

УДК 544.169

***КРЕЙЗИНГ ПЛЕНОК ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА В ПРИСУТСТВИИ
ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ЖИДКИХ СРЕД НА ОСНОВЕ
ДВУХФАЗНЫХ ЭМУЛЬСИЙ ТИПА МАСЛО-В-ВОДЕ С ВЫСОКИМ
СОДЕРЖАНИЕМ ВОДЫ***

Аржакова О.В.

к.х.н., доц., старший научный сотрудник,

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический
факультет,*

Россия, Москва

Копнов А.Ю.

студент-бакалавр 2 курса,

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический
факультет,*

Россия, Москва

Долгова А.А.

к.х.н., старший научный сотрудник,

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический
факультет,*

Россия, Москва

Волынский А.Л.

д.х.н, чл-корр. РАН, профессор,

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет,

Россия, Москва

Аннотация

Разработан экологически чистый и универсальный подход к получению мезопористых полимерных материалов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) с использованием фундаментального явления крейзинга при деформировании полимера в присутствии двухфазных эмульсий типа масло-в-воде (М/В) с высоким содержанием воды (более 90 об. %) в качестве альтернативы традиционным органическим растворителям. Показано, что деформирование ПТФЭ в присутствии М/В эмульсий с высоким содержанием воды протекает по механизму межкристаллитного крейзинга и сопровождается развитием высокого уровня пористости (до 35%) и формированием фибриллярно-пористой структуры по механизму нестабильного мениска Релея_Тейлора с размерами пор до 10 нм. Описаны преимущества использования М/В эмульсий с высоким содержанием воды (>90 об.%) при проведении крейзинга полимеров как метода получения мезопористых полимерных материалов и полимерных нанокомпозитов на основе ПТФЭ с ценными функциональными свойствами.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, мезопористый ПТФЭ, эмульсии типа масло-в-воде, крейзинг, нанокомпозиционные материалы

**"GREEN" ENVIRONMENTAL CRAZING OF POLY(TETRAFLUROETHYLENE)
FILMS IN BIPHASE OIL-IN-WATER EMULSIONS WITH HIGH WATER
CONTENT**

Arzhakova O.V.

PhD, Associate Professor, Senior Researcher,

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry,

Russia, Moscow

Kopnov A.Yu.,

student,

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry,

Russia, Moscow

Dolgova A.A.

PhD, Senior Researcher,

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry,

Russia, Moscow

Volynskii A.L.

ScD, Professor,

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry,
Moscow, Russia*

Abstract

Mesoporous polymeric materials based on poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) were prepared using the fundamental phenomenon of environmental crazing in the presence of biphasic oil-in-water (O/W) emulsions with high water content (above 90 vol. %) as an alternative for traditional organic solvents (hydrocarbons and higher aliphatic alcohols). Deformation of PTFE in the presence of the O/W emulsions with high water content proceeds via the mechanism of environmental intercrystallite crazing, which is accompanied by the development of high porosity (up to 35%) and formation of the fibrillar-porous structure with pore dimensions below 10 nm. The advantages of the O/W emulsions with high water content for the preparation of the mesoporous and nanocomposite PTFE materials are highlighted.

Keywords: polytetrafluoroethylene, mesoporous PTFE, biphasic oil-in-water emulsions, crazing, nanocomposite materials

Введение

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) является уникальным инженерным материалом с ценными функциональными свойствами, которые обусловлены его специфической химической и надмолекулярной структурой [1-3]. ПТФЭ отличается высокой термической стойкостью в широком интервале температур до 260°C, ПТФЭ инертен к действию органических растворителей, не разрушается

Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМН ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

под действием щелочей и кислот, остаётся гибким и эластичным в широком температурном интервале от -70 до $+270^{\circ}\text{C}$ [4]. Особый интерес представляют пористые материалы с высокой удельной поверхностью на основе ПТФЭ для использования в качестве газопроницаемых, «дышащих» и изоляционных материалов, ультрафильтрационных и обратноосмотических мембран, фильтров, сорбентов, упаковочных материалов, гидроизоляционных укрывных материалов, также в качестве матриц получения нанокomпозиционных материалов [3, 5, 6].

Универсальным методом создания в полимерах высокой пористости с размерами пор до 20 нм является крейзинг полимеров в присутствии физически активных жидких сред [7-10]. Крейзинг – особый вид пластической деформации полимеров, который сопровождается индуцированным напряжением развитием высокой пористости до 60 об. % в полимерах при их деформировании в физически активных жидких средах (ФАЖС) за счет формирования в полимере под действием растягивающего напряжения пористой структуры с параметрами нанометрового диапазона от 2 до 20 нм [7]. В качестве ФАЖС обычно используют органические растворители – алифатические спирты, углеводороды, кетоны и пр. Недостатками крейзинга, затрудняющими практическую реализацию в виде технологии, является необходимость проведения процесса в присутствии токсичных, летучих и пожароопасных растворителей с необходимостью их дальнейшей рекуперации. В связи с этим важное значение имеет поиск новых экологически безопасных и технологически выгодных сред для проведения крейзинга. В качестве ФАЖС для реализации крейзинга в работах [7, 11, 12] использовали водные растворы указанных растворителей, а также сверхкритические среды, такие как CO_2 [13]. Однако при использовании водных растворов эффективность крейзинга, оцениваемая по приращению пористости полимера в процессе вытяжки, критически снижается по сравнению с чистыми ФАЖС.

Как известно [7, 14], для частично кристаллических полимеров таких, как ПЭВП, ПП и ПТФЭ, наиболее эффективными ФАЖС являются органические растворители (предельные углеводороды и высшие алифатические спирты). Данные растворители термодинамически несовместимы с водой и образуют двухфазные системы с ярко выраженной границей фаз. В случае избыточного содержания воды (дисперсионная среда) и малого содержания неполярных молекул (дисперсная фаза, раздробленная в воде в виде мелких капель) происходит формирование эмульсий первого типа, которые называют эмульсиями типа "масло-в-воде" (эмульсии М/В) или прямыми эмульсиями. Вода является самым предпочтительным растворителем для всех технологических процессов вследствие своей нетоксичности, негорючести и экологической безопасности, а также низкой стоимости. Однако вода не является средой, промотирующей крейзинг полимеров. Таким образом, если эмульсии типа "масло в воде", состоящие из двух термодинамически несовместимых компонентов (масло и вода), могут быть эффективными ФАЖС для реализации крейзинга ПТФЭ, то такого рода эмульсии будут представлять собой уникальную альтернативу типичным органическим растворителям являться новым классом выгодных и экологически безопасных жидких сред.

Данная работа посвящена изучению возможности реализации крейзинга ПТФЭ в двухфазных жидких средах на основе несмешивающихся и термодинамически несовместимых компонентов таких, как органический растворитель и вода в виде эмульсий типа «масло-в-воде» с высоким содержанием воды (более 90 об.%) и оценке эффективности их воздействия на полимер в процессе деформирования.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования использовали пленки ПТФЭ марки ФП-4 с молекулярной массой $\sim 10^6$, толщиной 200 мкм и степенью кристалличности 37%. В качестве органических растворителей использовали *n*-гептан – *n*-октанол. Двухфазные эмульсии «масло-в-воде» (эмульсии М/В) с содержанием воды как дисперсионной среды более 90% получали с использованием классического метода дробления капель при интенсивном перемешивании жидких термодинамически несовместимых компонентов.

Исследование механических свойств пленок ПТФЭ на воздухе и в ФАЖС проводили при их одноосном растяжении с постоянной скоростью 5 мм/мин на универсальном динамометре “Instron 1122” (Великобритания). Определение пористости ПТФЭ, деформированного на воздухе и в ФАЖС, проводили путем измерения приращения объема образца W в процессе вытяжки. и вычисляли по формуле $W = \frac{\Delta V}{V_0 + \Delta V}$, где V_0 – исходный объем образца, ΔV – приращение объема в процессе вытяжки.. Ошибка эксперимента составляла 3%.

Исследование образцов ПТФЭ проводили методом жидкостного проникания под действием градиента давления. Поток жидкости G , выраженный в л/(м²·ч), определяли по формуле $G = \frac{Q}{S\tau}$, где Q - объем жидкости, прошедший через пористую пленку, S – площадь мембраны, τ – время.

Для оценки размеров пор образцов, деформированных по механизму крейзинга, использовали приближение модели Хагена-Пуазейля.

$$Q = \frac{\pi n r^4 S \Delta p}{8 \eta d} = \frac{W r^2 S \Delta p}{8 \eta d} \quad (1),$$

где n – число пор на единицу поверхности, r – радиус пор, ΔP – перепад давления, d – толщина деформированной пленки, η – вязкость жидкости, S – площадь мембраны, W - пористость.

Пористость W определяется, как $W = \pi nr^2$ (2),

где n – число пор на единицу поверхности, r – радиус пор.

$$\text{Диаметр пор } D_{\text{п}} \text{ из формул (1) и (2) определяли как } D_{\text{п}} = 2 \sqrt{\frac{Q8\eta d}{WS\Delta p}} \quad (3)$$

Результаты и обсуждение

Для ПТФЭ изучена возможность использования двухфазных эмульсий типа "масло в воде" (М/В эмульсии) с высоким содержанием воды (более 90 об.%) в качестве эффективных физически активных жидких сред (ФАЖС), которые промотируют крейзинг и формирование пористой структуры. Для оценки эффективности действия М/В эмульсий при крейзинге ПТФЭ исследования проводили в сравнении с чистыми ФАЖС (*n*-гептан и *n*-октанол).

М/В эмульсии получали методом дробления капель при интенсивном механическом перемешивании жидких термодинамически несовместимых компонентов – воды и *n*-гептана или *n*-октанола (масло). Проведена оценка размеров капель фазы масла в М/В эмульсиях. Предложенный метод диспергирования позволяет получать однородные мелкодисперсные эмульсии с размером капель дисперсной фазы от 1-2 до 10 мкм. Полученные М/В эмульсии сохраняют стабильность в течение 20-30 минут, и этого времени достаточно для проведения процесса деформирования полимерных образцов.

На рис. 1 представлены механические кривые при растяжении пленок ПТФЭ на воздухе и в чистых ФАЖС (*n*-гептан и *n*-октанол). Установлено, что при растяжении на воздухе пленки ПТФЭ тянутся однородно, без формирования шейки.

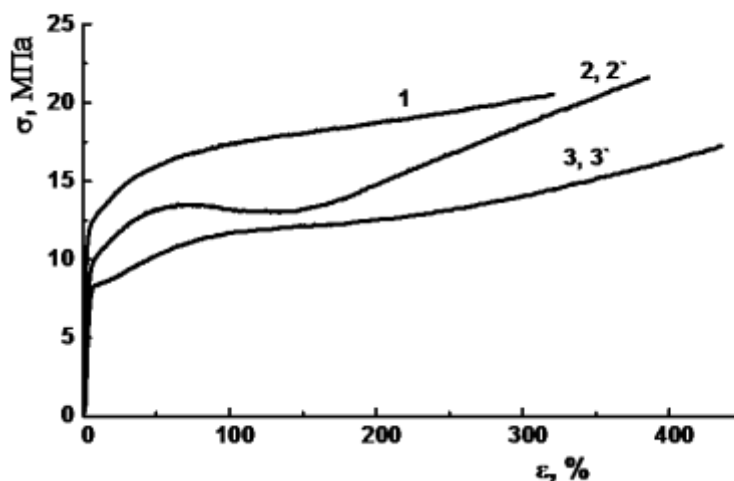


Рис.1 – Динамометрические кривые при растяжении ПТФЭ на воздухе (1), в воде (1') и в присутствии *n*-гептана (2), *n*-октанола (3), эмульсии М/В на основе *n*-гептана (2'), *n*-октанола (3') с содержанием воды 95 об. %.

При растяжении ПТФЭ на воздухе (кривая 1 на рис.1) отсутствует ярко выраженный предел текучести, деформация разрушения составляет ~300-330%. Установлено, что динамометрическая кривая ПТФЭ при деформировании в чистой воде полностью аналогична динамометрической кривой при растяжении полимера на воздухе (рис. 1, кривая 1'), т.е. вода является инертной средой по отношению к ПТФЭ. При деформировании полимера в присутствии чистых ФАЖС (*n*-гептана и *n*-октанола) наблюдается заметное снижение напряжения деформирования во всем интервале степеней вытяжки по сравнению с растяжением на воздухе и в воде. Однако значения модуля упругости при растяжении как в воде, так и в ФАЖС остаются практически неизменными. Это говорит о том, что используемые органические среды не оказывают

пластифицирующего размягчающего воздействия на полимер. Такой вывод также подтверждается данными по измерению степени набухания ПТФЭ в исследуемых органических растворителях— *n*-гептане и *n*-октаноле: набухание полимера составляет менее 2% при выдерживании в этих средах в течение 1 месяца. Однако существенное падение уровня напряжения при деформировании в ФАЖС свидетельствует об их эффективном воздействии на полимер в процессе вытяжки. Так, при переходе от воздуха (и воды) к *n*-гептану (кривая 2) и *n*-октанолу (кривая 3) деформирование происходит при меньшем уровне напряжения. Таким образом, используемые органические растворители являются для ПТФЭ физически активными жидкими средами, то есть средами, которые не вызывают заметного набухания полимера и его последующей пластификации, но оказывают адсорбционное воздействие, снижая поверхностную энергию полимера за счет слабых ван-дер-Ваальсовых взаимодействий [7].

Установлено, что механический отклик образцов ПТФЭ при деформировании в эмульсиях М/В на основе *n*-гептана и *n*-октанола (кривые 2' и 3' на рис. 1) полностью аналогичен отклику полимера при деформировании в чистых ФАЖС – *n*-гептане и *n*-октаноле (кривые 2 и 3 на рис.1). Механические кривые ПТФЭ при растяжении в чистых ФАЖС и в эмульсиях М/В на основе *n*-гептана и *n*-октанола с высоким содержанием воды (95 об.%) полностью совпадают. Этот факт свидетельствует о том, что двухфазные эмульсии с высоким содержанием воды оказывают такое же действие на деформирование образцов ПТФЭ как и чистые ФАЖС (*n*-гептан и *n*-октанол), и деформирование ПТФЭ в М/В эмульсиях происходит по механизму крейзинга.

Установлено, при деформировании в М/В эмульсиях, также как и в чистых ФАЖС образцы приобретают характерный молочно-белый цвет, что говорит об эффективном формировании в полимере структурных дефектов, вызывающих

интенсивное рассеяние света. На рис. 2 представлены данные по изменению объема полимерного образца W по мере увеличения степени вытяжки ε .

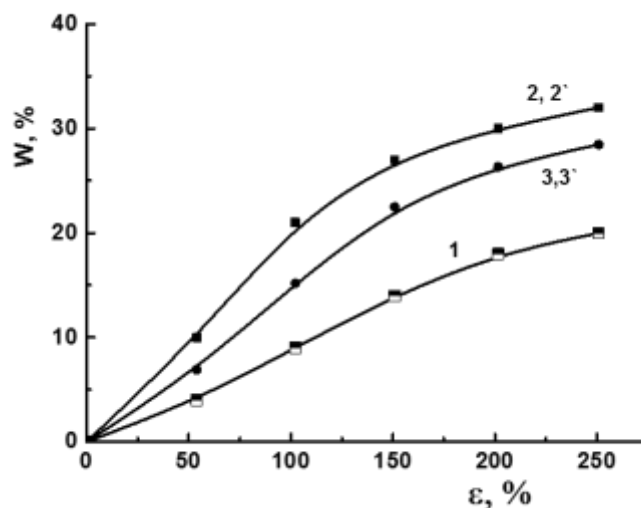


Рис. 2 – Приращение объема W образца ПТФЭ в процессе одноосного деформирования на воздухе (1) и в присутствии *n*-октанола (2), *n*-гептана (3), эмульсий М/В на основе *n*-октанола (2') и *n*-гептана (3') с содержанием воды 95 об.%.

При деформировании полимеров в чистых ФАЖС (кривые 2 и 3 на рис.2) пористость W образцов увеличивается с ростом степени вытяжки. Приращение пористости при увеличении степени вытяжки в ФАЖС происходит в широком интервале степеней вытяжки вплоть до 250%. Максимальная пористость ПТФЭ при деформировании в *n*-гептане составляет ~33% и ~27% в случае *n*-октанола. Установлено, что кривые приращения пористости ПТФЭ при деформировании в эмульсиях М/В на основе *n*-октанола и *n*-гептана с высоким содержанием воды (кривые 2' и 3' соответственно на рис. 2) полностью аналогичны кривым приращения пористости по мере увеличения степени вытяжки при деформировании полимеров в чистых ФАЖС (*n*-октаноле и *n*-гептане). В случае М/В эмульсий эффективность крейзинга повышается также при повышении

Дневник науки | www.dnevnikaui.ru | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

активности ФАЖС, присутствующей в виде капель дисперсной фазы: максимальная эффективность крейзинга достигается в случае *n*-гептана как чистой ФАЖС, так и для двухфазной эмульсии *n*-гептан – вода.

Таким образом, в данной работе впервые установлено, что по своей эффективности действия на полимер в качестве промотирующих крейзинг сред М/В эмульсии с высоким содержанием воды (более 90 об.%) полностью аналогичны чистым ФАЖС.

Установлен факт наличия потока жидкости (изопропанола, ИПА) под действием градиента давления через деформированные образцы ПТФЭ в широком диапазоне степеней вытяжки вплоть до 250%, т.е. в результате деформирования в ФАЖС в полимере формируется открытая сквозная пористость. Значения потока жидкости через ПТФЭ, деформированный в М/В эмульсиях и в чистых ФАЖС, полностью совпадают. При этом в случае *n*-гептана как наиболее активной в адсорбционном отношении среды по отношению к ПТФЭ по сравнению с *n*-октанолом поток ИПА оказывается более, чем в 2 раза выше при фиксированной степени вытяжки $\varepsilon = 200\%$. Таким образом, деформирование пленок ПТФЭ в М/В эмульсиях и в чистых ФАЖС проходит по механизму межкристаллитного крейзинга и позволяет получать пористые полимерные материалы на основе ПТФЭ.

На рис. 3 представлена зависимость диаметра пор D_p , рассчитанного по уравнению (3), от степени вытяжки ε для образцов ПТФЭ после деформирования в чистых ФАЖС и в М/В эмульсиях.

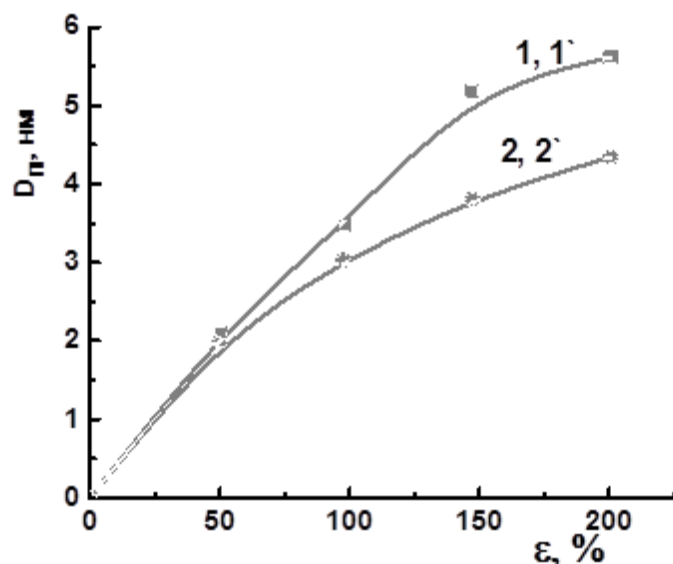


Рис. 3 – Зависимость диаметра пор $D_{п}$ от степени вытяжки ε для образцов ПТФЭ после деформирования в *n*-гептане (1), *n*-октаноле (2) и в М/В эмульсиях на основе *n*-гептана (1') и *n*-октанола (2') с содержанием воды 95%.

Как следует из рис. 3, диаметр пор $D_{п}$ образцов ПТФЭ, деформированных в чистых ФАЖС и в М/В эмульсиях, полностью совпадают, и их значения находятся в диапазоне до 10 нм, т.е. полимерные материалы на основе ПТФЭ являются типичными мезопористыми материалами. При деформировании пленок ПТФЭ в ФАЖС диаметр пор $D_{п}$ увеличивается по мере увеличения степени вытяжки ε . При этом в случае *n*-гептана как более эффективной ФАЖС диаметр пор $D_{п}$ оказывается выше, чем в случае *n*-октанола и составляет ~5.5 нм при степени вытяжки 200% как для *n*-гептана, так и для эмульсии *n*-гептан – вода. Таким образом, варьируя степень вытяжки ε и эффективность среды как ФАЖС возможно регулировать как пористость, так и размер пор в ПТФЭ.

Установлено, что эффективность действия М/В эмульсии как ФАЖС, оцениваемая по данным динамометрии и приращения пористости, практически не зависит от содержания масла в системе и сохраняется на высоком уровне даже при 1%-ном содержании органического компонента в М/В эмульсии. Следовательно, проведение вытяжки полимеров в М/В эмульсиях по механизму крейзинга является эффективным методом получения мезопористых полимерных материалов. Данный подход обеспечивает значительное снижение содержания активного органического компонента в системе, что позволяет в значительной степени как сократить объемы используемого органического растворителя (10-100 раз), так и снизить пожароопасность и существенно повысить экологичность технологического процесса, поскольку деформирование протекает практически в чистой воде (содержание воды 99%).

При удалении М/В эмульсии из объема деформированного ПТФЭ в изометрических условиях и последующего отжига при температуре 200°C (ниже температуры плавления полимера) образцы ПТФЭ сохраняют пористость на максимальном уровне, а также приобретают стабильность формы в температурном диапазоне вплоть до 200°C.

Структура полученных материалов на основе ПТФЭ была исследована методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (рис. 4).

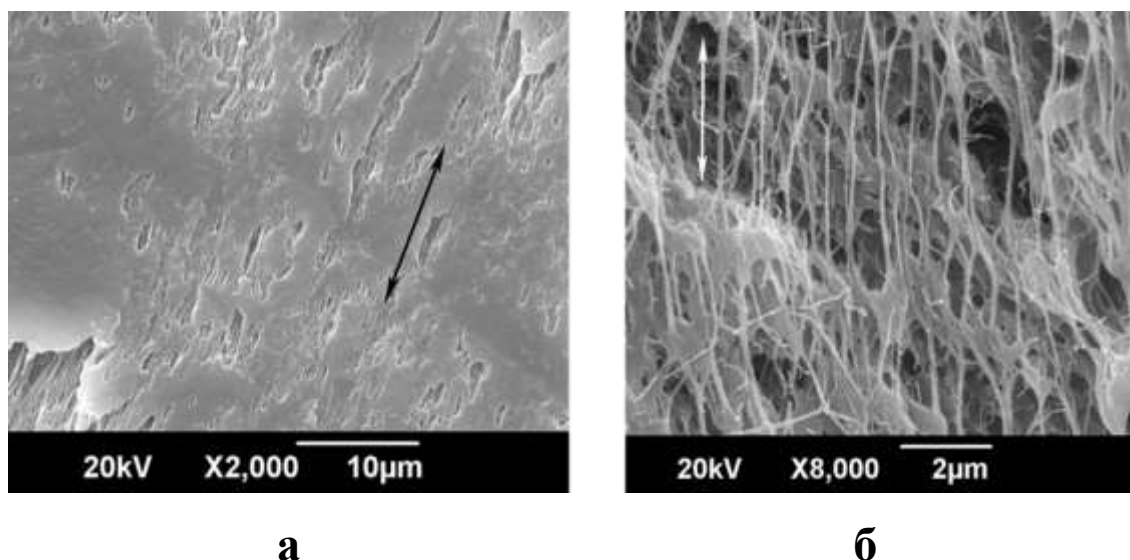


Рис. 4 – СЭМ микрофотографии поверхности (а) и скола (б) пленки ПТФЭ после проведения вытяжки на 200% в М/В эмульсии с содержанием воды 95 об.% и *n*-гептана и последующего отжига при 200°C. Стрелками указано направление вытяжки.

Представленные СЭМ микрофотографии наглядно демонстрируют внутреннюю структуру образцов ПТФЭ после растяжения по механизму крейзинга в М/В эмульсии с содержанием воды 95 об.%. Внутренняя структура образцов ПТФЭ после деформирования в М/В эмульсии представляет собой совокупность фибрилл, ориентированных вдоль направления вытяжки, и кристаллических ламелей. Деформирование ПТФЭ по механизму крейзинга в присутствии ФАЖС сопровождается интенсивной фибриллизацией полимерного материала, деформирование протекает за счет раздвижения кристаллических ламелей и фибриллизации полимера в межкристаллитном пространстве. При этом происходит процесс интенсивной кавитации и формирования пустот исключительно в аморфной фазе полимера. При крейзинге все межкристаллитное

пространство оказывается заполненным ФАЖС. При удалении жидкой ФАЖС и последующем отжиге происходит стабилизация высокопористой системы и формирование стабильной пористой системы. Таким образом, предложенный подход позволяет получать открытопористые полимерные материалы на основе ПТФЭ для их возможного использования в качестве фильтров, сорбентов, «дышащих» полимерных материалов, субстратов, пористых подложек и пр.

Исследованы возможности введения активной добавки в полимер при проведении крейзинга ПТФЭ в М/В эмульсиях с использованием модельных маслорастворимого красителя Судана IV, который растворяется в неполярной фазе эмульсии - *n* гептане, но не растворим в воде. После вытяжки пленок ПТФЭ в М/В эмульсии на 200%-пленки оказываются ярко окрашенными, что говорит об эффективном проникновении красителя в пористую систему вместе с растворителем. Исследование окрашенных пленок ПТФЭ с Суданом IV методом световой микроскопии и флуоресценции показывает однородное распределение красителя по всему объему полимера, а также наличие хорошо разрешенных спектров флуоресценции. Данный подход позволяет использовать в качестве добавок широкий круг маслорастворимых соединений (масла, отдушки, лекарственные препараты и пр.) для создания нанокomпозиционных материалов с заданными функциональными свойствами. данный подход позволяет в значительной степени сократить количество добавки при ее растворении в ФАЖС, поскольку общий объем ФАЖС в данном случае снижается в 10-100 раз. Это имеет особое значение при использовании различного рода дорогостоящих добавок, например, сенсорных красителей. Таким образом, проведенные исследования открывают широкие возможности использования эмульсий масло-в-воде для получения мезопористых и нанокomпозиционных полимерных материалов методом крейзинга.

Мезопористые полимерные материалы на основе ПТФЭ, полученные по механизму крейзинга при деформировании в М/В эмульсиях, могут быть использованы как мезопористые мембраны для процессов нано- и ультрафильтрации, паропроницаемые «дышащие» материалы, материалы с пониженной плотностью, фильтры, селективные сорбенты и пр. Полученные мезопористые материалы на основе ПТФЭ обладают улучшенными гидроизоляционными и теплоизоляционными свойствами. Так, гидроизоляционные характеристики мезопористого ПТФЭ более, чем на 300% превышают показатели существующих аналогов мезопористых гидрофобных полимерных материалов, а показатели эффективной теплопроводности в 25 раз превышают показатели теплопроводности воздуха.

Установлено, что полученные мезопористые материалы на основе ПТФЭ обладают высокой химической стойкостью к воздействию агрессивных органических соединений (концентрированных кислот и щелочей) и полностью сохраняют свои рабочие характеристики (пористость, размер пор). Наноконпозиционные материалы на основе ПТФЭ после обработки щелочью можно рассматривать как своеобразные наноконпозиционные системы и полимерные контейнеры для щелочи с последующим возможным использованием их в качестве систем, например, для извлечения углекислого газа, а также как суперпротонные проводники на полимерном носителе.

Заключение

Таким образом, в данной работе впервые исследован процесс деформирования частично кристаллического ПТФЭ в двухфазных эмульсиях типа масло-в-воде с содержанием воды более 90 об. % на основе термодинамически несовместимых компонентов – предельных углеводородов и высших алифатических спиртов, с одной стороны, и воды как экологически безопасной среды, с другой стороны.

Впервые установлено, что по своей эффективности воздействия на полимер в качестве промотирующих крейзинг сред эмульсии масло-в-воде с высоким содержанием воды (более 90 об.%) полностью аналогичны чистым ФАЖС. Показано, что деформирование ПТФЭ в присутствии двухкомпонентных М/В эмульсий протекает по механизму межкристаллитного крейзинга с формированием фибриллярно-пористой структуры. Данный подход является эффективным методом формирования мезопористых полимерных материалов на основе ПТФЭ с пористостью до 35%, размерами пор до 10 нм и стабильностью формы при повышенных температурах, которые могут быть использованы в качестве матриц и субстратов для формирования нанокomпозиционных материалов при введении функциональных добавок. Преимущества данного подхода заключаются в значительном снижении количества добавки, растворенной в ФАЖС (в 10-100 раз), поскольку общий объем органического растворителя существенно уменьшается (в 10-100 раз). Это имеет особое значение при использовании различного рода дорогостоящих добавок, например, сенсорных красителей. Полученные результаты открывают широкие возможности практической реализации крейзинга для получения мезопористых и нанокomпозиционных полимерных материалов с использованием двухфазных эмульсий типа масло-в-воде в качестве физически активных жидких сред.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант № 17-13-01017)

Библиографический список

1. Yang, Y. Fluorine plasma treatments of poly(propylene) films, 2 – Modeling reaction mechanisms and scaling / Y. Yang, M. Strobel, S. Kirk, M. J. Kushner // Plasma Processes and Polymers. – 2010. – Vol. 7(2). – P. 123-150.

2. Liu G. Preparation and properties of porous polytetrafluoroethylene hollow fiber membrane through mechanical operations / G. Liu, C. Gao, X. Li, C. Guo, Y. Chen, J. Lv // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2015. – Vol. 132(43). – P. 42696-42705.
3. Feng S. Progress and perspectives in PTFE membrane: preparation, modification, and applications / S. Feng, Z. Zhong, Y. Wang, W. Xing, E. Drioli // *Journal of Membrane Science*. – 2018. – Vol. 549. – P. 332-349.
4. Ebnesajjad S. *Fluoroplastics* / S. Ebnesajjad. – UK: Elsevier, 2015. – 718 p.
5. Ahmed D. S. Design and synthesis of porous polymeric materials and their applications in gas capture and storage: a review / D. S. Ahmed, G. A. El-Hiti, E. Yousif, A. A. Ali, A. S. Hameed // *Journal Polymer Research*. – 2018. – Vol. 25(3). – P. 75-95.
6. Khayet M. Membranes and theoretical modeling of membrane distillation: a review / M. Khayet // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2010. – Vol. 164 (1-2). – P.56-88.
7. Volynskii A. L. *Solvent crazing of polymers* / A. L. Volynskii, N. F. Bakeev. – Amsterdam; New York : Elsevier, 1995. – 410 p.
8. Bagrov D. V. Atomic force microscopic study of the structure of high-density polyethylene deformed liquid medium by crazing mechanism / D.V. Bagrov, A.Y. Yarysheva, E.G. Rukhlya, L.M. Yarysheva, A.L. Volynskii, N.F. Bakeev // *Journal of Microscopy*. – 2014. – Vol. 253(2). – P. 151-160.
9. Arzhakova O. V. Development of a stable open-porous structure in the solvent-crazed high-density polyethylene / O. V. Arzhakova, A. A. Dolgova, L. M. Yarysheva, A. L. Volynskii, N. F. Bakeev // *Inorganic Materials*. – 2011. – Vol. 2(5). – P. 493-498.
10. Arzhakova O. V. Specific features of the environmental crazing of poly(ethylene terephthalate) fibers / O. V. Arzhakova, A. A. Dolgova, L. M. Yarysheva, A. L. Volynskii, N. F. Bakeev // *Polymer*. – 2015. – Vol. 56(1). – P. 256-262.

11. Rukhlya E. G. Effects of tensile strain on the peculiarities of PEO penetration into the nanoporous structure of PET deformed via the crazing mechanism / E. G. Rukhlya, L. M. Yarysheva, A. L. Volynskii, N. F. Bakeev // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2016. – Vol. 18(14). – P. 9396-9404.

12. Rukhlya E. G. Penetration of poly(ethylene oxide) into the nanoporous structure of the solvent-crazed poly(ethylene terephthalate) films / E. G. Rukhlya, E. A. Litmanovich, A. I. Dolinnyi, L. M. Yarysheva, A. L. Volynskii, N. F. Bakeev // Macromolecules. – 2011. – Vol. 44(13). – P. 5262-5267.

13. Dudnik A. O. Evolution of the nanoporous structure of high-density polyethylene during drawing in supercritical carbon dioxide / A. O. Dudnik, E. S. Trofimchuk, A. V. Efimov, N. I. Nikonorova, E. G. Rukhlya, L. N. Nikitin, I. V. Yaminsky, A. L. Volynskii // Macromolecules. – 2018. – Vol. 51(3). – P. 1129-1140.

14. Freitas A. F. Thermodynamic study of fatty acids adsorption on different adsorbents / A. F. Freitas, M. F. Mendes, G. L. V. Coelho // The Journal of Chemical Thermodynamics. – 2007 – Vol. 39(7). – P. 1027-1037.

Оригинальность 80%