

DOI: 10.17516/1998-2836-0298

EDN: ACPVIM

УДК 541.64:678

Study of the Compatibility of Polyvinyl Chloride and Polyhydroxybutyrate in a Mixture of Organic Solvents

Dmitriy V. Anuchin*, **Pham Le Quoc**,
Roman O. Olekhovich and **Maya V. Uspenskaya**
Institute BioEngineering, ITMO University
St. Petersburg, Russian Federation

Received 17.01.2022, received in revised form 16.06.2022, accepted 22.07.2022

Abstract. The article investigates the compatibility of polyvinyl chloride (PVC) and polyhydroxybutyrate (PHB) in a mixture of organic solvents at different ratios of polymers. Computations were performed to predict the compatibility of polymers, an experimental assessment of compatibility was performed by studying the conditions and time of gelation of polymer solutions, the effect of the ratio of PVC and PHB on the dynamic viscosity and electrical conductivity of polymer solutions was studied, and the IR spectrum and graphs of the strength and elongation of polymer films were obtained. based on PVC and PHB when pierced. The results of the study of polymer compatibility can be used to select the optimal ratio of polymers in the production of PVC/PHB films by casting or PVC/PHB nanofibers by electrospinning.

Keywords: polyvinyl chloride, polyhydroxybutyrate, compatibility, prognosis, gelation.

Citation: Anuchin, D.V., Pham Le Quoc, Olekhovich, R.O., Uspenskaya, M. V. Study of the compatibility of polyvinyl chloride and polyhydroxybutyrate in a mixture of organic solvents. J. Sib. Fed. Univ. Chem., 2022, 15(3), 341–352. DOI: 10.17516/1998-2836-0298



Изучение совместности поливинилхлорида и полигидроксibuтирата в смеси органических растворителей

Д. В. Анучин, Ле Куок Фам,
Р. О. Олехнович, М. В. Успенская
*Институт Биоинженерии, Университет ИТМО
Российская Федерация, Санкт-Петербург*

Аннотация. В статье исследована совместимость поливинилхлорида (ПВХ) и полигидроксibuтирата (ПГБ) в смеси органических растворителей при различном соотношении полимеров. Были выполнены расчеты для прогнозирования совместности полимеров, выполнена экспериментальная оценка совместности путем исследования условий и времени гелирования полимерных растворов, изучено влияние соотношения ПВХ и ПГБ на динамическую вязкость и на электропроводность полимерных растворов, а также были получены ИК-спектр и графики прочности и удлинения полимерных пленок на основе ПВХ и ПГБ при прокальвании. Результаты исследования совместности полимеров могут быть использованы для выбора оптимального соотношения полимеров при получении ПВХ/ПГБ пленок методом литья или ПВХ/ПГБ нановолокон методом электроформования.

Ключевые слова: поливинилхлорид, полигидроксibuтират, совместность, прогноз, гелирование.

Цитирование: Анучин, Д. В. Изучение совместности поливинилхлорида и полигидроксibuтирата в смеси органических растворителей / Д. В. Анучин, Ле Куок Фам, Р. О. Олехнович, М. В. Успенская // Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия, 2022, 15(3). С. 341–352. DOI: 10.17516/1998-2836-0298

Введение

В последние годы полимерные материалы все в большем количестве используются в производстве различных товаров и продуктов, находя им новые сферы применения, причем динамика спроса на полимерные материалы увеличивается с каждым годом [1]. Такая полимерная продукция имеет целый ряд преимуществ, таких как высокие барьерные свойства, легкость, прочность, эластичность. При этом рост полимерных отходов обусловлен тем, что товары и продукты на основе полимеров используются практически в каждой сфере деятельности человека, причем основная часть полимерной продукции является одноразовой в применении. После использования около 80 % данной продукции отправляется на свалки, а часть – и во все в Мировой океан. Только около 20 % полимерной продукции идет на вторичную переработку, при которой одна ее часть сжигается с выделением токсичных веществ в окружающую среду, а из другой части производят товары и продукты, неспособные конкурировать с первичными изделиями как по товарному виду и потребительским свойствам, так и по физико-механическим и эксплуатационным характеристикам [2].

Одним из часто используемых полимеров в промышленности является поливинилхлорид (ПВХ) – термопластичный, синтетический полимер, обладающий такими свойствами, как высокая прочность, огнеупорность, легкость, износостойкость [3]. Преимущества данного полимера – хорошая совместимость с другими полимерами и возможность переработки несколькими способами: экструзией, каландрированием, прессованием, литьем под давлением [4]. Однако изделия из ПВХ являются бионеразлагаемыми [5]. С одной стороны, это свойство можно отнести к достоинствам, так как изделия из ПВХ практически не подвержены разложению в естественных условиях и могут прослужить в течение многих лет, а с другой стороны – к недостаткам, так как после эксплуатации товары из ПВХ отправляются на свалку, загрязняя окружающую среду.

Одним из решений для минимизации количества отходов продукции из ПВХ является уменьшение количества ПВХ при производстве товаров и продукции с помощью добавления в них биоразлагаемых полимеров. Таким биоразлагаемым полимером может служить полигидроксibuтират (ПГБ) – термопластичный, синтетический полимер, обладающий прочностью, высокими барьерными свойствами, оптической активностью, пьезоэлектрическими свойствами [6]. Кроме того, добавление ПГБ в ПВХ может привести к повышению физико-механических свойств полимерного композита.

Таким образом, соединение бионеразлагаемого и биоразлагаемого полимеров поможет уменьшить загрязнение окружающей среды и является отличным способом создания полимерных материалов, комбинирующих лучшие качества полимеров, с различными свойствами с помощью создания смесей этих полимеров и их дальнейшего смешивания.

Одним из вопросов при получении однородных и бездефектных полимерных материалов на основе смеси полимеров в смеси растворителей является вопрос совместности и растворимости полимеров друг в друге. В зависимости от соотношения полимеров в смеси растворителей может получиться однородный (гомогенный) раствор, а может – неоднородный (гетерогенный) раствор с явной видимой границей раздела фаз. Гетерогенные растворы не подходят для получения однородных полимерных материалов по причине наличия фаз, обладающих различными свойствами, что сильно затрудняет получение полимерных материалов с заданными свойствами. По этой причине вопрос влияния совместности растворов на получение однородных полимерных материалов является актуальным.

Одним из методов для оценки совместности полимеров является расчет по методу Аскадского [7]. С точки зрения данного метода растворимыми веществами являются вещества с близкими плотностями по энергии связи (параметр растворимости Гильдебранда δ), молярному объему и поверхностному натяжению. Этот метод также используется для прогнозирования совместности и растворимости различных полимеров [8–10].

В статье исследуются растворы на основе ПВХ и ПГБ в смеси растворителей хлороформ/диметилформамид/тетрагидрофуран при различном соотношении полимеров. В ходе работы был выполнен расчет прогнозирования совместности полимеров, приготовлены растворы на основе ПВХ и ПГБ с различным соотношением полимеров, исследованы условия и время гелирования полимерных растворов, изучено влияние соотношения ПВХ и ПГБ на динамическую вязкость и на электропроводность полимерных растворов.

Материалы и методы исследования

В работе были использованы следующие материалы: ПВХ с константой Фикентчера $K_f=58$ (Shintech Inc., Houston, TX, США). Гранулированный ПГБ марки «Aonilex X151A» (Osaka, Japan). ПГБ имеет плотность $1,19 \text{ г/см}^3$, температуру плавления $126 \text{ }^\circ\text{C}$. Структурная формула ПГБ представлена на рис. 1. Хлороформ (трихлорметан) (х.ч.) и ДМФА (диметилформамид) (х.ч.) были приобретены в АО «ЭКОС-1» (Москва, Россия). ТГФ (тетрагидрофуран) (х.ч.) был куплен в ООО «Химмед» (Москва, Россия).

Одним из способов для предсказания совместности полимеров является оценка их растворимости. В этом случае один полимер рассматривается как «полимер», а второй – как «растворитель». Определение параметра растворимости по данным определения поверхностного натяжения «полимера» и «растворителя» – эффективный метод для оценки растворимости.

Для этого рассчитываются параметры растворимости δ , $(\text{Дж/см}^3)^{1/2}$, Гильдебранда для полимера и растворителя [11].

$$\delta = \sqrt{\frac{\Delta E^*}{N_A \cdot \Delta V^{**}}} \quad (1)$$

где ΔE^* – энергия когезии, Дж/моль; $N_A = 6.02 \cdot 10^{23}$ – число Авогадро, моль⁻¹; ΔV^{**} – Ван-дер-Ваальсовый объем, см³.

Если для системы «полимер-растворитель» соблюдается условие (2), то с вероятностью 85 % можно ожидать растворения полимера в данном растворителе.

$$\mu = \frac{\delta_{n1}^2}{\delta_{n2}^2} < \beta = 1,347\Phi(\Phi - \sqrt{\Phi^2 - 1 + a}); \quad (2)$$

$$a = \frac{\gamma_{pn}}{\gamma_{n2}}; \quad (3)$$

$$\Phi = \frac{4(V_{n2} \cdot V_{n1})^{\frac{1}{3}}}{(V_{n2}^{\frac{1}{3}} + V_{n1}^{\frac{1}{3}})^2}, \quad (4)$$

где δ_{n1} , δ_{n2} – параметр растворимости полимеров, $(\text{Дж/см}^3)^{1/2}$; γ_{n1} , γ_{n2} – поверхностное натяжение полимеров, мН/м; γ_{pn} – межфазное поверхностное натяжение, мН/м; V_{n1} , V_{n2} – мольные объемы полимеров, см³/моль.

Были приготовлены полимерные растворы с концентрацией 10 масс.% на основе ПВХ и ПГБ с их различным соотношением компонентов (10:0; 8:2; 6:4; 4:6; 2:8; 0:10). Растворы были приготовлены в соответствии со следующей методикой: в стакан А добавляли 7 мл хлорофор-

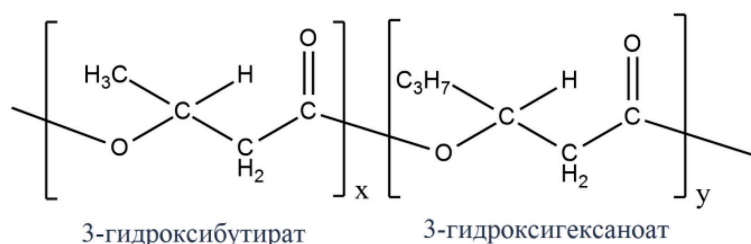


Рис. 1. Структурная формула ПГБ марки «Aonilex X151A»

Fig. 1. Structural formula of PHB brand "Aonilex X151A"

ма и 3 мл ДМФА и ставили стакан на магнитную мешалку, нагретую до 90 °С, и постепенно добавляли в него ПГБ. В это же время в стакан Б добавляли 5 мл ТГФ и 5 мл ДМФА, устанавливали стакан на магнитную мешалку, нагретую до 60 °С, и постепенно добавляли в него ПВХ. Растворы перемешивались в течение 3 часов до полного растворения полимеров. Затем раствор из стакана Б добавляли в стакан А и продолжали перемешивать при температуре 60 °С в течение 1 часа.

Анализ реологических свойств растворов полимеров проводился на реометре Physica MCR 502 (Anton Paar, Австрия) с использованием геометрии плита/плита с диаметром верхней плиты $d = 50$ мм. Измерения проводились при постоянной температуре 25 °С в течение 1 часа для каждого раствора, расстояние между плитами было установлено 1 мм.

Динамическую вязкость полимерных растворов измеряли на реометре Physica MCR 502 (Anton Paar, Австрия) с использованием геометрии цилиндр в цилиндре. Измерения проводились при температуре 25 °С и в диапазоне скоростей сдвига от 0,1 до 100 с⁻¹.

Измерение электропроводности растворов проводилось с помощью кондуктометра WTW inoLab Cond 720 (Германия) с датчиком WTW TetraCon 325.

Исследование структуры материалов проводилось методом ИК-Фурье-спектроскопии на спектрометре Tensor 37 (Bruker, Германия). Измерения проводились со спектральным разрешением 2 см⁻¹ в диапазоне 4000–600 см⁻¹ и были получены усреднением 32 сканирований.

Анализ прочностных свойств композиционных пленок при прокалывании проводили с помощью анализатора текстуры TA.XTrplus (Англия). Для изучения свойств полученных композиционных пленок были использованы: насадка с держателем для пленки ХТР/ФСР и сферический зонд Р/SS Ø5 мм. Заданная скорость опускания зонда – 1 мм/с.

Результаты

Для расчета параметров растворимости были рассчитаны энергия когезии ΔE^* и Ван-дер-Ваальсовый объем ΔV^* для элементарного звена полимеров. В табл. 1 представлены расчетные значения параметров растворимости полимеров.

На основе результата расчета параметров растворимости были рассчитаны межфазные поверхностные значения и значения μ и β (табл. 2). Существуют два случая растворимости: первый случай, при котором ПВХ растворяется в ПГБ, и второй случай, при котором ПГБ растворяется в ПВХ. Из результата расчета видно, что для обоих случаев выполняется неравенство $\mu < \beta$, следовательно, можно предполагать, что ПВХ в ПГБ или, наоборот, ПГБ в ПВХ растворяются друг в друге с вероятностью 85 %.

Таблица 1. Параметры растворимости полимеров

Table 1. Solubility parameters of polymers

Полимер	Энергия когезии, Дж/моль	Ван-дер-Ваальсовый объем, см ³	Параметр растворимости, (Дж/см ³) ^{1/2}
ПВХ	11065,8	48,7	19,419
ПГБ	42162,0	187,2	19,342

Таблица 2. Значения μ и β Table 2. Values of μ and β

	μ	β
Растворение ПВХ в ПГБ	1,008	1,177
Растворение ПГБ в ПВХ	0,992	1,035

Для экспериментальной проверки были подготовлены растворы на основе ПВХ и ПГБ с различным соотношением полимеров. После растворения и смешивания полимеров видно, что ПВХ и ПГБ полностью растворяются в смеси растворителей при перемешивании и температуре больше 60 °С (рис. 2).

Этот результат показывает, что расчет прогноза совместимости ПВХ и ПГБ верен. При понижении температуры перемешивания раствора до комнатной раствор имеет тенденцию образовывать гель (рис. 3).



Рис. 2. Приготовленные растворы полимеров на основе ПВХ и ПГБ

Fig. 2. Prepared polymer solutions based on PVC and PHB



(a)



(б)

Рис. 3. Гелирование растворов полимеров на основе ПВХ и ПГБ при соотношении полимеров а) 2:8 б) 8:2

Fig. 3. Gelling of polymer solutions based on PVC and PHB at polymer ratios a) 2:8 b) 8:2

На рис. 4 представлены графики зависимости динамического модуля упругости G' , модуля потерь G'' и тангенса угла потерь $tg\delta$ от времени при постоянной температуре 25 °С. Динамический модуль упругости описывает упругое, а модуль потерь – вязкостное поведение образца. Тангенс угла потерь определяется как отношение модуля потерь к динамическому

модулю упругости по формуле $tg\delta = \frac{G''}{G'}$. При значении $tg\delta < 0,1$ наблюдается практически

твердое состояние растворов. С ростом $tg\delta$ ($0,1 < tg\delta < 1$) начинается диапазон каучукоподобной

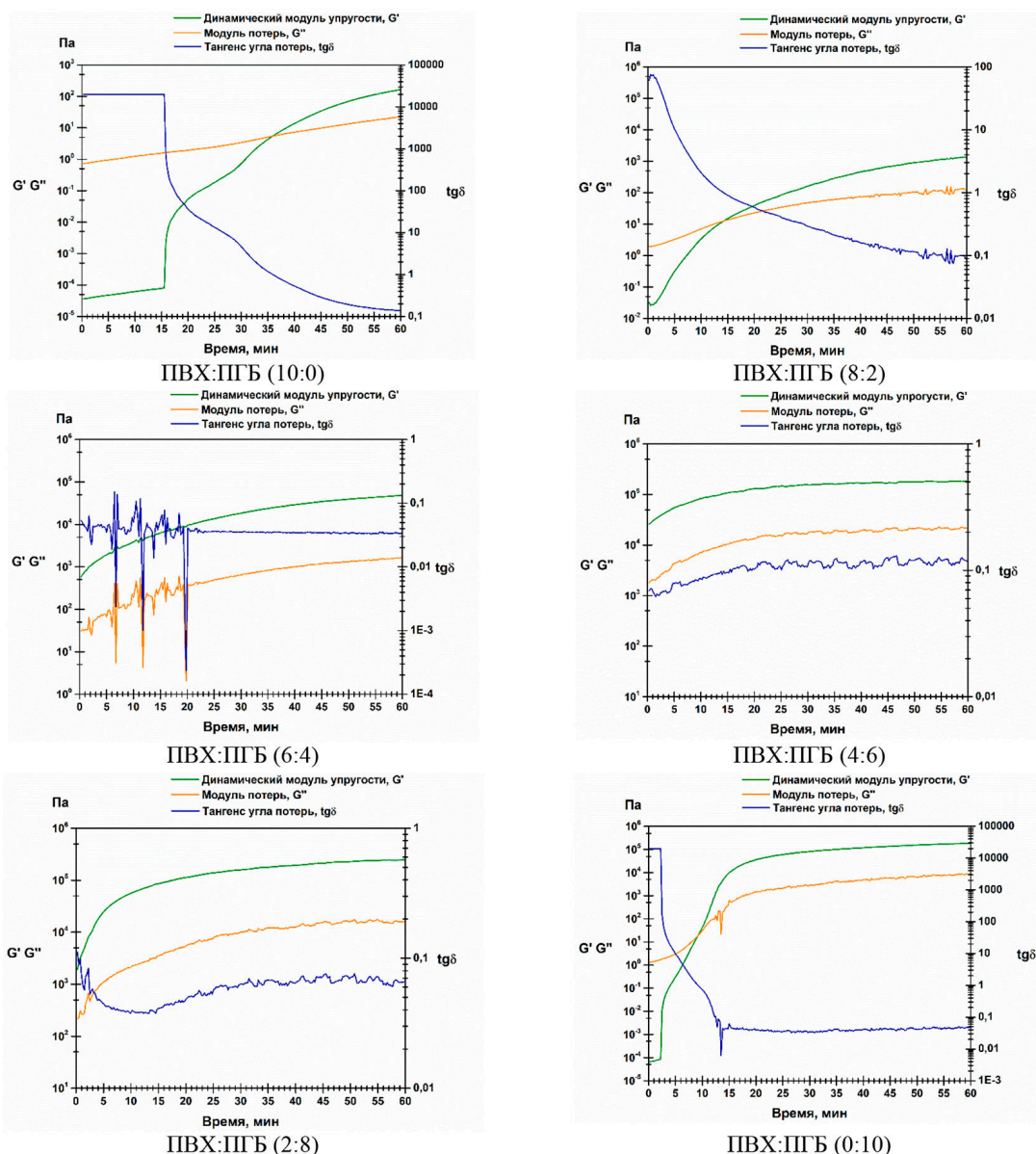


Рис. 4. Динамо-механический анализ растворов полимеров с различным соотношением ПВХ и ПГБ

Fig. 4. Dynamic-mechanical analysis of polymer solutions with different ratios of PVC and PHB

эластичности, растворы размягчаются и имеют вязкоупругую консистенцию с преобладанием упругой части. При значении $tg\delta > 1$ становится очевидным жидкостный характер данных растворов [12].

По графикам видно, что в начале для растворов с соотношением ПВХ: ПГБ 10:0, 8:2 и 0:10 наблюдается жидкостный характер, в середине раствор с соотношением ПВХ: ПГБ 10:0 ведет себя подобно жидкости, для раствора с соотношением ПВХ: ПГБ 8:2 наблюдается каучукоподобное состояние, а раствор с соотношением ПВХ: ПГБ 0:10 уже к 10-ой минуте перешел в вязкоупругое состояние. В конце растворы всех соотношений полимеров имеют вязкоупругую консистенцию. Для растворов с соотношением ПВХ: ПГБ 6:4, 4:6 и 2:8 на протяжении всего времени наблюдается вязкоупругое состояние.

Таким образом, время гелирования при температуре 25 °С для раствора с соотношением ПВХ: ПГБ 10:0 составило 35 мин, для ПВХ: ПГБ 8:2–14 мин, для ПВХ: ПГБ 0:10–9 мин. Образцы с соотношением ПВХ: ПГБ 6:4, 4:6 и 2:8 – изначально гелированные, в связи с этим время гелирования для них равно 0 мин. Видно, что введение ПГБ в ПВХ приводит к уменьшению времени гелирования. Необходимо отметить, что смеси на основе ПВХ и ПГБ с соотношением компонентов в диапазоне от 6:4 до 2:8 гелируются быстрее, чем смесь из чистого ПГБ.

На рис. 5 представлена зависимость динамической вязкости от соотношения ПВХ и ПГБ в растворе. Из графика видно, что добавление ПГБ в ПВХ приводит к увеличению вязкости растворов. То есть чем выше доля ПГБ, тем выше вязкость растворов. Кроме того, вязкость растворов с соотношением ПВХ: ПГБ 4:6 и 2:8 выше, чем у раствора из чистого ПГБ. Следовательно, повышение вязкости раствора показало, что ПВХ и ПГБ совместимы, и в растворе они взаимодействуют друг с другом.

В процессе получения полимерных материалов на основе непроводящих полимеров, таких как ПВХ и ПГБ, выполняется следующее правило: чем лучше электропроводность их растворов, тем лучше электроформирование полимерных материалов [13–15]. На рис. 6 представлена зависимость электропроводности полимерных растворов от соотношения ПВХ и ПГБ. Для рас-

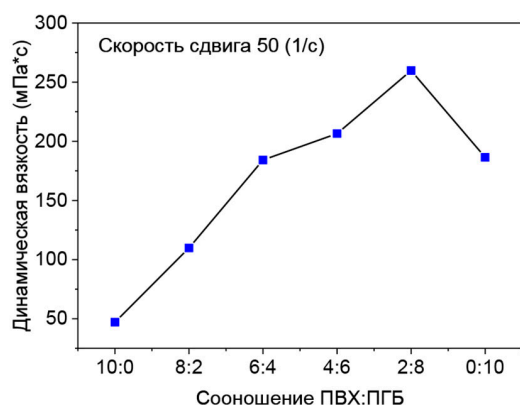


Рис. 5. Зависимость динамической вязкости от соотношения ПВХ и ПГБ

Fig. 5. Dependence of dynamic viscosity on the ratio of PVC and PHB

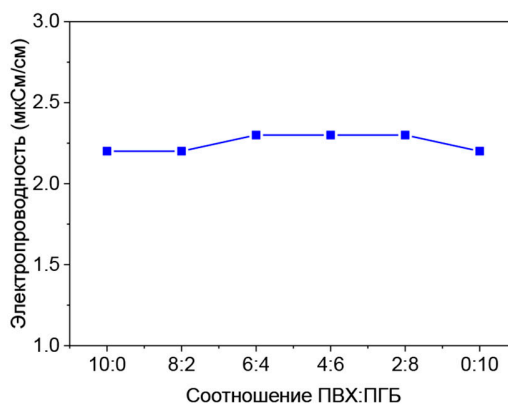


Рис. 6. Зависимость электропроводности от соотношения ПВХ и ПГБ

Fig. 6. Dependence of electrical conductivity on the ratio of PVC and PHB

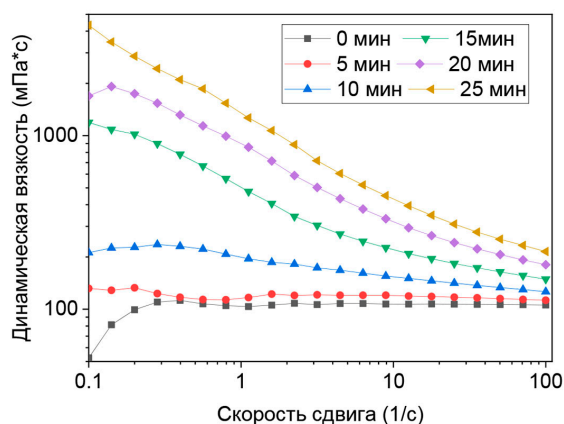


Рис. 7. Изменение вязкости ПГБ раствора от времени

Fig. 7. Change in viscosity of PNB solution over time

творов с различным соотношением компонентов изменение проводимости минимально. Так как ПВХ и ПГБ являются непроводящими полимерами, то проводимость раствора обусловлена только проводимостью растворителей.

На рис. 7 приведен график изменения вязкости ПГБ раствора от времени выдержки при температуре 25 °С. Время выдержки представляет собой время, отсчитываемое от момента прекращения перемешивания раствора и начала измерения вязкости до указанного времени измерения. Из графика видно, что вязкость раствора ПГБ при 25 °С со временем увеличивается, поэтому процесс гелирования происходит быстро. ПГБ представляет собой высококристаллический полимер, поэтому при растворении молекулы ПГБ могут образовывать микрокристаллы и тем самым способствовать более быстрому процессу гелирования. Гелирование ограничивает способность создания полимерных материалов из смесей на основе ПВХ и ПГБ. Однако гель термотропен, поэтому при нагревании кристаллы могут расплавиться и перейти в раствор [16].

Таким образом, при формировании полимерных материалов на основе ПГБ необходимо наличие нагревательного устройства для предотвращения процесса гелирования.

На рис. 8 представлен ИК-спектр полимерных пленок на основе ПВХ и ПГБ. Видно, что на спектре полимерной смеси имеются характерные пики ПВХ и ПГБ. Например, пик при 1720 cm^{-1} дает кетонную функциональную группу в ПГБ, а пик при 633 cm^{-1} – связь С–С1 в ПВХ.

На рис. 9 показаны графики зависимости прочности и удлинения пленок при прокалывании от соотношения ПВХ и ПГБ. Видно, что повышение доли ПГБ в пленке приводит к уменьшению ее прочности и удлинения при прокалывании. Максимальные прочность и удлинение наблюдаются при соотношении ПВХ и ПГБ, равными 10:0 и 8:2. Дальнейшее повышение доли ПГБ в пленке приводит к резкому уменьшению ее прочности и удлинения при прокалывании.

Вывод

На основании теоретических расчетов было показано, что можно ожидать с вероятностью 85 % растворения ПВХ в ПГБ или, наоборот, ПГБ в ПВХ. Получены растворы ПВХ и ПГБ

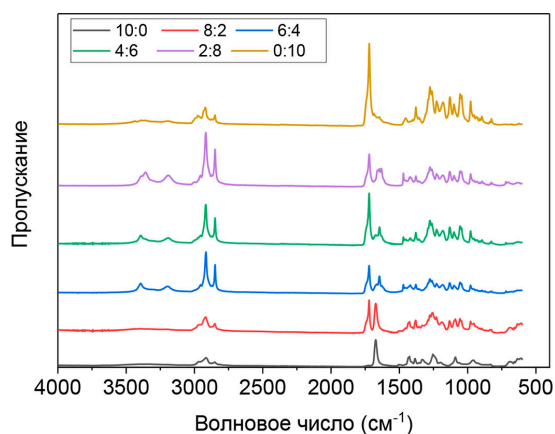


Рис. 8. ИК-спектр полимерных пленок на основе ПВХ и ПГБ

Fig. 8. IR spectrum of polymer films based on PVC and PHB

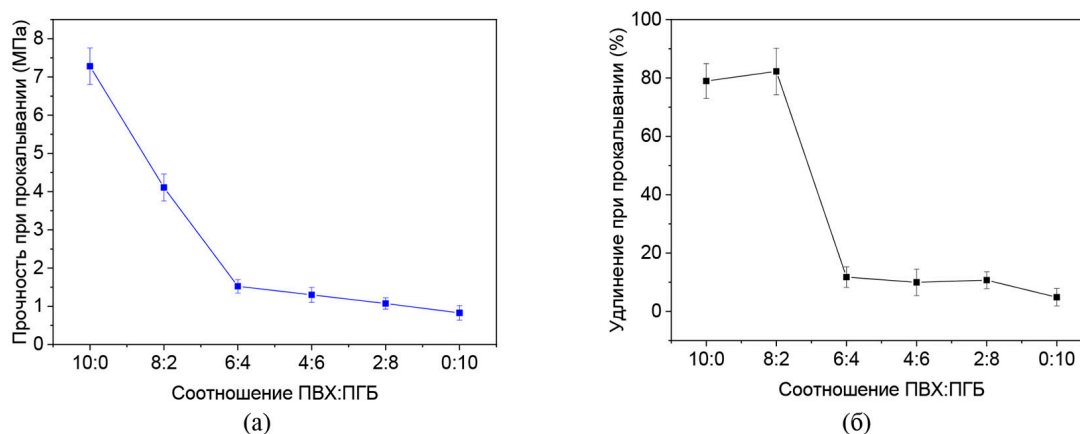


Рис. 9. Прочность и удлинение полимерных пленок при прокалывании

Fig. 9. Strength and elongation of polymer films when pierced

в смеси органических растворителей при перемешивании и температуре выше 60 °С. При уменьшении температуры с 60 до 25 °С было обнаружено, что добавление ПГБ в ПВХ приводит к ускорению процесса гелирования растворов полимеров, однако следует отметить, что растворы с соотношением ПВХ и ПГБ в диапазоне от 6:4 до 2:8 гелируются быстрее, чем смесь из чистого ПГБ. Показано, что введение ПГБ в ПВХ приводит к повышению вязкости растворов, однако стоит отметить, что вязкость растворов с соотношением ПВХ: ПГБ 4:6 и 2:8 выше, чем у раствора из чистого ПГБ, а изменение электропроводности от различного соотношения ПВХ и ПГБ в растворах оказалось минимальным и не зависит от соотношения полимеров в растворе.

Также были получены ИК-спектр и графики прочности и удлинения полимерных пленок на основе ПВХ и ПГБ при прокалывании. Повышение доли ПГБ в пленке приводит к уменьшению ее прочности и удлинения при прокалывании.

Список литературы / References

1. Ахмадеева О.А., Урусова А.С. Проблема обращения полимерных отходов в Российской Федерации. *Молодой ученый* 2016. 486–488. [Akhmadeeva O. A.; Urusova A. S. The problem of polymer waste circulation in the Russian Federation. *Molodoy uchenyy* 2016. 486–488. (In Russ.)]
2. Braun D. Recycling of PVC. *Progress in polymer science* 2002. 27(10). 2171–2195.
3. Мороз П.А., Аскадский А.А., Мацевич Т.А., Соловьева Е.В. Применение вторичных полимеров для производства древесно-полимерных композитов. *Пластические массы* 2017. 56–62. [Moroz P. A., Askadsky A. A., Matseevich T. A., Solovieva E. V. The use of secondary polymers to produce wood-polymer composites. *Plasticheskiye massy* 2017. 56–62. (In Russ.)]
4. Хамзин И.Р., Иванов А.Н., Сайтмуратов П.С., Галиева О.М. История создания и применения поливинилхлорида. *Молодежный научный вестник* 2017. 9–10, 195–198. [Khamzin I. R., Ivanov A. N., Saitmuratov P. S., Galieva O. M. The history of the creation and use of polyvinyl chloride. *Molodezhnyy nauchnyy vestnik* 2017. 9–10, 195–198. (In Russ.)]
5. Wilkes C.E., Summers J.W., Daniels C.A., Berard M.T. *PVC handbook*. Hanser Munich, 2005.
6. Шишацкая Е.И., Еремеев А.В., Гительзон И.И. Исследование свойств биodeградируемых полимеров (полиоксиалканоатов) в культуре животных клеток. *Перспективные материалы* 2001. 3, 40–47. [Shishatskaya E. I., Eremeev A. V., Gitelzon I. I. Investigation of the properties of biodegradable polymers (polyoxyalkanoates) in animal cell culture. *Perspektivnyye materialy* 2001. 3, 40–47. (In Russ.)]
7. Askadskii, A.A. Computational materials science of polymers. Cambridge Int Science Publishing, 2003. 650.
8. Askadskii A.A., Matseevich T.A., Popova M.N., Kondrashchenko V.I. Prediction of the compatibility of polymers and analysis of the microphase compositions and some properties of blends. *Polymer Science Series A* 2015. 57(2), 186–199.
9. Özdemir C., Güner A. Solubility profiles of poly (ethylene glycol)/solvent systems, I: Qualitative comparison of solubility parameter approaches. *European Polymer Journal* 2007. 43(7), 3068–3093.
10. Andropova U., Serenko O., Tebeneva N., Tarasenkov A., Askadskii A., Afanasyev E., Novikov L., Chernik V., Voronina E. Muzafarov A. New oligomeric metallosiloxane-polyimide nanocomposites for anti-atomic-oxygen erosion. *Polymer Degradation and Stability* 2021. 183, 109424.
11. Аскадский А.А., Кондращенко В.И. Компьютерное материаловедение полимеров. 1999. [Askadsky A. A., Kondrashchenko V. I. Computer Materials Science of Polymers 1999 (In Russ.)]
12. Томас Мецгер. Температурные характеристики расплавляемых связующих [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL.: <https://paar.ru/usage/articles/temperaturnye-kharakteristiki-rasplavyaemykh-svyazuyushchikh/> – (дата обращения 20.12.2020) [Thomas Mezger. Temperaturnyye kharakteristiki rasplavyayemykh svyazuyushchikh. https://paar.ru/usage/articles/temperaturnye-kharakteristiki-rasplavyaemykh-svyazuyushchikh – (accessed date 20.12.2020) (In Russ.)]
13. Ле К.Ф., Олехнович Р.О., Успенская М.В. Исследование характеристик органических растворов поливинилхлорида. *Химическая промышленность сегодня* 2020. 332, 58–61. [Le K. F., Olekhovich R. O., Uspenskaya M. V. Investigation of the characteristics of organic solutions of polyvinyl chloride. *Khimicheskaya promyshlennost segodnya* 2020. 332, 58–61. (In Russ.)]

14. Pham L.Q., Uspenskaya M.V. Morphology PVC nanofiber, produced by electrospinning method. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management; SGEM: Sofia, Boulgaria 2019*. 19, 289–295.
15. Pham L.Q., Uspenskaya M.V., Olekhovich R. O., Baranov M. A. The mechanical properties of PVC nanofiber mats obtained by electrospinning. *Fibers 2021*. 9(1), 2.
16. Мулдер М. Введение в мембранную технологию. 1999. [Mulder M. Introduction to membrane technology. 1999 [(In Russ.)]