
**СИНТЕЗ И ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕРОВ
И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ**

**SYNTHESIS AND PROCESSING OF POLYMERS
AND POLYMERIC COMPOSITES**

ISSN 2410-6593 (Print), ISSN 2686-7575 (Online)

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-2-176-183>

УДК 661.717.5



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

**Разработка композиции на основе полимочевины
с увеличенным сроком жизни**

С.В. Романов¹, О.А. Ботвинова¹, Е.А. Тимаков², Л.А. Чижова², Ю.Т. Панов^{2,@}

¹Производственная компания «Эласт ПУ», Владимир, 600026 Россия

²Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, 600014 Россия

@Автор для переписки, e-mail: tpp_vlgu@mail.ru

Аннотация

Цели. Совершенствование технологии получения полимерных напыляемых покрытий на основе поликарбодиимидов (полимочевин), с высокой химической, гидролитической и абразивной стойкостью и улучшенными физико-механическими показателями, а также, получение полимочевинных композиций с временем жизни не менее 5 мин без потери эксплуатационных характеристик (полимочевин «ручного» нанесения), пригодных для ремонта уже эксплуатирующихся покрытий.

Методы. Скорость реакции между изоцианатными и аминогруппами практически в сто раз превышает скорость реакции между изоцианатными и гидроксильными группами, что вызывает необходимость использовать специальные высокопроизводительные установки высокого давления, оснащенные самоочищающимися смесительными камерами и обогревом компонентов. У полученных материалов определяли прочность, удлинение на разрыв по стандартной методике, истираемость по Таберу и твердость по Шору.

Результаты. Исследованы три способа замедления реакции: во-первых, синтез предполимеров с содержанием NCO-групп от 10.5% до 18%; во-вторых, введение в предполимер пластификатора в количестве 1–10 масс.ч.; в-третьих, введение в композицию полиэфиров и получения «гибридных» систем. Показано, что только «гибридные» системы при использовании полиэфиров с молекулярной массой 2000 Да, в количестве 14% позволяют получить композиции с временем жизни более 5 мин. При этом прочность на разрыв снижается на 20%, истираемость увеличивается на 40%, но такие «гибридные» системы имеют более высокую силу адгезии и дешевле по сравнению с чистыми полимочевинами, что позволяет использовать их в качестве «ремонтных» систем.

Выводы. Разработанный состав и технология нанесения «гибридных» систем позволяют производить ремонтные работы существующих покрытий без применения специализированных устройств. Полимочевина «ручного» нанесения удобна в эксплуатации и не требует специальной подготовки.

Ключевые слова: полимочевина, время жизни, полимерные покрытия, физико-механические свойства

Для цитирования: Романов С.В., Ботвинова О.А., Тимаков Е.А., Чижова Л.А., Панов Ю.Т. Разработка композиции на основе полимочевины с увеличенным сроком жизни. *Тонкие химические технологии*. 2021;16(2):176–183. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-2-176-183>

RESEARCH ARTICLE

Development of a polyurea-based composition with an extended life span

Sergei V. Romanov¹, Olga A. Botvinova¹, Evgenii A. Timakov², Larisa A. Chizhova², Yuri T. Panov^{2,*}

¹Production Company Elast PU, Vladimir, 600026 Russia

²Alexander and Nikolay Stoletovs Vladimir State University, Vladimir, 600014 Russia

*Corresponding author, e-mail: tpp_vlgu@mail.ru

Abstract

Objectives. Improvement of the technology for obtaining polymer-sprayed coatings based on polycarbodiimides (polyureas) with high chemical, hydrolytic, and abrasive resistance and improved physical and mechanical properties, as well as obtainment of polyurea compositions with a lifetime of at least 5 min without loss performance characteristics (i.e., “hand-applied” polyureas) suitable for repair of coatings already in use.

Methods. The reaction rate between isocyanate and amino groups is almost a hundred times higher than that between isocyanate and hydroxyl groups, necessitating the use of special high-performance and high-pressure installations equipped with self-cleaning mixing chambers and heating of components. The following are determined from the obtained materials: strength, elongation at break according to the standard method, Taber abrasion, and Shore hardness.

Results. Three methods of slowing down the reaction are investigated: 1) the synthesis of prepolymers with the content of NCO groups from 10.5% to 18%; 2) the addition of a plasticizer into the prepolymer in the amount of 1–10 mass parts; and 3) the introduction of polyesters into the composition and radiation of the so-called “hybrid” systems. When using 14% polyesters with a molecular weight of 2000 Da, only “hybrid” systems make it possible to obtain compositions with a lifetime of more than 5 min. At the same time, the tensile strength decreases by 20%, and the abrasion increases by 40%; however, such “hybrid” systems have a higher adhesion force and are cheaper than pure polyureas, allowing them to be used as “repair” systems.

Conclusions. The developed composition and technology of applying “hybrid” systems allow for the repair of existing coatings without using specialized devices. “Manual” polyurea is easy to use and does not require special training.

Keywords: polyurea, lifetime, polymer coatings, physical and mechanical properties

For citation: Romanov S.V., Botvinova O.A., Timakov E.A., Chizhova L.A., Panov Yu.T. Development of a polyurea-based composition with an extended life span. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2021;16(2):176–183 (Russ., Eng.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-2-176-183>

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы технология получения полимерных напыляемых покрытий на основе поликарбодиимидов (полимочевин), развивается опережающими темпами, что связано с высокой химической, гидролитической и абразивной стойкостью этих покрытий, а также их отличными физико-механическими показателями^{1,2}. Широкий спектр свойств, который можно получить благодаря изменению состава полимочевинной композиции, делает ее пригодной для применения во многих сферах: в строительстве [1, 2], в сфере защиты горно-обогатительного оборудования [3, 4]. В отличие от полиуретана и резины, которые также активно применяются в горно-обогатительной отрасли, полимочевину можно наносить в качестве футеровочного состава не только в заводских условиях, и нет ограничений по геометрии защищаемой поверхности.

Целью данной работы являлась разработка ремонтных составов, которые можно наносить вручную на любые самые сложные поверхности. При этом, свойства таких составов должны быть сопоставимы со свойствами исходного полимочевинного покрытия. Данная цель была достигнута применением гибридных «полиуретан-полимочевинных»

покрытий. При разработке этой системы авторы исходили из теоретических предпосылок, изложенных в работе С.В. Романова (см. сноску 1).

Полимочевины – идеальный материал для покрытия больших поверхностей, обладающий высокой прочностью и низкой истираемостью, который можно наносить на поверхность только с использованием установок высокого (более 100 атм.) давления. После гарантийного срока эксплуатации на покрытия появляются трещины, сколы, которые необходимо устранить. Для таких случаев применяется композиция ручного нанесения, контактирующая, в основном, с исходной полимочевинной, адгезия к которой априори очень высока.

В связи с очень коротким временем жизни композиции для получения полимочевины в технологии нанесения покрытия используют только установки высокого давления, оснащенные самоочищающейся смесительной камерой и обогревом компонентов [5, 6]. Этот фактор обуславливает еще один неоспоримый плюс полимочевин, заключающийся в их практически полной нечувствительности к окружающей влаге.

Схематично реакция образования полимочевины представлена на рис. 1.

Дизамещенная мочевина взаимодействует с изоцианатной группой, образуя биурет, как показано на рис. 2.

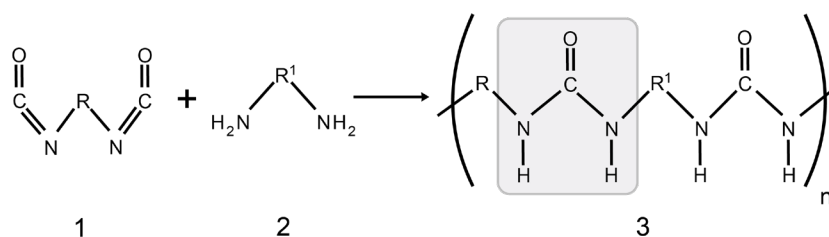


Рис. 1. Схема образования полимочевины: 1 – диизоцианат, 2 – полиэфирамин, 3 – полимочевина.

Fig. 1. Process of the polyurea formation: (1) diisocyanate, (2) polyester amine, and (3) polyurea.

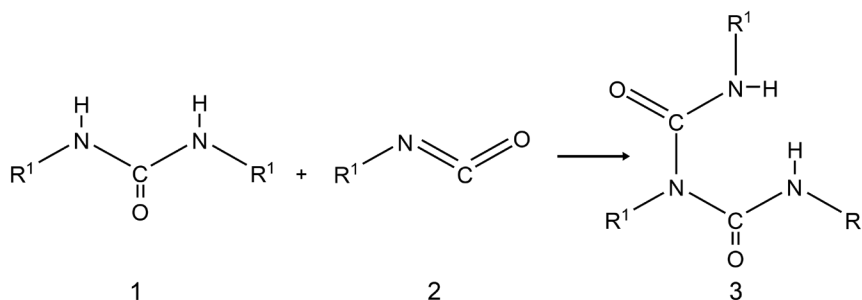


Рис. 2. Схема получения биурета: 1 – дизамещенная мочевина, 2 – изоцианат, 3 – биурет.

Fig. 2. Biuret production process: (1) disubstituted urea, (2) isocyanate, and (3) biuret.

¹ Романов С.В. Напыляемые полимочевины с увеличенным сроком эксплуатации в экстремальных условиях: дис. канд. техн. наук. Казань: КНИТУ; 2019. 127 с. [Romanov S.V. Sprayable polyureas with extended service life in extreme conditions: Cand. Sci. Thesis. Kazan: KNR TU; 2019. 127 p. (in Russ.).]

² Тимакова К.А. Разработка состава и технологии производства одноупаковочного не вспенивающегося полиуретанового герметика на основе отечественных полиэфиров: дис. канд. техн. наук. Владимир: ВГУ; 2018. 136 с. [Timakova K.A. Development of the composition and production technology of one-pack non-foaming polyurethane sealant based on domestic polyesters: Cand. Sci. Thesis. Vladimir: VGU; 2018. 136 p. (in Russ.).]

Принято называть изоцианатный компонент компонентом Б. Он представляет собой предполимер, содержащий изоцианатные группы на концах макромолекулы, что дает право отнести полимочевину к классу полиуретановых покрытий [5, 6].

Доля рынка полимочевинных продуктов растет с каждым годом. Вместе с этим растет и количество проблем, связанных с этим продуктом. Одной из актуальных задач является решение необходимости локального ремонта полимочевинных покрытий. Экономически нецелесообразно для каждого ремонта использовать полимочевину с коротким временем жизни, которую невозможно нанести без помощи специального оборудования. Именно поэтому в настоящее время ведутся работы по замедлению реакции получения полимочевины [7].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для получения полимочевинного покрытия были использованы следующие материалы: в качестве аминного компонента (компонента А) использовалась смесь Джеффамин Д-2000 (смесь полиоксипропиленаминов с молекулярной массой ~2000 Да); Джеффамин Т-5000 (смесь полиоксипропиленаминов с молекулярной массой ~5000 Да) (*Houfa*, China), Дедта 80 (*Dow Chemical Company*, Мидленд, Мичиган, США) и Полилинк 4200 (*ACETO GmbH*, Германия) в качестве сшивающих агентов, а также промотор адгезии Силквест А187 (*Momentive*, Россия).

В качестве изоцианатного компонента (компонента Б) использовался предполимер, синтезированный из пропиленгликоля и полиизоцианата, марки «Millionate MR200», (*Химпраст*, Россия) с массовой долей NCO-групп 10.5–18% [7–10]. Кроме того, в работе применяли: пластификатор – диоктилфталат (*Витахим*, Россия) и модификатор – простой полиэфир «Корадол 56-200» с молекулярной массой 2000 Да (*Химсейл*, Россия).

Методика приготовления предполимера аналогична описанной в вышеуказанной работе Романова.

Прочность при разрыве и относительное удлинение образцов определялись по стандартным методикам на универсальной разрывной машине «GP2DLC-0.5» (*Точприбор*, Россия). Определение прочности при разрыве и относительного удлинения при разрыве, проводили по ГОСТ 21751-76³ на образцах-лопатках типа 1 толщиной 3.0 ± 0.2 мм при скорости движения зажима разрывной машины 100 мм/мин.

³ ГОСТ 21751-76. Метод определения условной прочности, относительного удлинения при разрыве и относительной остаточной деформации после разрыва. М.: Издательство стандартов; 1983. [GOST 21751-76 Sealants. Determination method of tensile strength, ultimate elongation at break and deformation set after break. Moscow: Izd. Standartov; 1983.]

Истирание по Таберу определяли на установке «Taber Rotary Platform Abrasion Tester Model 5135/5155» (*TABER® Industries*, США), диск Н18, 1000 циклов. Твердость определяли по ГОСТ 263-75⁴ на приборе для измерения твердости материала по Шору А, на образцах толщиной 6 мм на установке «ТВР-D» (*Метротест*, Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полимочевина стала отличным решением для гидроизоляции больших площадей. Время жизни этой двухкомпонентной системы в классическом ее исполнении не превышает 10–15 с [11–13].

С таким коротким временем жизни связан как ряд преимуществ, так и ряд недостатков. В первую очередь, это необходимость в дорогостоящем и сложном в обслуживании оборудовании, что в значительной степени сдерживает применение полимочевинных систем.

В настоящее время принято классифицировать полимочевинные системы по времени жизни следующим образом:

– «Классическая» полимочевина – время жизни до 20 с.

– «Медленная» полимочевина – время жизни от 3 до 4 мин.

– «Ручная» полимочевина – время жизни более 5 мин.

За время жизни принимается время гелеобразования, т.е. время, по прошествии которого композиция перестает стекать со стеклянной палочки.

Нанесение «классических» и «медленных» полимочевин невозможно без аппаратов высокого давления, поэтому они не могут быть использованы при выполнении большинства локальных ремонтов. «Ручные» полимочевины не требуют специального оборудования, время жизни композиции позволяет наносить их с помощью ручного перемешивания.

В отличие от «классических» полимочевин, «ручные» системы изучены мало.

Для исследований по замедлению полимочевинных композиций были синтезированы предполимеры с содержанием NCO-групп от 10.5% до 18%.

Известно, что при снижении содержания NCO-групп в системе уменьшается и скорость реакции, но это снижение весьма невелико (таблица).

Как видно из таблицы, снижение содержания NCO-групп в компоненте Б приводит к снижению твердости покрытий, что не допустимо. Чтобы этого избежать, в дальнейших исследованиях целесообразно опираться на рецептуру с содержанием NCO-групп не менее 12.5%.

⁴ ГОСТ 263-75. РЕЗИНА. Метод определения твердости по Шору А. Москва: Издательство стандартов; 1989. [GOST 263-75. Rubber. Method for determination of Shore A hardness. Moscow: Izd. Standartov; 1983.]

Эксплуатационные характеристики покрытий с разным содержанием NCO-групп в компоненте Б
Performance characteristics of coatings with different contents of the NCO-groups in component B

Содержание NCO-групп в компоненте Б, % Content of NCO groups in component B, %	Время жизни системы, с System lifetime, s	Твердость покрытия по Шору, ед. Shore hardness, units
10.5	14	60A
12.5	11	75A
14.0	9	80A
15.5	7	92A
18.0	5	70D

Первым этапом в решении этой задачи была выбрана стратегия введения в компонент А системы небольшого количества пластификатора.

На рис. 3 и 4 приведены графики зависимости времени жизни и эксплуатационных характеристик полимочевин от процентного количества пластификатора в системе.

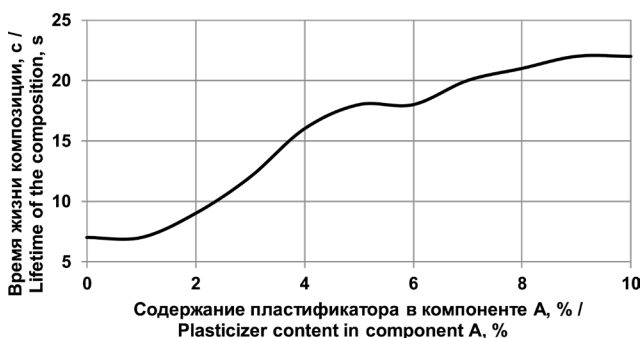


Рис. 3. Зависимость времени жизни композиции от процентного содержания пластификатора в компоненте А системы.

Fig. 3. Dependence of the composition lifetime on the plasticizer percentage in component A of the system.

Из графиков видно, что максимально возможное количество пластификатора, которое можно ввести в компонент А системы, не превышает 5%. При добавлении большего количества пластификатора время жизни системы существенно увеличивается, но сильно падают физико-механические показатели. При добавлении 5% данные показатели практически не ухудшаются, а такие показатели, как истирание и относительное удлинение при разрыве даже несколько увеличиваются.

Однако время жизни системы удалось увеличить лишь незначительно. Этот показатель положительно сказывается на растекании полимочевинной системы, и, как следствие, на адгезии композиции к подложке. Полученное время не позволяет работать с этой системой без помощи дополнительного оборудования.

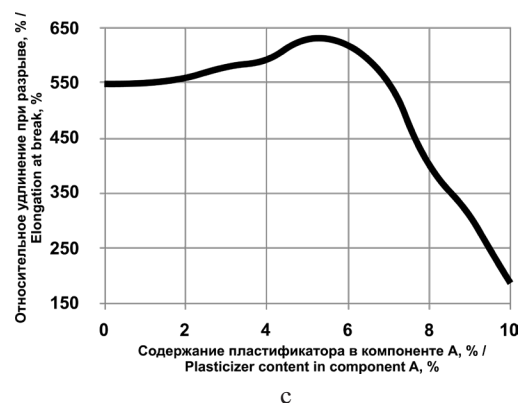
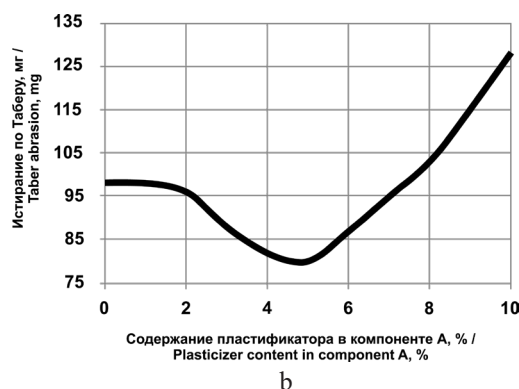
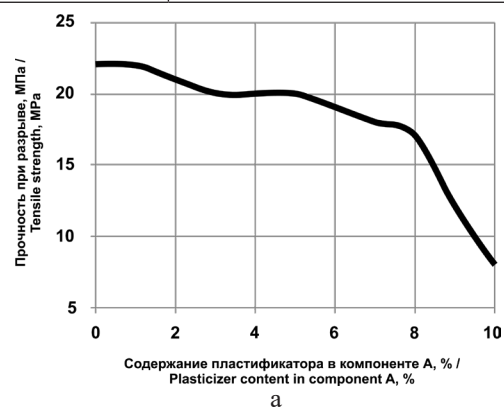


Рис. 4. Зависимость прочности на разрыв композиции (а), истирания (б) и относительного удлинения при разрыве (с) от процентного содержания пластификатора в компоненте А системы.

Fig. 4. Dependence of the tensile strength of the composition (a), abrasion (b), and elongation at break (c) on the plasticizer percentage in component A of the system.

На наш взгляд основным решением для замедления образования полимочевин является перевод системы в разряд «гибридных» систем, в которых наряду с полиэфирами в компонент А вводятся полиэфиры – Корадол 56-200. Как следствие, во время реакции образуются и полимочевинные и полиуретановые группы.

«Гибридные» системы имеют ряд преимуществ. Время жизни таких систем несколько больше, поэтому они лучше растекаются, имеют высокую адгезию, хорошо принимают сложную геометрию защищаемой поверхности. Они несколько дешевле в сравнении с чистыми полимочевинами, а по эксплуатационным характеристикам мало им уступают. Однако в связи с их химическим составом, их чувствительность к влаге значительно повышается, что делает невозможным работу с ними во влажном климате или при плохих погодных условиях.

Для исследований были выбраны полиэфиры с большими молекулярными массами. Ожидалось, что дополнительные пространственные затруднения дадут дополнительное увеличение времени жизни системы.

На рис. 5 и 6 приведены графики времени жизни системы, а также основные физико-механические показатели в зависимости от процентного содержания полиэфира (молекулярной массой 2000 Да) в компоненте А системы.

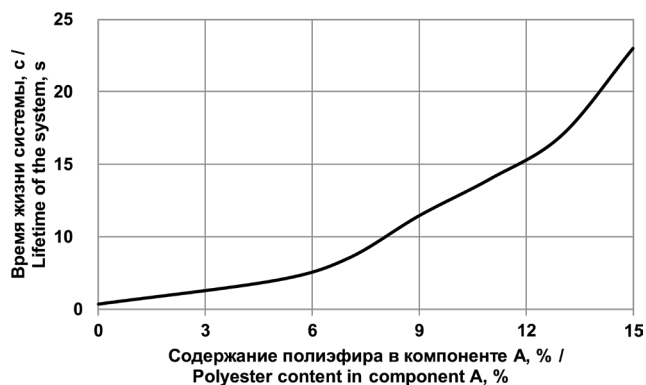


Рис. 5. Зависимость времени жизни композиции от содержания полиэфира в компоненте А системы.

Fig. 5. Dependence of the composition lifetime on the polyester content in component A of the system.

Видно, что введение высокомолекулярного полиэфира позволяет увеличить время жизни полимочевинной композиции до требуемых величин (5 мин) и повысить ее истираемость, при этом, прочность на разрыв и относительное удлинение снижаются до допустимого уровня. Это позволяет применять данную систему как «ручную».

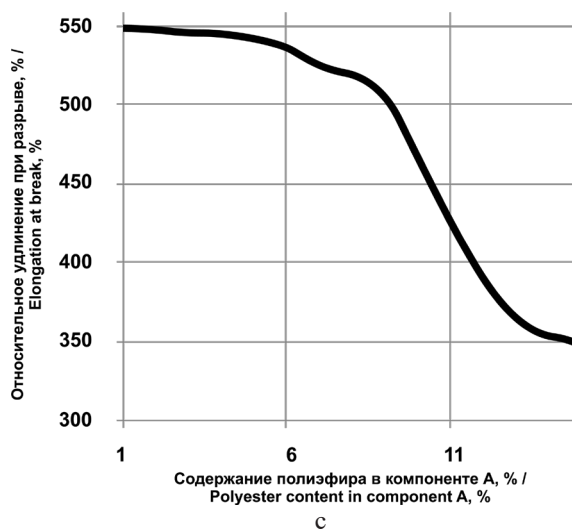
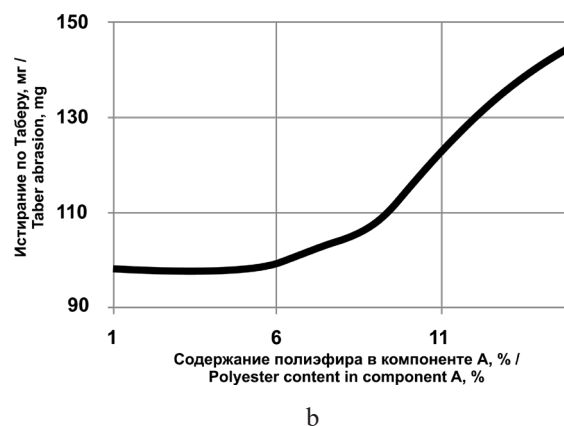
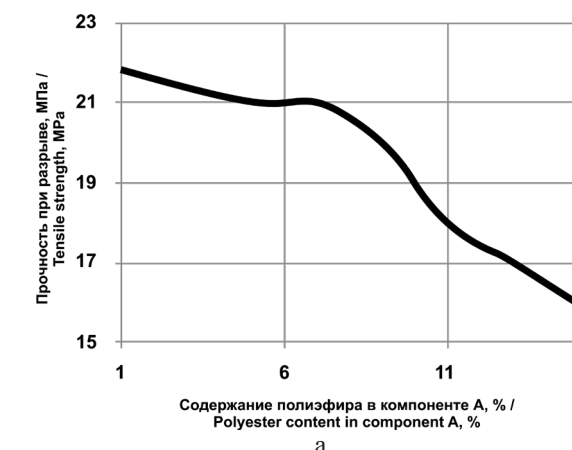


Рис. 6. Зависимость прочности на разрыв (а), истирания композиции (b) и относительного удлинения при разрыве (с) от содержания полиэфира в компоненте А системы.

Fig. 6. Dependence of the tensile strength (a), composition abrasion (b), and elongation at break (c) on the polyester content in component A of the system.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получена полимочевинная композиция со временем жизни более 5 мин, т.е. со скоростью отверждения примерно в 30 раз медленнее исходной композиции,

за счет частичной замены аминных групп на менее активные – гидроксильные и путем введения в систему простого полиэфира с молекулярной массой ~2000 Да в количестве 10–15%. Полученные системы обладают требуемыми прочностными характеристиками и более высокими адгезионными свойствами. Показано, что данную композицию «ручного» нанесения можно использовать для ремонта полимочевинных покрытий без применения установок высокого давления.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследование.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the study.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Szycher M. *Szycher's handbook of polyurethanes*. Boca Raton: Taylor & Francis Group CRC Press; 2013. 1092 p.
2. Ryszkowska J. Supramolecular structure, morphology and physical properties of urea-urethane elastomers. *Polimery*. 2012;57(11–12):775–902. Available from URL: <https://studylib.net/doc/18145915/supramolecular-structure--morphology-and-physical-property>
3. Wolf A.T. (Ed.). Durability of Building and Construction Sealants and Adhesives. V. 3. *Journal of ASTM International Selected Technical Papers STP1545*. 2010. XVII. 417 p. ISBN 978-0-8031-3426-3.
4. Stengard R.A. High-pressure impingement mixing-route to faster, better PU parts. *Plast. Tech*. 1974;41–44.
5. Zafar F., Sharmin E. *Polyurethane*. Rijeka, Croatia: InTech; 2012. 480 p. ISBN 978-953-51-0726-2
6. Saunders J.H., Hansen R.H. The mechanism of foam formation. In: *Plastic foams*. Part 1. Frisch K.C., Saunders J.H. (Eds.). New York: Marcel Dekker; 1972. P. 3–108.
7. Botvinova O.A., Panov Y.T., Romanov S.V. Producing Bicomponent Sealants Based on Polyaspartate Urea Resins. *Polym. Sci. Ser. D*. 2020;13(4):407–413. <https://doi.org/10.1134/S1995421220040048>

8. Steiner E.C., Pelletier R.R., Trucks R.O. A study of the polymerization of propylene oxide catalyzed by anhydrous potassium hydroxide. *J. Amer. Chem. Soc*. 1964;86(21):4678–4686. <https://doi.org/10.1021/ja01075a031>
9. Van Maris R., Tamano Y., Yoshimura H., Gay K.M. Polyurethane Catalysis by Tertiary Amines. *J. Cell. Plast*. 2005;41(4):305–322. <https://doi.org/10.1177%2F0021955X05055113>
10. Ward R.S., Jones R.L. Polyurethanes and Silicone Polyurethane Copolymers. In book: *Comprehensive Biomaterials II*. V. 1. 2017. P. 570–619. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100691-7.00179-8>
11. Vahabi H., Rastin H., Movahedifar E., Antoun K., Brosse N., et al. Flame Retardancy of Bio-Based Polyurethanes: Opportunities and Challenges. *Polymers*. 2020;12(6):1234. <https://doi.org/10.3390/polym12061234>
12. Sándor N., Gelade E., van Maris R., Rácz G. Effect of melamine on the foam kinetics of polyurethane model system. *Models Chem*. 1997;134(2):253–263. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19980307\)67:10<1739::AID-APP7>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19980307)67:10<1739::AID-APP7>3.0.CO;2-K)
13. Vreenegoor N.C. The Foamax process for making flat-top flexible polyurethane slabstock foams. *Plast. Rub. Proc*. 1977;2(1):30–32.

Об авторах:

Романов Сергей Викторович, к.т.н., директор ООО «Эласт-ПУ» (Россия, 600026, Владимир, ул. Гастелло, д. 21а). E-mail: Romanov-elastpu@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5152-4678>

Ботвинова Ольга Андреевна, научный сотрудник лаборатории ООО «Эласт-ПУ» (Россия, 600026, Владимир, ул. Гастелло, д. 21а). E-mail: ermolaeva_olya@inbox.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0217-8446>

Тимаков Евгений Александрович, ассистент кафедры химических технологий Института архитектуры, строительства и энергетики ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (Россия, 600000, Владимир, ул. Горького, д. 87). E-mail: okakie@yandex.ru. Scopus Author ID 57219018403, <https://orcid.org/0000-0003-3312-0810>

Чижова Лариса Анатольевна, доцент кафедры химических технологий Института архитектуры, строительства и энергетики ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (Россия, 600000, Владимир, ул. Горького, д. 87). E-mail: lar-chizhova@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2838-2349>

Панов Юрий Терентьевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой химических технологий Института архитектуры, строительства и энергетики ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (Россия, 600000, Владимир, ул. Горького, д. 87). E-mail: tpp_vlgu@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-8528-1195>

About the authors:

Sergei V. Romanov, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Production Company Elast-PU (21a, Gastello ul., Vladimir, 600026, Russia). E-mail: Romanov-elastpu@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5152-4678>

Olga A. Botvinova, Researcher, Production Company Elast-PU (21a, Gastello ul., Vladimir, 600026, Russia). E-mail: ermolaeva_olya@inbox.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0217-8446>

Eugenii A. Timakov, Assistant, Chemical Technologies Department, Institute of Architecture, Construction, and Energy, Alexander and Nikolay Stoletovs Vladimir State University (87, Gor'kogo ul., Vladimir, 600026, Russia). E-mail: okakie@yandex.ru. Scopus Author ID 57219018403, <https://orcid.org/0000-0003-3312-0810>

Larisa A. Chizhova, Associate Professor, Chemical Technologies Department, Institute of Architecture, Construction, and Energy, Alexander and Nikolay Stoletovs Vladimir State University (87, Gor'kogo ul., Vladimir, 600026, Russia). E-mail: lar-chizhova@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2838-2349>

Yuri T. Panov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chemical Technologies Department, Institute of Architecture, Construction, and Energy, Alexander and Nikolay Stoletovs Vladimir State University (87, Gor'kogo ul., Vladimir, 600026, Russia). E-mail: tpp_vlgu@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-8528-1195>

Поступила: 11.12.2020; получена после доработки: 05.03.2021; принята к опубликованию: 12.04.2021.

The article was submitted: December 11, 2020; approved after reviewed: March 05, 2021; accepted for publication: April 12, 2021.