. Vol. 26. Iss. 1. P. 68–83. DOI: 10.1080/1023666x.2020.1845493.
16. Mindivan F., Göktaş M., Dike A. S. Mechanical, thermal, and micro- and nanostructural properties of polyvinyl chloride/graphene nanoplatelets nanocomposites // Polymer Composites Volume. 2020. Vol. 41. Iss. 9. P. 3707–3716. DOI: 10.1002/pc.25669.
  17. Буракова Е. А., Мележик А. В., Герасимова А. В. Получение устойчивых дисперсий графеновых нанопластинок // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. № 4 (24). С. 196–204.
  18. Baltá Calleja F. J., Fakirov S. Microhardness of Polymers. New York : Cambridge University Press, 2000. 237 p.
  19. Flores A., Ania F., Baltá-Calleja F. J. From the glassy state to ordered polymer structures: A microhardness study. 2009. Vol. 50. Iss. 3. P. 729–746 DOI: 10.1016/j.polymer.2008.11.037.
  20. Гудь В. Н., Колупаев Б. С. ИК-спектроскопическое исследование воды сорбированной полимерами различной полярности // Пластические массы. 2011. № 3. С. 44–47.

**Islamov Anvar Makhmutovich**

candidate of technical sciences, senior lecturer

Email: iam16@yandex.ru

**Fakhrutdinova Venera Khafizovna**

candidate of chemical sciences, associate professor

Email: faxrutdinova1963@mail.ru

**Abdrakhmanova Lyailya Abdullova**

doctor of technical sciences, professor

Email: laa@kgasu.ru

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Zakirova Kamila Il'gamovna**

engineer

Email: kamilka.zakirova@mail.ru

**LLC «Stroy Engineering»**

The organization address: 445045, Russia, Togliatti, Yaroslavskaya st., 12

## Surface modification of PVC by aqueous colloidal dispersion of graphene nanoplates

### Abstract

*Problem statement.* In the work the authors investigated the possibility of using an aqueous colloidal dispersion of graphene nanoplates for surface modification of PVC and its effect on the properties of the resulting composites.

*Results.* It has been shown that as a result of diffusion impregnation of PVC in the colloidal dispersion of graphene nanoplastics to an optimal degree of swelling (0.17 %) and subsequent temperature exposure in the surface layers of composites, ordered structures are formed, which leads to an increase in surface microhardness (by 36 %), abrasion resistance (by 81 %), etc.

*Conclusions.* The significance of the results for the construction industry lies in the development of technological parameters for the diffusion modification of PVC to obtain products with enhanced surface properties and high resistance to various operational factors.

**Keywords:** polyvinylchloride, graphene nanoplates, diffusion, swelling, gradient.

**For citation:** Islamov A. M., Fakhrutdinova V. K., Abdrakhmanova L. A., Zakirova K. I. Surface modification of PVC by aqueous colloidal dispersion of graphene nanoplates // Izvestija KGASU. 2021. № 2 (56). P. 13–21. DOI: 10.52409/20731523\_2021\_2\_13.



## References

1. Abdrakhmanova L. A., Khatimirov A. G., Nizamov R. K., Khozin V. G. Wood-polymer nanomodified polyvinyl chloride building composites // Vestnik MGSU. 2018. Vol. 4. P. 426–434. DOI: 10.22227/1997–0935.2018.4.426-434.
2. Abdrakhmanova L. A., Khuziakhmetova K. R., Nizamov R. K., Khozin V. G. Modifiers for rigid PVC compositions for construction purposes. Stroitel'nye materialy. 2020. Vol. 12. P. 34–39. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-787-12-34-39.
3. Sabbatini L. Polymer Surface Characterization. Berlin : De Gruyter, 2014. 308 p.
4. Wolf R.A. Plastic surface modification: surface treatment and adhesion. Munich : Carl Hanser Verlag, 2016. 244 p.
5. Mincheva R., Raquez J. M. The Surface of Polymers // Surface Modification of Polymers: Methods and Applications. 2019. Iss. 1. P. 1–30. DOI: 10.1002/9783527819249.ch1.
6. Grace J. M., Gerenser L. J. Plasma treatment of polymers // Journal of Dispersion Science and Technology. 2003. Vol. 24. Iss. 3-4. P. 305–341. DOI: 10.1081/dis-120021793.
7. Nazarov V. G. Surface modification of polymers. M. : MGUP, 2008. 474 p.
8. Kharitonov A. P., Kharitonova L. N. Surface modification of polymers by direct fluorination. A convenient approach to improve commercial properties of polymeric articles // Pure and Applied Chemistry. 2009. Vol. 81. Iss. 3. P. 451–471. DOI: 10.1351/pac-con-08-06-02.
9. Sacristán J., Reinecke H., Mijangos C. Surface modification of PVC films in solvent-non solvent mixtures // Polymer. 2000. Vol. 41. Iss. 15. P. 5577–5582. DOI: 10.1016/s0032-3861(99)00784-3.
10. Volynskiy A. L., Yarysheva A. Yu., Rukhlya E. G., Yarysheva L. M., Bakeev N. F. Specific features of structure and properties of solutions, melts and solid states of polymers in confined nanometric volumes // Uspekhi khimii. 2014. Vol. 83. Iss. 11. P. 1003–1026.
11. Paeng K., Richert R., Ediger M. D. Molecular mobility in supported thin films of polystyrene, poly (methyl methacrylate), and poly (2-vinyl pyridine) probed by dye reorientation // Soft Matter. 2012. Vol. 8. Iss. 3. P. 819–826. DOI: 10.1039/c1sm06501g.
12. Wilkes C. E., Daniels C. A., Summers J. W., Krauskopf L. G., Godwin A. PVC Handbook. Munich : Hanser Publications, 2005. 723 p.
13. Ivanchev S. S., Ozerin A. N. Nanostructures in polymer systems // Polymer Science Series B. 2006. Vol. 48. Iss. 4. P. 213–225. DOI: 10.1134/s1560090406070153.
14. Islamov A. M., Fakhrutdinova V. Kh. Surface modification of PVC by silica sol // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 890. 012083. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012083.
15. Ahmed R. M., Ibrahiem A. A., El-Bayoumi A. S., Atta M. M. Structural, mechanical, and dielectric properties of polyvinylchloride/graphene nano platelets composites // International Journal of Polymer Analysis and Characterization. 2021. Vol. 26. Iss. 1. P. 68–83. DOI: 10.1080/1023666x.2020.1845493.
16. Mindivan F., Göktaş M., Dike A. S. Mechanical, thermal, and micro- and nanostructural properties of polyvinyl chloride/graphene nanoplatelets nanocomposites // Polymer Composites Volume. 2020. Vol. 41. Iss. 9. P. 3707–3716. DOI: 10.1002/pc.25669.
17. Burakova E. A., Melezhhik A. V., Gerasimova A. V. Obtaining stable dispersions of graphene nanoplates // Nauchno-tehnicheskiye vedomosti CPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. Vol. 24. Iss. 4. P. 196–204.
18. Baltá Calleja F. J., Fakirov S. Microhardness of Polymers. New York : Cambridge University Press, 2000. 237 p.
19. Flores A., Ania F., Baltá-Calleja F. J. From the glassy state to ordered polymer structures: A microhardness study. 2009. Vol. 50. Iss. 3. P. 729–746 DOI: 10.1016/j.polymer.2008.11.037.
20. Gud' V. N., Kolupaev B. S. IR-spectroscopic study of water sorbed by polymers of different polarity // Plasticheskiye massy. 2011. Iss. 3. P. 44–47.