

Синтез и свойства маслonaполненного поликапроамида

Synthesis and properties of oil-filled polycaproamide

A.P. ШЕКАЕВА, P.P. СПИРИДОНОВА

A.R. SHEKAYEVA, R.R. SPIRIDONOVA

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

alishek98@mail.ru

В работе исследовано влияние антифрикционных добавок на процесс анионной полимеризации ϵ -капролактама и на свойства синтезированных образцов. В качестве антифрикционных добавок использовались моторное масло, вакуумное масло, смазочное бытовое масло и полиметилсилоксановая жидкость. Показано, что введение антифрикционных добавок на стадии синтеза маслonaполненного поликапроамида способствует снижению скорости анионной полимеризации ϵ -капролактама. Также изучено влияние масел на комплекс физико-механических, термических и эксплуатационных свойств. Установлено, что использование масел на стадии синтеза способствует снижению коэффициента трения образцов по сравнению с контрольным образцом. Наилучший эффект наблюдается при использовании 5–7 масс.% нефтяных масел (снижение по сравнению с контрольным образцом на 50–66%). Также снижается водопоглощение образцов маслonaполненного поликапроамида, содержащих нефтяные масла (на 37% по сравнению с контрольным образцом). Вместе с тем наблюдается ухудшение физико-механических свойств и увеличение масло- и бензопоглощения.

Ключевые слова: ϵ -капролактam, анионная полимеризация, скорость, антифрикционные добавки, маслonaполненный поликапроамид, коэффициент трения

The effect of antifriction additives on the process of ϵ -caprolactam anionic polymerization and on the properties of the synthesized samples has been studied. Motor oil, vacuum oil, household lubricating oil and polymethylsiloxane fluid were used as antifriction additives. It has been shown that the introduction of antifriction additives at the stage of synthesis of oil-filled polycaproamide reduces the rate of anionic polymerization of ϵ -caprolactam. The influence of oils on the complex of physico-mechanical, thermal and operational properties has also been studied. It was found that the use of oils at the synthesis stage helps to reduce the coefficient of friction of the samples compared with the control sample. The best effect is observed when using 5–7 wt.% of petroleum oils (a decrease of 50–66% compared to the control sample). The water absorption of oil-filled polycaproamide samples containing petroleum oils is also reduced (by 37% compared to the control sample). At the same time, there is a deterioration in the physical and mechanical properties and an increase in oil and petrol absorption.

Keywords: ϵ -caprolactam, anionic polymerization, polymerization rate, antifriction additives, oil-filled polycaproamide, coefficient of friction

DOI: 10.35164/0554-2901-2023-3-4-20-24

Введение

Одной из причин выхода из строя машин является износ подвижных сопряжений и рабочих органов под влиянием сил трения. Поэтому повышение надежности и долговечности машин является одной из проблем машиностроения. Полимерные композиционные материалы показали свою эффективность для повышения износостойкости машин.

Полимерные композиционные материалы триботехнического назначения относятся к числу наиболее перспективных материалов для металлополимерных трибосистем. Применение антифрикционных самосмазывающихся полимерных композиционных материалов в узлах трения машин позволяет значительно повысить надежность и долговечность технических систем при одновременном снижении энергозатрат на их изготовление [1, 2]. Композиционный полимерный материал, работающий в паре трения с металлом, должен обладать высокими показателями теплопроводности и термостойкости, жесткости и механической прочности. Композит должен быть устойчив к воздействию влаги, а также способен образовывать устойчивые пленки из продуктов износа с низким коэффициентом трения и высокой адгезией поверхности композита к таким пленкам. Эти обстоятельства обуславливают актуальность задачи создания новых полимерных композитов с более высокими физико-механическими и триботехническими свойствами. Названная задача, как правило, решается различными методами структурной модификации полимерной матрицы. Положительный эффект при наполнении полимеров обусловлен изменением ха-

рактера межмолекулярных связей в полимере, формированием оптимальной модифицированной структуры композиционного материала [3–6].

Большое практическое значение имеет применение в качестве антифрикционного материала полиамидов. Они находят широкое применение при ремонте и модернизации машин в различных отраслях промышленности как конструкционный материал с высокими антифрикционными свойствами [7].

Несмотря на то, что поликапроамид (ПКА) сам по себе является антифрикционным материалом, дальнейшее улучшение его антифрикционных свойств является важным направлением.

Поэтому цель данной работы заключалась в синтезе ПКА в присутствии масел, а также в изучении их влияния на скорость анионной полимеризации ϵ -капролактама (ϵ -КЛ) и свойства полученных образцов.

Анализ литературы показал, что исследования в области модификации ПКА с целью улучшения его антифрикционных свойств являются актуальными [8–13]. Направленное модифицирование и управление структурой поверхностных слоев композитов позволяет разработать материал с комплексом свойств, предназначенных для конкретного узла трения. В качестве модификаторов наиболее широко используются неорганические соединения, такие как графит [8], оксиды металлов [9], порошкообразный фторопласт, мелкодисперсное углеродное волокно [10] и т.д. С целью улучшения антифрикционных характеристик ПКА также могут быть использованы вещества, способные одновременно быть плас-

тификаторами для полиамида и образовывать смазочные пленки на поверхностях трения «полимер – металл». К таким веществам относятся высшие жирные кислоты (олеиновая, стеариновая, рицинолевая) [11], масла, их содержащие (хлопковое, маисовое, касторовое) [12], а также спирты, эфиры и другие соединения, имеющие дифильное строение (полярная группа и длинная углеводная цепь) [13].

Экспериментальная часть Характеристика исходных соединений

В качестве основного мономера был выбран ϵ -КЛ (ПАО «КуйбышевАзот», Россия). В качестве катализатора в работе использовался Bruggolen C10 (Brüggemann, Германия), представляющий собой продукт взаимодействия металлического натрия с ϵ -капролактамом со следующими свойствами: молекулярная масса 190 г/моль, температура плавления 72°C. В качестве активатора использовался промышленный активатор Bruggolen C20P – гексаметилен-1,6-дикарбамоилкапролактан (Brüggemann, Германия), который представляет собой 17%-ный блокированный диизоцианат в ϵ -КЛ. В данной работе в качестве антифрикционных добавок было предложено использовать следующие масла и технические жидкости: моторное масло (МтМ), вакуумное масло (ВМ), смазочное бытовое масло (СМБ), полиметилсилоксановая жидкость (ПМС). Технические характеристики антифрикционных добавок представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики антифрикционных добавок.

Наименование показателя	МтМ	ВМ	СМБ	ПМС
Кинематическая вязкость при 40°C, м ² /с	79,1	53	32	95
Плотность при 15°C, г/см ³	0,840	0,908	0,890	0,966
Температура вспышки, °C	242	205	200	305

Методика синтеза поликапроамида

Расчетное количество предварительно высушенного ϵ -КЛ одновременно с катализатором Bruggolen C10 загружали в круглодонную колбу, в которой проводилась сама реакция. Смесь ϵ -КЛ и катализатора расплавляли при температуре 100°C, после чего температуру поднимали до 180°C, добавляя расчетное количество активатора и определенной добавки. Реакция проводилась при постоянном перемешивании в инертной среде азота. В ходе процесса из реакционной массы через определенные промежутки времени отбирались пробы. Определенное количество полученных проб экстрагировали в ацетоне, сушили, взвешивали, определяли выход и анализировали. Выход полимера определяли методом гравиметрического анализа.

Методы анализа

Термомеханический анализ. Термограммы образцов маслonaполненного ПКА снимались на приборе TMA 402F фирмы Netzsch (Германия) при постоянной нагрузке 1 Н. Образцы подвергали нагреванию в интервале от 30 до 250°C со скоростью 5°C/мин.

Дифференциально-термический и термогравиметрический методы анализа использовались для оценки термических характеристик исходного образца и образцов маслonaполненного ПКА. Термограммы образцов снимались на ТГА, ДТА анализаторе STA6000 (США) при скорости нагрева 3°C/мин до 500°C.

Физико-механические характеристики определялись на разрывной машине Inspectmini (Германия) в соответствии с ГОСТ 11262-2017. Скорость движения зажимов разрывной машины составляла 100 мм/мин.

Для определения статического коэффициента трения образцов маслonaполненного ПКА был использован прибор MXD-02 фирмы Labthink (Китай) в соответствии с ГОСТ 27492-87. Скорость движения салазки составляла 150 мм/мин, масса блока скольжения 200 г.

Масло-, бензостойкость и водопоглощение определялись выдерживанием полученных образцов в моторном масле, бензине и дистиллированной воде в течение 7 суток.

Обсуждение результатов

Использованные в работе масла можно разделить на две группы: неполярные (МтМ, ВМ, СМБ) и полярные (ПМС).

Одним из основных способов получения ПКА является анионная полимеризация ϵ -КЛ, которая позволяет избежать дополнительной стадии переработки полимера и открывает возможность формования изделий из полиамида с помощью RIM-процесса. Однако анионная полимеризация является чувствительной к различным примесям, которые способны не просто замедлить процесс, а полностью прекратить его, вследствие чего получить высокомолекулярный полимер не удастся.

Поскольку выбранные масла будут вводиться на стадии синтеза ПКА при температуре 180°C, необходимо изучить их поведение при данной температуре. ДТА- и ТГА-анализы показывают, что выбранные масла сохраняют свою термическую стабильность при температуре синтеза ПКА (рис. 1) и могут быть использованы в качестве добавок при синтезе маслonaполненного ПКА.

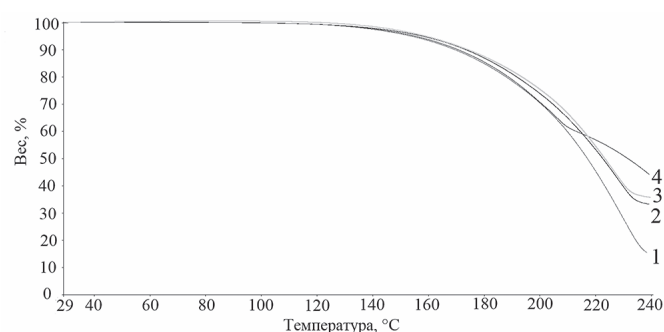


Рис. 1. ДТА- и ТГА-кривые масел: 1) МтМ, 2) ВМ, 3) СМБ, 4) ПМС.

Изучение влияния добавок на ход процесса анионной полимеризации ϵ -КЛ является важным аспектом и представляет практический интерес (рис. 2–5).

Проведение экспериментов по синтезу маслonaполненного ПКА в присутствии в качестве добавок масел показало, что активированная анионная полимеризация ϵ -КЛ протекает с высокой скоростью с образованием в течение нескольких минут твердого кристаллического полимера.

На рис. 2 приведены кинетические кривые анионной активированной полимеризации ϵ -КЛ, полученные при различных концентрациях МтМ.

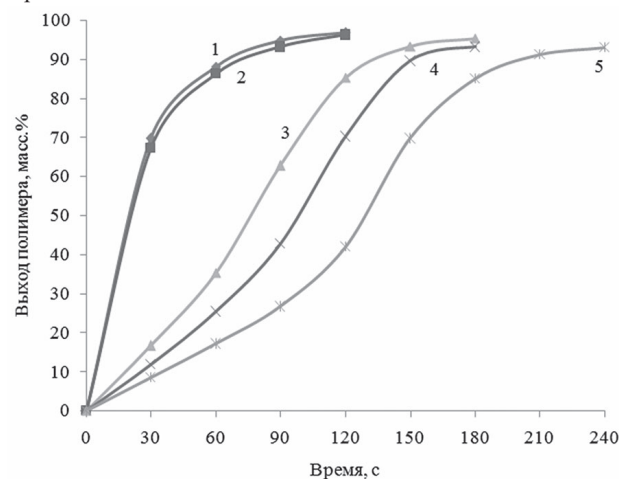


Рис. 2. Кинетические кривые анионной активированной полимеризации ϵ -КЛ в присутствии различных концентраций МтМ: 1 – 0 масс.%, 2 – 1 масс.%, 3 – 3 масс.%, 4 – 5 масс.%, 5 – 7 масс.%

Видно, что характер кривых зависит от концентрации МтМ. Для контрольного образца, а также для образца, содержащего 1 масс.% МтМ, кривая скорости имеет два участка: первый участок соответствует полимеризации в начальный момент времени, второй участок – при достижении высоких степеней конверсии. Полимеризация начинается с максимальной скоростью, которая затем с ростом конверсии уменьшается. Подобная ситуация может быть объяснена переходом реакции полимеризации из кинетической в диффузионную область. По всей вероятности, на глубоких стадиях превращения (0,7–0,8) из-за повышения вязкости в аморфной части полимера реакция роста цепи лимитируется, что связано, в первую очередь, с уменьшением подвижности ионов, а, следовательно, и скорость процесса уменьшается.

Увеличение концентрации МтМ в образцах до 3 масс.% и выше приводит к замедлению процесса. Кинетические кривые при этом имеют S-образный характер и могут быть поделены на три участка: 1 – соответствует стадии иницирования, 2 – рост полимерной цепи, 3 – проявление гелевого эффекта.

Увеличение концентрации МтМ приводит к снижению скорости процесса анионной полимеризации ϵ -КЛ на стадии иницирования, при этом продолжительность данной стадии увеличивается. Причиной снижения скорости процесса является ограниченная подвижность ионов, а также ограниченная подвижность молекул мономера за счет не только повышения вязкости, но и проявления большего стерического фактора. На стадии роста полимерной цепи наблюдается обратная зависимость. С увеличением содержания МтМ в реакционной смеси скорость процесса на стадии роста цепи увеличивается, продолжительность при этом не изменяется. На стадии, когда достигнута максимальная конверсия, зависимости скорости процесса от концентрации МтМ не наблюдается.

Следует отметить, что увеличение концентрации МтМ в образцах ПКА практически не влияет на величину максимальной конверсии, которая составляет 96–99%.

Так же, как и для МтМ, процесс анионной полимеризации ϵ -КЛ в присутствии ВМ протекает с высокой скоростью с образованием в течение нескольких минут твердого кристаллического полимера. Следует отметить, что индукционный период не наблюдается, т.е. скорость образования активных центров выше скорости роста цепи.

Введение ВМ снижает скорость анионной полимеризации ϵ -КЛ, чем выше содержание ВМ, тем ниже скорость процесса (рис. 3).

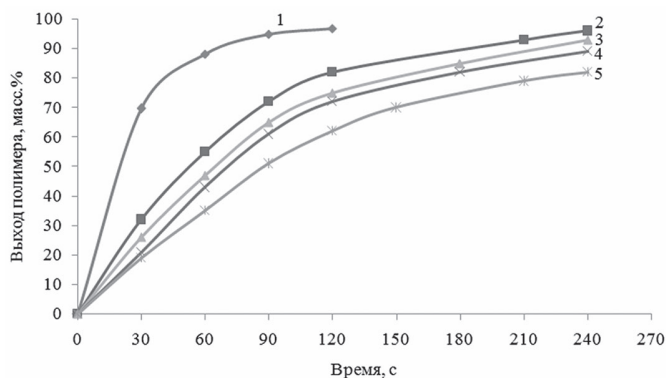


Рис. 3. Кинетические кривые анионной активированной полимеризации ϵ -КЛ в присутствии различных концентраций ВМ: 1 – 0 масс.%, 2 – 1 масс.%, 3 – 3 масс.%, 4 – 5 масс.%, 5 – 7 масс.%

Введение ВМ вне зависимости от концентрации снижает скорость процесса на обеих стадиях, увеличивая при этом продолжительность первой стадии.

Подобная зависимость наблюдается и для СБМ. По сравнению с ВМ, введение СБМ оказывает меньшее влияние на скорость процесса анионной полимеризации ϵ -КЛ на обеих стадиях (рис. 4).

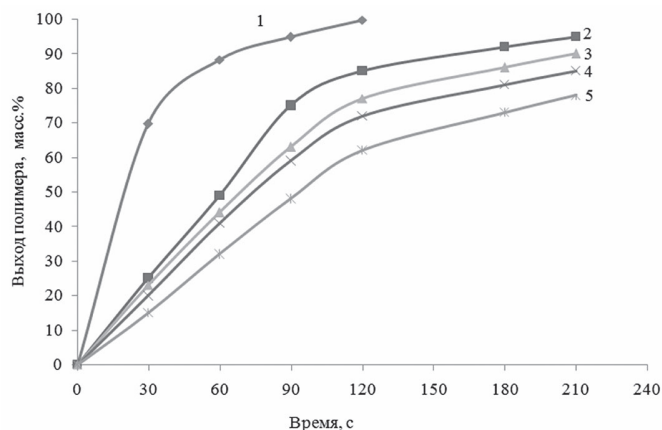


Рис. 4. Кинетические кривые анионной активированной полимеризации ϵ -КЛ в присутствии различных концентраций СБМ: 1 – 0 масс.%, 2 – 1 масс.%, 3 – 3 масс.%, 4 – 5 масс.%, 5 – 7 масс.%

Введение ПМС также приводит к снижению скорости процесса анионной полимеризации ϵ -КЛ, однако характер кинетических кривых не изменяется (рис. 5). С увеличением концентрации ПМС

его влияние на процесс анионной полимеризации ϵ -КЛ проявляется сильнее. Чем выше концентрация ПМС, тем ниже скорость процесса анионной полимеризации ϵ -КЛ. Это связано с наличием в молекуле ПМС подвижного атома водорода, который участвует в конкурирующих реакциях с активными центрами, препятствуя тем самым достижению высоких степеней конверсии. Введение ПМС оказывает влияние и на продолжительность процесса, увеличивая время достижения высоких степеней конверсии.

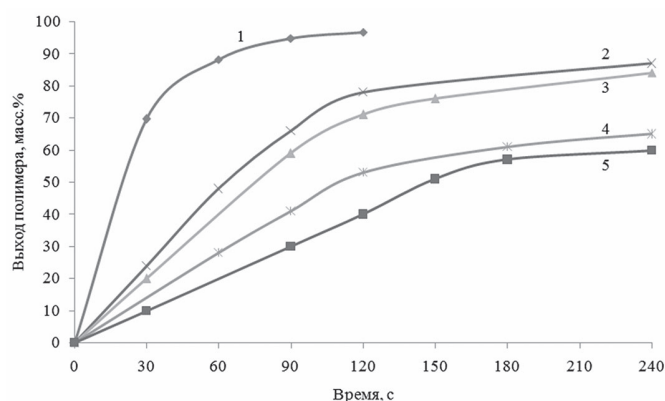


Рис. 5. Кинетические кривые анионной активированной полимеризации ϵ -КЛ в присутствии различных концентраций ПМС: 1 – 0 масс.%, 2 – 1 масс.%, 3 – 3 масс.%, 4 – 5 масс.%, 5 – 7 масс.%

Таким образом, изучение кинетики процесса анионной полимеризации ϵ -КЛ в присутствии МтМ, ВМ, СБМ и ПМС позволило установить, что введение смазывающих материалов на стадии синтеза снижает скорость анионной полимеризации ϵ -КЛ, увеличивает продолжительность процесса. При этом наблюдается прямая зависимость от концентрации добавки – с увеличением содержания смазочного агента в образце скорость процесса анионной полимеризации ϵ -КЛ уменьшается.

Основной целью введения антифрикционных добавок являлось изучение влияния выбранных масел на коэффициент трения.

Принцип действия масел может быть описан следующим образом. Поскольку ПКА является полярным полимером, он несовместим с неполярными маслами. Данный факт исключает проникание молекул масел в полимерную сетку и набухание полимерной матрицы, т.е. молекулы масла должны находиться в аморфной области или на границе раздела фаз. С течением времени масла будут вытесняться из объема полимера, образуя на поверхности трения масляную пленку, способствующую снижению коэффициента трения.

При использовании полярной ПМС должно проявляться взаимодействие с полимерной матрицей за счет водородных связей. Однако наличие в молекуле ПМС подвижного атома водорода препятствует анионной полимеризации ϵ -КЛ, и получить высокомолекулярный ПКА становится затруднительным.

Результаты измерения коэффициентов трения образцов маслосодержащего ПКА представлены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, введение антифрикционных добавок приводит к снижению коэффициента трения по сравнению с контрольным образцом. Вне зависимости от типа антифрикционной добавки увеличение концентрации масла приводит к снижению коэффициента трения, что объясняется увеличением толщины слоя масел на поверхности образцов ПКА. Наибольший положительный эффект наблюдается при введении в реакционную систему 7 масс.% МтМ.

Введение масел также оказывает влияние на термические свойства образцов маслосодержащего ПКА (таблица 2).

Как видно из таблицы 2, введение смазывающих материалов оказывает влияние как на температуру деструкции, так и на температуру плавления. В случае использования МтМ, ВМ и СБМ температура деструкции остается на уровне контрольного образца. Следует отметить, что для образца ПКА, содержащего 5 масс.% МтМ, наблюдается смещение температуры начала деструкции в область более высоких температур по сравнению с контрольным образцом. Увеличение температуры начала деструкции ПКА, содержащего МтМ в концентрации 5 масс.%, вероятно, связано с достижением оптимальной концентрации стабилизаторов, содержащихся в масле и способствующих перехватыванию образующихся при разрушении ПКА радикалов.

Таблица 2. Коэффициент трения и термические характеристики образцов маслonaполненного ПКА (C – концентрация добавки, $T_{1\%}$ – температура начала деструкции, $T_{н.пл.}$ – температура начала плавления, $T_{пл.}^0$ – равновесная температура плавления, μ – коэффициент трения).

Добавка	C , масс.%	$T_{1\%}$, °C	$T_{н.пл.}$, °C	$T_{пл.}^0$, °C	μ
–	–	304	210	217	0,302
МтМ	1	305	212	215	0,244
	3	308	211	214	0,204
	5	378	209	214	0,146
	7	315	206	213	0,102
ВМ	1	306	205	216	0,241
	3	304	205	215	0,177
	5	305	209	215	0,151
	7	304	209	215	0,104
СБМ	1	310	203	217	0,250
	3	308	210	217	0,133
	5	307	205	216	0,109
	7	314	211	216	0,107
ПМС	1	297	209	216	0,216
	3	279	209	216	0,204
	5	294	–	–	0,192
	7	289	–	–	0,138

ПМС оказывает негативное влияние на термостойкость образцов по сравнению с предыдущими добавками (таблица 2). При введении ПМС проявляется более отчетливый ступенчатый характер деструкции образцов ПКА (рис. 6).

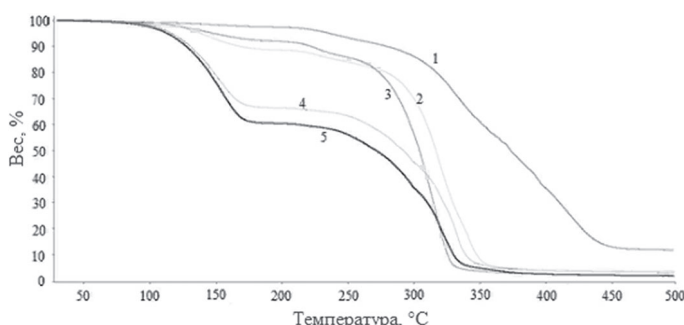


Рис. 6. ТГА-кривые образцов ПКА, содержащих ПМС в концентрациях: 1 – 0 масс.%, 2 – 1 масс.%, 3 – 3 масс.%, 4 – 5 масс.%, 5 – 7 масс.%.

При содержании в образцах ПКА 5 и 7 масс.% ПМС – 33 и 39% образца соответственно подвергаются первичной деструкции, что объясняется наличием большого количества непрореагировавшего ϵ -КЛ. Образующиеся при деструкции радикалы могут вызвать преждевременное разрушение непосредственно полимерной матрицы, вследствие чего наблюдается снижение температуры деструкции образцов по сравнению с контрольным образцом. Для образцов ПКА, содержащих 1 и 3 масс.% ПМС, наблюдается незначительное понижение температуры плавления. Для образцов, содержащих 5 и 7 масс.% ПМС, определить истинные температуры плавления не представляется возможным, поскольку процесс плавления накладывается на процесс разрушения.

Введение масел оказывает влияние также на твердость, водопоглощение, масло- и бензостойкость образцов (таблица 3).

Как видно из таблицы 3, введение добавок способствует снижению твердости образцов ПКА. Причем для МтМ, ВМ и СБМ значения твердости находятся на одном уровне и не зависят от концентрации масла. Наименьшие значения твердости характерны для образцов ПКА, содержащих ПМС, причем с увеличением концентрации добавки твердость снижается.

К недостаткам полиамидов относится некоторая гигроскопичность (особенно для капрона). Введение масел на стадии синтеза ПКА позволяет снизить водопоглощение образцов по сравнению с контрольным образцом. Это может быть объяснено образованием на поверхности образца ПКА масляной пленки, которая препятствует проникновению молекул воды в структуру полимера. Самые низкие значения водопоглощения характерны для образцов

ПКА, содержащих ВМ в концентрациях 5 и 7 масс.%. Для образцов ПКА, содержащих ПМС, объективно оценить водопоглощение невозможно, поскольку процесс поглощения воды, набухания (т.е. повышение массы) полимера и растворения ϵ -КЛ (снижение массы) протекают одновременно.

Таблица 3. Твердость по Шору (HSD), водопоглощение (ω_B), масло- (ω_M) и бензостойкость (ω_B) образцов ПКА, содержащих масла.

Добавка	C , масс.%	HSD, %	ω_B , %	ω_M , %	ω_B , %
–	–	77,7	3,93	5,75	2,44
МтМ	1	69,3	2,96	5,58	2,60
	3	70,3	2,73	6,18	2,79
	5	69,7	2,65	6,45	2,92
	7	69,3	2,46	6,82	3,04
ВМ	1	73,7	3,04	5,46	2,56
	3	69,7	2,59	6,01	2,63
	5	71,3	2,36	6,87	2,70
	7	69,3	2,29	7,01	2,81
СБМ	1	69,7	3,32	6,06	2,41
	3	70,3	3,07	6,52	2,49
	5	68,7	2,76	6,86	3,13
	7	70	2,43	6,98	3,29
ПМС	1	67,3	2,89	7,69	3,40
	3	59	2,36	7,72	3,45
	5	57,7	2,97	8,21	3,49
	7	54,5	2,73	8,83	3,56

Масло- и бензостойкость образцов маслonaполненного ПКА несколько ниже по сравнению с ненаполненным ПКА. Это может быть объяснено меньшим межмолекулярным взаимодействием в образцах полимера, содержащих масла. С увеличением концентрации масел значения масло- и бензостойкости снижаются. Наихудшее влияние на масло- и бензостойкость образцов оказывает ПМС.

Анализ физико-механических свойств синтезированных полимеров показал, что введение антифрикционных добавок вне зависимости от типа масла и его концентрации способствует снижению физико-механических свойств ПКА (таблица 4). С увеличением концентрации введенной добавки наблюдается снижение напряжения разрушения и относительного удлинения. Это объясняется различной природой и несовместимостью полимерной матрицы и нефтяных масел, вследствие чего происходит расслоение в объеме полимера, что приводит к снижению свойств ПКА. В случае использования ПМС снижение свойств объясняется содержанием в ПКА большого количества непрореагировавшего мономера.

Таблица 4. Физико-механические характеристики образцов ПКА, содержащих масла (σ_p – напряжение разрушения; $E(b)$ – модуль упругости; ϵ – относительное удлинение).

Добавка	Концентрация, масс.%	σ_p , МПа	$E(b)$, МПа	ϵ , %
–	–	60	574	277
МтМ	1	47	332	140
	3	39	330	123
	5	36	271	112
	7	29	184	169
ВМ	1	52	432	224
	3	44	343	144
	5	38	259	122
	7	35	274	227
СБМ	1	52	350	217
	3	45	296	215
	5	31	264	191
	7	25	318	165
ПМС	1	35	340	173
	3	26	354	138
	5	21	202	111
	7	18	248	115

Выводы

Изучено влияние масел на процесс анионной полимеризации ϵ -капролактама и на свойства полученных образцов поликапроамида. Показано, что введение масел оказывает влияние на скорость анионной полимеризации ϵ -капролактама, способствуя снижению скорости процесса. Вне зависимости от типа масла и его концентрации наблюдается одинаковая зависимость – увеличение концентрации масла приводит к снижению скорости процесса.

Установлено, что введение масел оказывает влияние на весь комплекс свойств маслonaполненного поликапроамида. Несмотря на то, что при введении смазывающих агентов понижается коэффициент трения образцов, снижается водопоглощение, наблюдается ухудшение физико-механических свойств маслonaполненного поликапроамида.

Невысокая вязкость жидких смазочных материалов обуславливает затруднения при введении их в нужном количестве в полимер на стадии переработки в изделия. Кроме этого, возможны случаи отделения масла от расплава полимера, неравномерное его распределение в объеме. Поэтому перспективным направлением в синтезе маслonaполненного поликапроамида является использование пластичных смазочных материалов, состоящих из смеси минеральных и синтетических масел, стабилизированных мылами или другими загустителями, а также высокомолекулярных функционализированных масел, не содержащих гидроксильные группы, или полярных масел без подвижного атома водорода.

Литература

1. Бабаевский П.Г. Промышленные полимерные композиционные материалы / П.Г. Бабаевский. – М.: Химия, 1980. – 472 с.
2. Богун В.С. Подшипники скольжения из антифрикционных углепластиков для центробежных насосов энергетических установок / В.С. Богун, В.Е. Бахарева, А.В. Анисимов // Вопросы материаловедения. – 2010. – №1. – с. 60–65.
3. Бабич Р. Наполнители для полимеров / Р. Бабич // Полимеры – деньги. – 2006. – №3. – с. 30–33.
4. Веттегрень В.И. Влияние формы частиц наполнителя на прочность полимерного композита / В.И. Веттегрень, А.Я. Башкарев, М.А. Сулов // Журнал технической физики. – 2007. – №6. – с. 135–138.
5. Гольдаде В.А. Ингибиторы изнашивания металлополимерных систем / В.А. Гольдаде, В.А. Струк, С.С. Песецкий. – М.: Химия, 1993. – 240 с.
6. Кох-Татаренко В.С. Исследование антифрикционных свойств армированного полиамида / В.С. Кох-Татаренко, Н.Ф. Майникова, О.И. Кладовщикова, К.С. Пиминова, Ю.А. Шабалтас, Т.П. Кравченко // Успехи в химии и химической технологии. – 2016. – №10. – с. 46–48.
7. Бобровников Г.А. Применение синтетических материалов при ремонте и модернизации машин / Г.А. Бобровников. – Москва, Киев: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. – 166 с.
8. Сытар В.И. Самосмазывающиеся материалы на основе фенилона и коллоидных графитов / В.И. Сытар, И.А. Фомичев, А.И. Буря // Вопросы химии и химической технологии. – 1976. – Т. 44. – с. 69–71.
9. Горбунова Е.В. Кинетические особенности полимеризации капро- и додекалактама в присутствии окислов меди, ванадия, марганца, молибдена и кобальта / Е.В. Горбунова, Л.Г. Казарян, В.Д. Цветков, А.Е. Азриэль, Е.А. Рябов, Ю.С. Деев // Высокомолекулярные соединения. – 1988. – Т. 30, №2. – с. 342–348.
10. Прусс Б.Н. К вопросу об опорах скольжения на основе композиционных антифрикционных материалов / Б.Н. Прусс, А.Г. Башмаков, М.В. Швыряев // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2012. – №15. – с. 118–126.
11. Дерлугян П.Д. Процесс получения композиционного самосмазывающегося материала «Маслянит-ГМ» методом химического конструирования / П.Д. Дерлугян, В.А. Левинцев // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. – 2014. – №2. – с. 9–15.
12. Конструкционные материалы на основе полиамида 6. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://mpri.org.by/departments/dep5/developments/dep5-polyamide.html>
13. Дерлугян Ф.П. Обоснование процесса получения композиционных антифрикционных самосмазывающихся материалов с заданными техническими характеристиками методом химического наноконструирования / Ф.П. Дерлугян, И.Н. Щербаков // Инженерный вестник Дона. – 2010. – Т. 4, №14. – с. 389–407.