

УДК 678.6-1;678.027.7

О.С. Кабат <sup>а</sup>, Б.Г. Харченко <sup>б</sup>, А.Д. Деркач <sup>б</sup>, В.В. Артемчук <sup>в</sup>, В.Г. Бабенко <sup>а</sup>

## ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ФТОРОПЛАСТА И МЕТОД ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

<sup>а</sup> ГВУЗ “Украинский государственный химико-технологический университет”, г. Днепр<sup>б</sup> Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет<sup>в</sup> Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта

Разработаны полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе фторопласта-4, наполненного диоксидом кремния и метод их получения, который заключается в совмещении *in situ* исходных дисперсных частиц полимера с наполнителем в процессе его синтеза. Это позволяет значительно упростить изготовление изделий из исследуемых ПКМ за счет исключения операции перемешивания исходных компонентов на подготовительном этапе переработки, а соответственно и снизить их себестоимость. Проведены структурные исследования ПКМ, в результате которых установлено, что композиты на основе фторопласта и диоксида кремния, полученные с применением метода *in situ* совмещения исходных компонентов, имеют более упорядоченную структуру в сравнении с материалами, полученными по стандартной методике. Они также отличаются морфологией наполнителя в полимерной матрице, что объясняется особенностями его структурообразования при синтезе в присутствии исходного дисперсного полимера. Проведены сравнительные физико-механические, теплофизические и триботехнические исследования разработанных композитов. Установлено, что напряжение при пределе текучести при сжатии и температура размягчения по Вика ПКМ, полученных с применением метода *in situ* совмещения исходных компонентов, на 20–30%, превосходят аналогичные параметры для материалов, полученных по стандартному методу. При этом коэффициент трения и износ уменьшаются в 1,5–2,0 раза.

**Ключевые слова:** фторопласт-4, диоксид кремния, метод получения, структура, физико-механические, теплофизические и триботехнические свойства.

DOI: 10.32434/0321-4095-2019-124-3-116-122

### Вступление

Развитие науки и техники тесно связано с прогрессом в области материаловедения. Создание новых материалов, в большинстве случаев, приводит к значительному технологическому скачку в различных отраслях науки и техники. В соответствии с принципами, разработанными Европейской комиссией по ключевым технологиям (European Commission Key Enabling Technologies (KETs)) создание таких материалов является одной из наиболее приоритетных и актуальных задач.

Одним из наиболее перспективных материалов являются полимеры и полимерные композиционные материалы (ПКМ) на их основе [1–3]. Благодаря своим уникальным свойствам

они нашли применение практически во всех сферах жизнедеятельности человека. Из полимеров и ПКМ на их основе получают широкую номенклатуру изделий, начиная от посуды и заканчивая элементами ракет [4,5].

Однако, несмотря на уникальный набор характеристик, изделия из полимеров и ПКМ на их основе обладают рядом недостатков, а именно, невысокий уровень физико-механических и теплофизических свойств. Поэтому актуальной задачей является создание ПКМ на основе полимеров, изделия из которых будут обладать высоким уровнем данных свойств и привлекательной с экономической точки зрения себестоимостью.

В качестве исходной полимерной матрицы

для создания таких материалов был выбран фторполимер марки фторопласт-4, изделия из которого, благодаря уникальному набору свойств, нашли широкое применение в различных узлах машин и механизмов. Для удешевления изделий из фторопласта-4 и улучшения уровня их характеристик в полимерную матрицу добавляют дисперсные и волокнистые наполнители [6,7], благодаря которым направленно регулируют уровень свойств полученных ПКМ.

Одним из наиболее эффективных наполнителей, позволяющих максимально улучшить уровень свойств ПКМ на основе фторопласта-4 и уменьшить их стоимость в сравнении с исходным полимером, являются диоксиды кремния различных модификаций [8,9]. Эти наполнители обладают развитой поверхностью (до  $380 \text{ м}^2/\text{г}$ ) с большим количеством пор, микропор и субмикропор, что способствует физической адсорбции поверхностью наполнителя матричного полимера.

Изделия из ПКМ на основе фторопласта-4 и диоксидов кремния получают свободным спеканием. Метод переработки таких материалов обусловленный их структурой и химическим строением. Так температура плавления фторопласта-4 составляет ( $325\text{--}330^\circ\text{C}$ ), выше которой он превращается в аморфный материал, не переходящий из высокоэластичного в вязкотекучее состояние даже при температурах разложения (более  $420^\circ\text{C}$ ), что исключает переработку фторопласта-4 в изделия высокопродуктивными методами (литье по давлению, экструзия) из вязкотекучего состояния.

Метод свободного спекания ПКМ на основе фторопласта и диоксидов кремния состоит из трех основных этапов: подготовительный, основной и заключительный [10]. На подготовительном этапе проводят операции получения полимерной композиции с последующим ее брикетированием. На основном этапе происходит процесс спекания и охлаждения готовых изделий по заранее определенной методике. На заключительном этапе проводят операции механической обработки для придания готовым изделиям необходимого внешнего вида. Метод переработки ПКМ на основе фторопласта-4 достаточно сложен и энергозатратен, что приводит к увеличению себестоимости готовых изделий. Поэтому основной целью данной работы является не только создание ПКМ на основе фторопласта-4 с высоким уровнем свойств, а и упрощение метода их переработки без потери качества получаемых изделий.

### **Методика эксперимента**

#### **Объекты исследований**

В качестве полимерной матрицы использовали фторполимер марки фторопласт-4 (ГОСТ 1000780) производства ООО «ГалоПолимер Кирово-Чепецк» (г. Кирово-Чепецк), который является продуктом полимеризации тетрафторэтилена и представляет собой легко комкующийся порошок бело-голубого цвета с насыпной плотностью  $0,35\text{--}0,45 \text{ г}/\text{см}^3$ .

В качестве наполнителя использовали аморфный диоксид кремния – силикагель, который получали путем осаждения из водного-щелочного раствора метасиликата натрия. Полученный наполнитель имеет развитую поверхность со средним размером частичек  $5\text{--}10 \text{ мкм}$  (рис. 1).

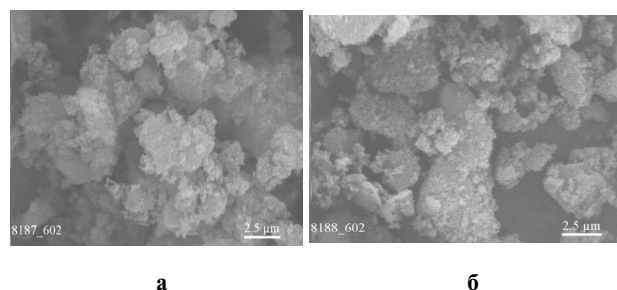


Рис. 1. Микрофотографии частичек силикагеля

#### **Методы исследований**

Микрофотографии частичек наполнителя и поверхностей сколов ПКМ получали на электронном микроскопе Superprobe-733 (Jeol). Рентгенофазовый анализ проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2 в монохроматизированном  $\text{Co-K}_\alpha$  излучении. Напряжения при пределе текучести при сжатии  $s_y$  определяли в соответствии с ISO 604 на универсальной разрывной машине «Heckert FP 100/1». Температуру размягчения по Вика определяли в соответствии с ISO 1183-1 на приборе FWV-633/10. Коэффициент трения и интенсивность линейного изнашивания при фрикционном взаимодействии ПКМ со сталью определяли на машине «2070 СМТ-1» при режиме трения без смазывания по схеме диск-колодочка. Использовали стальной образец из стали 45 с шероховатостью рабочей поверхности  $R_a=0,32 \text{ мкм}$  и твердостью  $45\text{--}50 \text{ HRC}$ .

#### **Результаты исследований и их обсуждение**

Цель работы достигается за счет использования принципиально нового метода переработки ПКМ на основе фторопласта-4 и диоксида кремния в изделие, заключающегося в совмещении *in situ* исходных компонентов полимерной композиции в процессе синтеза наполни-

теля.

В соответствии с разработанным методом дисперсный порошок фторопласта-4 добавляют в водно-щелочной раствор метасиликата натрия и при постоянном его перемешивании проводят процесс синтеза диоксида кремния, получаемого из геля, образованного при действии на реакционную среду 10% раствором соляной кислоты. Полученный гель с хаотично распределенными частичками дисперсного полимера высушивают, промывают в дистиллированной воде с целью удаления побочных продуктов (соль, кислотные остатки), проводят процесс повторной сушки и измельчения для получения полимерной композиции в виде дисперсного пресс-порошка. Дальнейшая его переработка осуществляется в соответствии со стандартным методом получения изделий из ПКМ на основе фторопласта.

Данный подход к переработке ПКМ на основе фторопласта-4 и диоксидов кремния позволяет значительно упростить метод получения изделий из них за счет исключения операции перемешивания исходных компонентов на подготовительном этапе переработки, а в соответствии с этим и снизить себестоимость изделий.

Изменение метода переработки исследуемых ПКМ в изделия будет оказывать влияние на их структуру. Для ее изучения были получены микрофотографии поверхностей сколов и рентгенограммы исследуемых материалов (рис. 2).

Как видно из приведенных микрофотографий поверхность скола ПКМ полученного с применением метода совмещения *in situ* исходных компонентов отличается более хрупким характером разрушения в сравнении с материалом, полученными по стандартной методике (рис. 2,а,б). Известно, что характер разрушения для полимеров и материалов на их основе непосредственно связан с их структурой [11]. Хрупкое разрушение характерно для материалов с

более высокой степенью упорядоченности структурных элементов в сравнении с пластичным.

Стоит отметить отличия в морфологии наполнителей входящих в состав изделий из исследуемых ПКМ. Так силикагель в ПКМ, полученных по стандартному методу, представляет собой частички неправильной округлой формы, а в материалах, полученных с применением метода совмещения *in situ* исходных компонентов имеет слоисто-волокнистую структуру (рис. 2,в,г). Изменение морфологии наполнителя связано с особенностями его структурообразования при синтезе в присутствии дисперсного полимера.

Результаты рентгенофазовых исследований ПКМ, полученных по стандартному методу и с применением метода совмещения *in situ* исходных компонентов, приведены на рис. 3.

Рентгенограммы исследуемых ПКМ имеют схожий характер. Они имеют два выраженных аморфных гало в области углов Вульфа-Брэгга  $15-30^\circ$  и  $35-55^\circ$ , характеризующие аморфную фазу и три наиболее интенсивных пика в области углов  $20-21^\circ$ ,  $25-27^\circ$  и  $37-38^\circ$ , характеризующих кристаллическую фазу исследуемых ПКМ. Проведя подсчет межплоскостных расстояний структурных элементов ПКМ, соответствующих данным пикам, и сравнив их значения со справочными данными [12], приходим к выводу, что пик в области углов Вульфа-Брэгга  $20-21^\circ$  характерен для фторопласта-4, а  $25-27^\circ$  и  $37-38^\circ$  – для диоксида кремния различных модификаций ( $\alpha$ -кварц и  $\alpha$ -кristобалит).

Стоит отметить, что на рентгенограммах ПКМ полученных с применением метода совмещения *in situ* исходных компонентов наблюдаются более интенсивные пики поглощения на протяжении всей исследуемой области углов Вульфа-Брегга. Это свидетельствует об больших значениях соотношения кристаллической и аморфных фаз данных ПКМ в сравнении с материалами, полученными по стандартному методу.

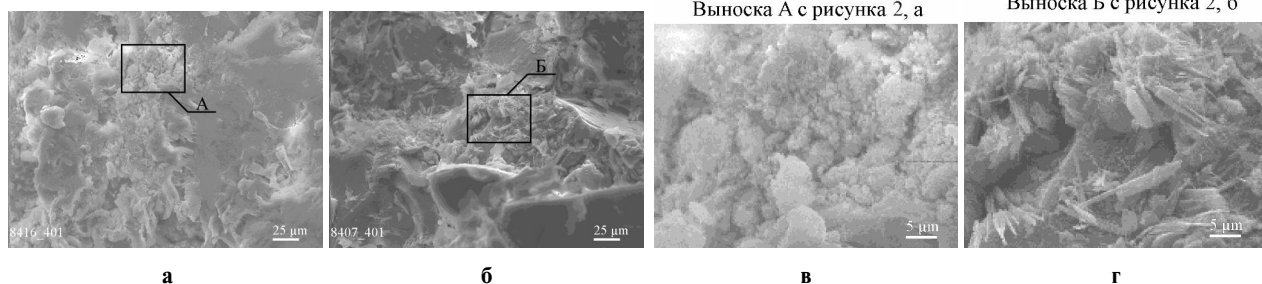


Рис. 2. Микрофотографии поверхностей сколов ПКМ полученных стандартным методом (а,в) и с применением метода совмещения *in situ* исходных компонентов (б,г)

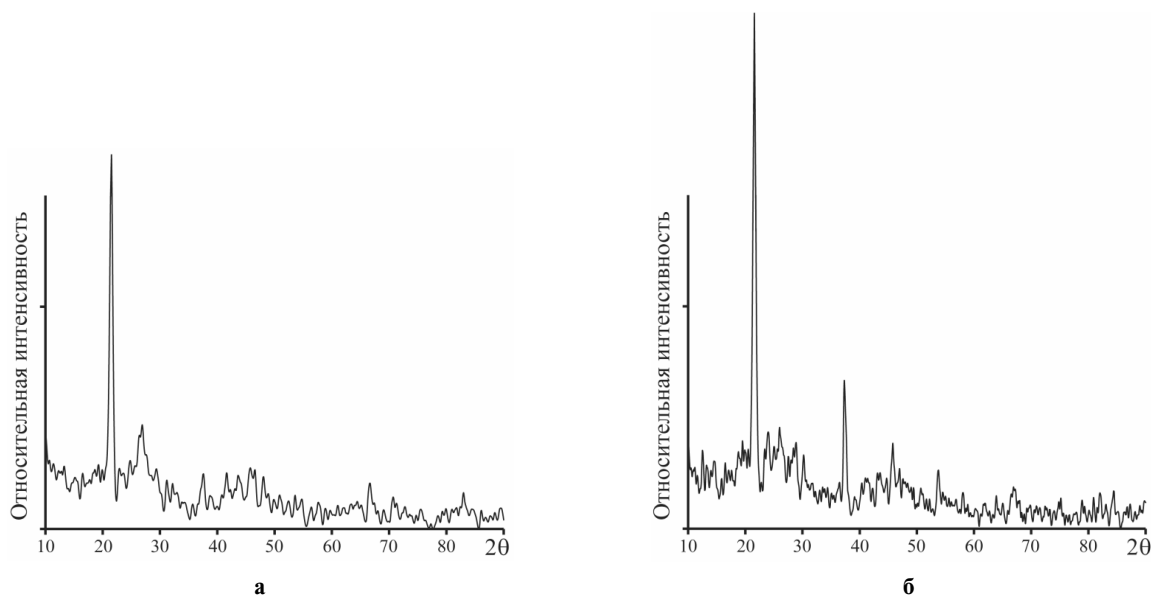


Рис. 3. Рентгенограммы ПКМ, полученных стандартным методом (а) и с применением метода совмещения *in situ* исходных компонентов (б)

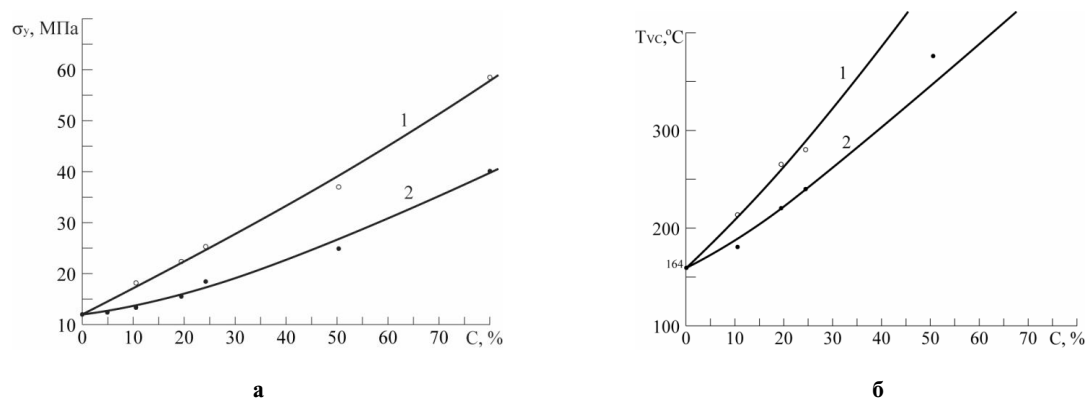


Рис. 4. Зависимости (а) напряжения при пределе текучести при сжатии ( $\sigma_y$ ) и (б) температуры размягчения по Вика ( $T_{vc}$ ) ПКМ полученных по стандартному методу (2) и с применением метода совмещения *in situ* исходных компонентов (1) от концентрации (С) наполнителя

Исходя из полученных микрофотографий и рентгенофазового анализа исследуемых материалов, можно сделать вывод, что ПКМ, полученные с применением метода совмещения *in situ* исходных компонентов, отличаются большей степенью упорядоченности структурных элементов в сравнении с материалами, полученными по стандартному методу. Изменение структуры разработанных ПКМ будет оказывать влияние на уровень свойств получаемых из них изделий.

Поэтому представляет интерес изучить влияние метода переработки ПКМ на уровень их основных физико-механических, теплофизических и триботехнических свойств.

В качестве физико-механических и теплофизических свойств изучали показатели напря-

жения при пределе текучести при сжатии ( $\sigma_y$ ) и температуру размягчения по Вика ( $T_{vc}$ ) исследуемых ПКМ. Их значения для материалов, полученных по стандартному методу и с применением метода совмещения *in situ* исходных компонентов, в зависимости от концентрации наполнителя приведены на рис. 4.

Как видно из результатов исследований, характер зависимостей напряжения при пределе текучести при сжатии и температуры размягчения по Вика от концентрации наполнителя для ПКМ, полученных по стандартной методике и с применением метода совмещения *in situ* исходных компонентов, подобный. Так, при увеличении содержания наполнителя в полимерной матрице до 80 мас.% наблюдается повышение уровня характеристик исследуемых матери-

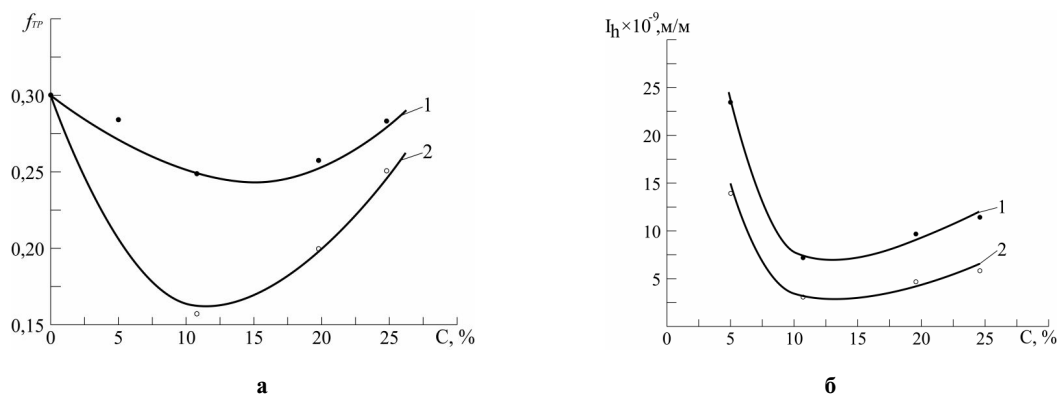


Рис. 5. Зависимости (а) коэффициента трения ( $f_{тр}$ ) и (б) интенсивности линейного износа ( $I_n$ ) ПКМ, полученных по стандартной методике (1) и с применением метода совмещения *in situ* исходных компонентов (2) от концентрации (С) наполнителя

алов.

При этом ПКМ, полученные с применением метода совмещения *in situ* исходных компонентов, по уровню исследованных свойств на 20–30% превосходят аналоги, полученные по стандартному методу. Это является следствием изменения их структуры при совмещении исходного дисперсного полимера с силикагелем в процессе синтеза наполнителя и дальнейшей переработке в изделия.

Представляет интерес изучить влияние метода переработки ПКМ на уровень их триботехнических свойств. Исходя из предыдущих исследований [8,13] были выбраны материалы с содержанием наполнителя до 25 мас.%. Полученные результаты приведены на рис. 5.

Как видно из приведенных результатов, характер концентрационных зависимостей коэффициента трения и интенсивности линейного износа материалов, полученных по стандартному методу и с применением метода совмещения *in situ* исходных компонентов, подобный. На зависимостях наблюдаются ярко выраженные экстремумы в области содержания наполнителя 11–14 мас.%. Следует отметить, что ПКМ полученные с применением метода совмещения *in situ* исходных компонентов, имеют лучший уровень триботехнических свойств в сравнении с ПКМ, полученными по стандартному методу. В оптимальной области концентраций наполнителя значения коэффициента трения и интенсивности линейного износа данных материалов уменьшаются в 1,5 и 2,0 раза в сравнении с аналогичными параметрами у ПКМ, полученных по стандартной методике. Это связано с увеличением упорядоченности структурных элементов и изменением морфологии наполнителя. Из-

вестно [14], что полимеры с более высокой степенью упорядоченности структурных элементов обладают лучшим уровнем триботехнических свойств, а наполнители слоистой структуры способствуют уменьшению трения и износа материалов, находящихся во фрикционном взаимодействии.

#### Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что применение метода совмещения *in situ* исходных компонентов при создании ПКМ на основе фторопласта и силикагеля позволяет упростить метод переработки их в изделие за счет отказа от операции перемешивания дисперсного полимера с наполнителем. Это приводит к снижению себестоимости готовых изделий из исследуемых ПКМ.

Установлено, что использование различных методик получения ПКМ приводит к изменению их структуры. Композиты, полученные с применением метода совмещения *in situ* исходных компонентов, отличаются большей степенью упорядоченности структурных элементов в сравнении с материалами, полученными по стандартному методу.

Исследовано влияние метода переработки ПКМ на их уровень физико-механических, теплофизических и триботехнических свойств. Установлено, что напряжение при пределе текучести при сжатии и температура размягчения по Вика ПКМ, полученных с применением метода совмещения *in situ* исходных компонентов, на 20–30%, а коэффициент трения и износ в 1,5–2,0 раза превосходят аналогичные параметры для материалов, полученных по стандартному методу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Design, preparation, and application of ordered porous polymer materials* / Liu Q., Tang Z., Ou B. and other // *Mater. Chem. Phys.* – 2014. – Vol.144. – No. 3. – P.213-225.
2. *Kabat O., Sytar V., Sukhyu K. Antifrictional polymer composites based on aromatic polyamide and carbon black* // *Chem. Chem. Technol.* – 2018. Vol.12. – P.326-330.
3. *Materials and processing of polymer-based electrochromic devices* / Wang H., Barrett M., Duane B., Gu J., Zenhausern F. // *Mater. Sci. Eng., B.* – 2018. – Vol.228. – P.167-174.
4. *Bernede J.C. Materials for erasable optical disks* // *Mater. Chem. Phys.* – 1992. – Vol.32. – No. 2. – P.189-195.
5. *Modern plastic solar cells: materials, mechanisms and modeling* / Chiechi R.C., Havenith R.W.A., Hummelen J.C., et al. // *Mater. Today.* – 2013. – Vol.16. – No. 7-8. – P.281-289.
6. *Ye S., Zeng X. Tribological properties of PTFE and PTFE composites at different temperatures* // *Tribol. Trans.* – 2014. Vol.57. – No. 3. P.382-386.
7. *Mechanical properties improvement of carbon fiber-reinforced PTFE composites by PA6 filler dispersion* / Tang G., Chang D., Wang D., He J., Mi W., Zhang J., Wang W. // *Polym.-Plast. Technol. Eng.* – 2012. – Vol.51. – No. 4. – P.377-380.
8. *Сученинов П.А., Адаменко Н.А., Сергеев Д.В. Разработка и исследование композиционных материалов для уплотнений воздушных поршневых компрессоров* // *Известия ВолгГТУ.* – 2009. № 11(59). – Вып. 3. – С.66-69.
9. *Beckford S., Wang Y.A., Zou M. Wear-resistant PTFE/SiO<sub>2</sub> nanoparticle composite film* // *Tribol. Trans.* – 2011. Vol.54. – No. 6. P.849-858.
10. *Кабат О.С., Душейко М.В. Полімерні композиційні матеріали спеціального призначення на основі фторопласту* // *Технологические системы.* – 2017. – Т.4(81). – С.63-67.
11. *Каллистер У.Д., Ретвич Д.Д. Материаловедение: от технологии к применению (металлы, керамика, полимеры).* Санкт-Петербург: Научные основы и технологии, 2011. – 896 с.
12. *Kasai N., Kakudo M. X-ray diffraction by macromolecules.* – Токуо: Kodansha Ltd., 2005. – 504 p.
13. *Дослідження триботехнічних характеристик полімерних композитів для термонавантажених вузлів тертя машин і апаратів хімічного обладнання* / А.М. Дудка, В.І. Ситар, І.І. Начовний, О.С. Кабат // *Вопросы химии и хим. технологии.* – 2010. № 3. С.148-151.
14. *Friedrich K., Schlarb A.K. Tribology of polymeric nanocomposites: friction and wear of bulk materials and coatings.* Butterworth-Heinemann: Elsevier, 2013. – 832 p.

Поступила в редакцию 25.12.2018

## ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ФТОРОПЛАСТУ І МЕТОД ЇХ ОДЕРЖАННЯ

*О.С. Кабат, Б.Г. Харченко, О.Д. Деркач, В.В. Артемчук, В.Г. Бабенко*

*Розроблено полімерні композиційні матеріали (ПКМ) на основі фторопласту-4, який наповнено силіцій діоксидом, і метод їх отримання, який полягає у суміщенні in situ вихідних дисперсних частинок полімеру з наповнювачем у процесі його синтезу. Це дозволяє значно спростити виготовлення виробів із матеріалів, що досліджуються, за рахунок виключення операції перемішування вихідних компонентів на підготовчому етапі переробки, а, відповідно, і зменшити їх собівартість. Здійснені структурні дослідження ПКМ, у результаті яких встановлено, що композити на основі фторопласту-4 та силіцій діоксиду, одержані з використанням методу суміщення in situ вихідних компонентів, мають більш упорядковану структуру у порівнянні з матеріалами, які одержані за стандартною методикою. Вони також відрізняються морфологією наповнювача в полімерній матриці, що пояснюється особливостями його структуроутворення при синтезі в присутності вихідного дисперсного полімеру. Здійснені порівняльні фізико-механічні, теплофізичні та триботехнічні дослідження розроблених ПКМ. Встановлено, що напруження при межі текучості при стисканні та температура розм'якшення за Віка ПКМ, одержаних з використанням методу суміщення in situ вихідних компонентів, на 20–30%, перевершують аналогічні параметри для матеріалів, одержаних за стандартною методикою. При цьому коефіцієнт тертя та зношування зменшуються у 1,5–2,0 рази.*

**Ключові слова:** фторопласт-4, силіцій діоксид, метод отримання, структура, фізико-механічні, теплофізичні та триботехнічні властивості.

## POLYMER COMPOSITES BASED ON FLUOROPLASTIC AND METHOD FOR THE PRODUCTION THEREOF

*O.S. Kabat <sup>a,\*</sup>, B.G. Kharchenko <sup>b</sup>, O.D. Derkach <sup>b</sup>, V.V. Artemchuk <sup>c</sup>, V.G. Babenko <sup>a</sup>*

<sup>a</sup> *Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine*

<sup>b</sup> *Dnipropetrovsk State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine*

<sup>c</sup> *Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, Dnipro, Ukraine*

\* e-mail: Amber\_UDHTU@i.ua

*In this work, we fabricated polymer composites based on polytetrafluoroethylene and silica. The method of their preparation involves in situ combination of initial dispersed particles of the polymer and the filler. This allows considerably simplifying the fabrication of products from the developed polymer composites as a result of removing the operation of mixing initial components at a preparatory stage of the process. In addition, the prime cost of the obtained products is reduced. The study on the structure of the polymer composites was conducted. It was established that the polymer composites obtained by the method of in situ combination of initial components have more ordered structure than the materials prepared by the standard procedure. Also, the morphology of the filler in polymeric matrix of the composites under consideration differs from that of the composites synthesized using the standard procedure. The filler in materials obtained by in-situ combination of initial components has a lamellar structure in contrast to materials fabricated by the standard method. The physico-mechanical, thermophysical and tribological properties of the developed polymer composites were determined. It was found that the stress at the yield point during compression and the Vicat*

softening temperature of the composites obtained using the method of in situ combining the initial components are 20–30% higher than the similar parameters for materials obtained by the standard method. The friction coefficient and wear are 1.5–2 times higher than those of the standard materials.

**Keywords:** polytetrafluorethylene; silica; method for the fabrication; polymer composites; structure; physico-mechanical, thermophysical and tribological properties.

#### REFERENCES

1. Liu Q., Tang Z., Ou B., Liu L., Zhou Z., Shen S., Duan Y. Design, preparation, and application of ordered porous polymer materials. *Materials Chemistry and Physics*, 2014, vol. 144, pp. 213-225.
2. Kabat O., Sytar V., Sukhyy K. Antifrictional polymer composites based on aromatic polyamide and carbon black. *Chemistry & Chemical Technology*, 2018, vol. 12, pp. 326-330.
3. Wang H., Barrett M., Duane B., Gu J., Zenhausern F. Materials and processing of polymer-based electrochromic devices. *Materials Science and Engineering: B*, 2018, vol. 228, pp. 167-174.
4. Bernede J.C. Materials for erasable optical disks. *Materials Chemistry and Physics*, 1992, vol. 32, pp. 189-195.
5. Chiechi R.C., Havenith R.W.A., Hummelen J.C., Koster L.J.A., Loi M.A. Modern plastic solar cells: materials, mechanisms and modeling. *Materials Today*, 2013, vol. 16, pp. 281-289.
6. Sujuan Ye, Xingrong Zeng. Tribological properties of PTFE and PTFE composites at different temperatures. *Tribology Transactions*, 2014, vol. 57, pp. 382-386.
7. Tang G., Chang D., Wang D., He J., Mi W., Zhang J., Wang W. Mechanical properties improvement of carbon fiber-reinforced PTFE composites by PA6 filler dispersion. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2012, vol. 51, pp. 377-380.
8. Sucheninov P.A., Adamenko N.A., Sergeev D.V. Razrabotka i issledovanie kompozitsionnykh materialov dl'ya uplotnenii vozdushnykh porshnevykh kompressorov [Development and investigation of composite materials for gaskets of air piston compressors]. *Izvestiya VolgGTU*, 2009, vol. 59, no. 11, pp. 66-69. (*in Russian*).
9. Beckford S., Wang Y.A., Zou M. Wear-resistant PTFE/SiO<sub>2</sub> nanoparticle composite films. *Tribology Transactions*, 2011, vol. 54, pp. 849-858.
10. Kabat O.S., Dusheiko M.V. Polimerni kompozytsiini materialy spetsial'nogo pryznachennya na osnovi ftoroplastu [Polymer composites of a special purpose based on polytetrafluorethylene]. *Tekhnologicheskie Sistemy*, 2017, vol. 81, pp. 63-67. (*in Ukrainian*). Available at: <http://dx.doi.org/10.29010/081.8>.
11. Kallister U.D., Retvich D.D., *Materialovedenie: ot tekhnologii k primeneniyu (Metally. Keramika. Polimery)* [Materials science: from technology to application (metals, ceramics, and polymers)]. Nauchnyye Osnovy i Tekhnologii Publishers, St. Petersburg, 2011. 896 p. (*in Russian*).
12. Kasai N., Kakudo M., *X-ray diffraction by macromolecules*. Kodansha Ltd., Tokyo, 2005, 504 p.
13. Dudka A.M., Sytar V.I., Nachovny I.I., Kabat O.S. Doslidzhennya trybotekhnichnykh kharakterystyk polimernykh kompozytiv dl'ya termonavantazhenykh vuzliv tertya mashyn i aparativ khimichnogo obladnann'ya [Tribotechnical properties of polymeric composites for heat-loading friction units]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 2010, no. 3, pp. 148-151. (*in Ukrainian*).
14. Friedrich K., Schlarb A.K., *Tribology of polymeric nanocomposites: friction and wear of bulk materials and coatings*. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2013. 832 p.