ФИЗИКОХИМИЯ ПОВЕРХНОСТИ И ЗАЩИТА МАТЕРИАЛОВ, 2021, том 57, № 3, с. 322–327

НОВЫЕ ВЕЩЕСТВА, МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ

УДК 541.64532.135:536.6

ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В СМЕСЯХ ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ С 90 МАС. % НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ПОСЛЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

© 2021 г. В. А. Жорин^{1,} *, М. Р. Киселев², В. А. Котенев²

¹Учреждение Российской академии наук Институт химической физики им. Н.Н. Семенова, ул. Косыгина, 4, Москва, 119991 Россия

ул. Косыгина, 4, москва, 119991 Россия

²Учреждение Российской академии наук Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Ленинский просп., 31, Москва, 119991 Россия

*e-mail: vzhorin@mail.ru Поступила в редакцию 03.10.2020 г. После доработки 11.12.2020 г. Принята к публикации 12.01.2021 г.

Смеси полиэтилена низкой плотности ($T_{пл} = 108$ °C, энтальпия плавления 80 Дж г⁻¹) с 90 мас. % индиго, лофина, бромкрезолового пурпурного, спиропирана, фенолового красного, родамина, фенолфталеина, флуоресцеина подвергали пластическому деформированию под давлением 1 ГПа на аппарате высокого давления типа наковален. Исследование деформированных смесей проводили методом ДСК. На термограммах нагревания смесей присутствовали пики плавления полимера с энтальпиями, которые варьировались от 25 до 170 Дж г⁻¹. На термограммах ниже $T_{пл}$ полимера присутствовали либо эндопики плавления мелких кристаллитов с максимумами при 44–57°C, энтальпии которых варьировались в пределах 20–120 Дж г⁻¹, либо экзопики кристаллизации мелких кристаллитов с максимумами при 58–67°C и энтальпиями от 20 до 45 Дж г⁻¹. В диапазоне 81–86°C в некоторых смесях протекал экзопроцесс холодной кристаллизации полимера, энтальпия которого варьировались от 75 до 290 Дж г⁻¹. При температурах выше $T_{пл}$ полимера в диапазоне 115–132°C на термограммах нагревания присутствовали экзопики с энтальпиями от 115 до 420 Дж г⁻¹, а в диапазоне 137–164°C – эндопики с энтальпиями 520–540 Дж г⁻¹. Кристаллизация большинства смесей из расплава описывалась двумя пиками, один из которых всегда находился при 87°C, а второй мог находиться при 48 или 112°C. Суммарные энтальпии кристаллизации варьировались от 40 до 82 Дж г⁻¹.

Ключевые слова: высокое давление, пластические деформации, полиэтилен, низкомолекулярные компоненты, смеси

DOI: 10.31857/S0044185621030268

введение

Полимерные композиционные материалы с органическими и неорганическими наполнителями широко используется в самых разных областях науки и техники [1–3]. Помимо распространенных конструкционных материалов, такие композиты также используются в качестве функциональных материалов. Особый интерес вызывает использование в качестве компонента композитов как низкомолекуляных органических, так и макроциклических модификаторов. Получаемые при этом новые композиционные материалы могут обладать новыми функциональными, релаксационными, теплофизическими, электрическими, защитными свойствами [4–6].

При формировании подобных гетерогенных композитов часто используется метод интенсив-

ного пластического деформирования [7]. При совместном воздействии одноосного сжатия и сдвига в полимерных материалах протекают процессы структурной перестройки как кристаллической, так и аморфной фазы [7, 8]. Это позволяет активно воздействовать на молекулярно-химические и структурно-морфологические характеристики полимерных материалов. В частности, интенсивное пластическое деформирование гетерогенных смесей в аппаратах Бриджмена сопровождается образованием протяженных межфазных границ, на которых может происходить перераспределение электрических зарядов. При этом на разнородных соприкасающихся межфазных границах возникают заряды противоположных знаков, в результате чего формируются двойные электрические слои [3, 9]. Дополнительное действие такого "встроенного" электрического поля может заключаться в стабилизации структуры композита при изменениях температуры окружающей среды, что может означает рост стабильности защитных, механических, функциональных свойств композитов в широких температурных диапазонах.

При пластическом деформировании под высоким давлением, проводимом на аппаратах высокого давления типа наковален, в твердых телах с различным типом химических связей степени деформации могут достигать тысяч раз без нарушения макросплошности. При такой обработке в образцах формируется большое количество структурных дефектов. Так, в работе [10] было установлено, что при пластическом деформировании под давлением 0.5–2.0 ГПа в полиолефинах происходит снижение молекулярной массы. Деструкция полимеров в таких условиях слабо зависит от давления обработки, но сильно от степени деформации – угла поворота наковален.

В бикомпонентных смесях пластическому деформированию подвергаются оба компонента. В этом случае количество структурных дефектах в каждом из компонентов существенно больше, чем при деформировании индивидуальных веществ [10]. В работе [11] методом ДСК было установлено, что на термограмме полиэтилена (ПЭ) деформированного под давлением 1 ГПа при $T = 66^{\circ}$ С присутствует эндотермический пик с энтальпией 4.9 Дж г⁻¹, который связывали с плавлением и рекристаллизацией кристаллов маленьких размеров. В работе [12] исследовали молекулярную подвижность в деформированном ПЭ методом ЭПР и методом измерений спада свободной индукции и установили, что в аморфной фазе полимера образуются упорядоченные области малого размера, плотность которых оказалась выше плотности исходной аморфной фазы. В работе [13] на термограмме деформированного полипропилена (ПП) наряду с эндопиком плавления регистрировали экзопик с максимумом при 110°С, который можно было наблюдать только при первом нагревании. Этот пик связывали с процессом холодной кристаллизации ПП.

Очевидно, в полиолефинах в процессе пластического деформирования реализуется подвижность на сегментальном уровне. Это обстоятельство, по-видимому, во многом определяет перестройки надмолекулярной структуры, как в аморфной фазе, так и в кристаллической. В бикомпонентных смесях за счет высокой молекулярной подвижности можно ожидать формирование в приграничных слоях разнородных компонентов метастабильных фаз, создание которых в обычных условиях невозможно из-за их термодинамической несовместимости.

В работе [14] смеси ПЭ низкой плотности (ПЭНП) и ПЭ высокой плотности (ПЭВП) с циануровой кислотой (40-90 мас. %) подвергали пластическому деформированию под давлением 0.5-3.0 ГПа и анализировали методом ДСК. Было установлено, что при нагревании деформированных смесей в ПЭНП протекает процесс холодной кристаллизации, а энтальпия плавления уменьшается. В смесях с ПЭВП формируются сверхмелкие кристаллиты, а энтальпия плавления возрастает в 1.8 раза. Процесс восстановления кристаллической структуры полимера сопровождается выделением энергии запасенной на структурных дефектах, разного рода границах раздела, формируемых в полимерной фазе в процессе пластического деформирования. Наряду с этим в смесевых образцах формируется протяженная межфазная граница, которая может являться средоточием зарядовых состояний. Действительно, при деформировании бикомпонентых смесей между разнородными компонентами возникает разветвленная межфазная граница, на которой формируются двойные электрические слои - противоположные поверхности соприкасающихся гетерофаз несут разнородные заряды. При уменьшении размеров гетерогенных областей возрастает количество атомов и молекул, лежащих на поверхности, по сравнению с внутренними. Таким образом, не только атомы и молекулы находящиеся на поверхностях раздела, но и ближайшие к поверхности атомарные и молекулярные слои оказываются в поле действия градиентов электрических полей. Этот эффект неизбежно приведет к поляризации электронной структуры индивидуальных атомов и молекул, а также фрагментов полимерных макроцепей.

В данной работе было проведено комплексное исследование тепловых и релаксационных процессов плавления и кристаллизации полиэтиленов в смесях с 90 мас. % ряда низкомолекулярных органических соединений после пластического деформирования под высоким давлением. Представляло интерес исследовать смеси полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) с различными низкомолекулярными органическими соединениями с разветвленной электронной структурой, способной поляризоваться в зависимости от окружающих молекул. Многоэлектронные органические соединения обладают большими мольными массами (например, фенолфталеин имеют мольную массу 318, а полиэтилен – 14). При эквимольном соотношении компонентов в смеси фенолфталеин-полиэтилен весовое соотношение компонентов составит 96.4 мас. %. В этой связи обработке под давлением подвергали смеси 10 мас. % ПЭНП с различными низкомолекулярными органическими компонентами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования был выбран порошкообразный полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) с размером частиц 20-50 мкм, а также органические вещества: меламин, индиго, лофин. бромкрезоловый пурпупный. спиропиран. феноловый красный, родамиин, фенолфталеиин, флуоресцеин. Температура плавления ПЭНП составляет 108°C, а энтальпия плавления — 80 Дж r^{-1} ; кристаллизация ПЭНП проходит при 84°С с энтальпией 84 Дж г⁻¹. Смеси содержавшие 10 мас. % ПЭНП готовили в ступке, а затем подвергали пластическому деформированию под давлением 1 ГПа при комнатной температуре на аппарате высокого давления типа наковален Бриджмена. Диаметр рабочих поверхностей наковален составлял 20 мм. Для анализа использовали материал из кольцевой зоны 15-20 мм. Анализ образцов проводили на микрокалориметре Q100 TA Instruments: массу образцов варьировали в пределах 2-7 мг: скорость нагрева и охлаждения составляла 20 град/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На термограмме нагревания смеси с меламином присутствовал одиночный эндопик плавления ПЭНП с максимум при 108°С и энтальпией 80 Дж г⁻¹. На термограммах нагревания других смесей, деформированных под давлением, присутствовала суперпозиция эндо- и экзотермических пиков, максимумы которых могли находиться как ниже, так и выше температуры плавления $(T_{\pi\pi})$ полимера. Так, на термограмме смеси с индиго присутствовал эндопик плавления ПЭНП при 106-108°C, энтальпия плавления которого составила 36 Дж Γ^{-1} — это лишь 44% от энтальпии исходного полимера (рис. 1). На термограмме смеси с индиго в низкотемпературном диапазоне регистрировали суперпозицию эндопика с максимумом при 47°С и энтальпией 20–25 Дж Γ^{-1} и экзопика с максимумом при 67°С и энтальпией 118 Дж г⁻¹.

На термограммах смесей с бромкрезоловым пурпурным, лофином и спиропираном плавление ПЭНП проходило при 106–108°С с энтальпиями 25, 123 и 39 Дж г⁻¹, соответственно. На термограммах лофина и бромкрезолового пурпурного при 58 и 60°С присутствовали экзопики с энтальпиями 20 и 28 Дж г⁻¹, а на термограмме смеси со спиропираном при 44°С присутствовал эндопик с энтальпией 17 Дж г⁻¹. Доминировали же на термограммах этих смесей экзопики с максимумами при 67, 72 и 86°С с энтальпиями 100 и 240 Дж г⁻¹ (рис. 1, 2). Характерной особенностью термограммы смеси со спиропираном при 142°С и энтальпией 520 Дж г⁻¹.



Рис. 1. Термограммы нагревания смесей ПЭНП + + 90 мас. % с меламином (*1*), индиго (*2*), бромкрезоловым пурпурным (*3*) и лофином (*4*) после деформирования под давлением 1 ГПа.

На термограммах смесей с родамином, фенолфталеином и феноловым красным, и на термограммах нагревания отсутствовали пики плавления ПЭНП при 108°С. В диапазоне 67–84°С присутствовали экзопики с энтальпиями 33–145 Дж г⁻¹, а доминировали экзопики с максимумами при 115–132°С и энтальпиями от 115 до 416 Дж г⁻¹. При температурах 137–165°С на термограммах присутствовали эндопики с энтальпиями, варьировавшимися в пределах от 54 до 172 Дж г⁻¹ (в смеси со спиропираном аналогичный пик находился при 142°С с энтальпией 520 Дж г⁻¹).

На термограмме нагревания смеси с флуоресцеином в низкотемпературной области присутствовал эндопик с максимумом при 57°С и энтальпией 18 Дж г⁻¹. При температуре 108°С присутствовал эндопик плавления, который перекрывался с эндопиком, максимум которого находился при 130°С; суммарная энтальпия этих эндопиков составила 170 Дж г⁻¹. При 161°С на термограмме присутствовал экзотермический пик с энтальпией 140 Дж г⁻¹ (рис. 2).

В смеси с дитизонатом плавлению соответствует одиночный пик, а в смеси с флуоресциином плавление описывается двумя перекрывающимися пиками с максимумами при 108 и 130°С. В обеих смесях в низкотемпературном диапазоне



Рис. 2. Термограммы нагревания смесей ПЭНП + + 90 мас. % со спиропираном (*1*), родамином (*2*), фенолфталеином (*3*), феноловым красным (*4*) и флуоресцеином (*5*).

протекают эндопроцессы с максимумами при 50 и 57°C и энтальпиями 49 и 19 Дж г $^{-1}$.

Таким образом, наряду с эндопиком плавления на термограммах нагревания всех деформированных смесей присутствовали эндо – и экзопики, как при температурах выше, таки ниже $T_{пл}$ полимера. По знаку теплового эффекта низкотемпературные эндопики на термограммах соответствуют плавлению, а экзопик – кристаллизации или рекристаллизации. Снижение $T_{пл}$ кристаллических материалов обычно связывают с уменьшением размеров частиц материалов.

Мультимодальное плавление — несколько эндопиков при температурах ниже $T_{пл}$ полимера на термограммах нагревания — описано в литературе и связано с несколькими причинами. При нагревании бикомпонентных смесей индивидуальных полимеров на термограммах присутствуют эндопики, соответствующие плавлению обоих компонентов [15, 16]. Бимодальное плавление установили в привитых сополимерах [17], а также в статистических [18, 19]. Мультимодальное плавление регистрировали также и в индивидуальных полимерах. Так плавление сверхразветвленного полиэтилена низкой плотности и кристалличности описывалось несколькими эндопиками [19]. Бимодальность плавления в большей степени выражена в образце с большей молекулярной массой. Эндо пик при более низкой температуре связывали с формированием мелких кристаллитов и эпитаксиальным механизмом роста кристаллов. В этом случае центры кристаллизации находятся на поверхности гетерофазы (в нашем случае на поверхности низкомолекулярного компонента). При таком механизме в ближайших к поверхности гетерофазы атомно-молекулярных слоях кристаллизующегося полимера будут формироваться мелкие кристаллы, а в удаленных — кристаллы обычного размера.

Представляло интерес исследовать процесс кристаллизации ПЭНП из расплава в различных деформированных смесях. Для этого смеси нагревали до 160–180°С и охлаждали со скоростью 20 град мин⁻¹. На термограмме охлаждения исходного ПЭНП присутствовал одиночный экзопик кристаллизации с максимумом при 88°С и энтальпией 84 Дж г⁻¹.

На термограмме охлаждения смеси с индиго присутствовал пик с максимумом при 87°С, на высокотемпературной стороне которого присутствовало плечо при 96°С; суммарная энтальпия в этом случае составила 52 Дж г⁻¹ (рис. 3). Таким образом, в смеси с индиго энтальпия плавления полимера меньше, чем энтальпия кристаллизации ПЭНП из расплава.

Процесс кристаллизации ПЭНП в смесях с лофином и спиропираном, описывался одиночными экзопиками с максимумами при 88 и 90°С и энтальпиями 75 и 7 Дж г⁻¹, соответственно. На термограмме охлаждения смеси с бромкрезоловым пурпурным присутствовали два перекрывающихся экзопика с максимумами при 70 и 87°С и суммарной энтальпией 55 Дж г⁻¹.

На термограммах охлаждения смесей с феноловым красным, родамином и фенолфталеином кристаллизация полимера описывалась бимодальными пиками с максимумами при 50–85, 48– 60 и 86–111°С и суммарными энтальпиями 82, 130 и 38 Дж r^{-1} , соответственно.

На термограмме охлаждения смеси с флуоресцеином кристаллизация описывалась двумя пиками с максимумами при 51 и 94°С с суммарной энтальпией 55 Дж г⁻¹.

Кристаллизация полиэтилена из расплава протекает при температурах ниже T_{nn} , то есть в переохлажденных расплавах. При кристаллизации ПЭ в блоке переохлаждение составляет 25°С, а при кристаллизации капель раствора диаметром 2–9 мкм переохлаждение достигает 55°С. В деформированных смесях, в которых процесс кристаллизации полимера описывался одиночными экзопиками (лофин, спиропиран), температуры максимумов на термограммах совпадали с темпе-



Рис. 3. Термограммы кристаллизации из расплава деформированных смесей ПЭНП + 90 мас. % с индиго (1) и бромкрезол пурпурным (2), фенолфталеином (3) и флуоресцеином (4).

ратурой кристаллизации (*Т*_{крист}) исходного ПЭНП.

В смесях, в которых кристаллизация протекает в две стадии, переохлаждение для высокотемпературного экзопика в большинстве смесей составило 21°С, но в смеси с индиго переохлаждение составило 13°С, а в смеси с родамином – 48°С. В смеси с фенолфталеином $T_{пл}$ снизилась до 95°С, а высокотемпературный экзопик находился при 110°С; таким образом, в этой смеси формирование упорядоченной структуры полимера начинается на 15°С выше $T_{пл}$ полимера.

Вторая стадия кристаллизации — низкотемпературная — в смеси с фенолфталеином протекает при переохлаждении 9°С, а в смеси с индиго переохлаждение составило 21°С. В других же смесях переохлаждение варьировалось в пределах 38—60°С.

Таким образом, формирование кристаллической структуры полимера в деформированных смесях протекает в расплавных областях различающимися своими размерами. Высокотемпературные экзопики на термограммах охлаждения соответствуют кристаллизации крупных областей, а низкотемпературные — кристаллизации областей с размером несколько мкм.

Экзотермические эффекты – это выделение энергии при формировании новых связей. При кристаллизации из расплава полимера, в котором энергия межмолекулярных связей определяется ванн-дер-ваальсовым взаимодействием, энтальпия кристаллизации мало отличается от энтальпии плавления. При оценке энергии межмолекулярного взаимодействия в деформированных смесях, в которых произошло образование разветвленной межфазной границы, и сформировались двойные электрические слои, следует учитывать вклад электростатического взаимодействия в энергию межмолекулярного взаимодействия. Сформировавшиеся при холодной кристаллизации с высокой энтальпией межмолекулярные связи потребуют для своего разрушения большой энергии, поэтому при 108°C плавится, видимо, та часть полимера, которая не связана электростатическим взаимо-

Компонент,	Эндо,		Экзо,		Экзо,		Плавление,		Экзо,		i	Эндо,		Кристаллизация	
90 мас. %	<i>T</i> , °C	ΔH	Ι	<i>T</i> , °C	ΔH	<i>T</i> , °C	ΔH								
Меламин							108	120						88	56
Индиго	47	20					108	40			Ι			87; 95	55
Лофин			58	20			108	25			Ι			88	75
Бромкрезоловый											Ι				
пурпурный			60	30	86	140	108	125			Ι			70; 87	55
Спиропиран	44	20			81	290	106	40			Ι	142	520	90	7
Феноловый															
красный					82	75	108	90	132	120	Ι	148	540	50; 87	85
Родамин					84	145	108	70	123	300	Ι	164	175	48;60	13
Фенолфталеин			67	35			95	120	115	420	Ι	137	30	86; 110	55
Флуоресцеин	57	20					108; 130	170	161	140	Ι			51; 87	55

Таблица 1. Параметры экзо- и эндопроцессов (T, $^{\circ}C$ – энтальпия ΔH , Дж г⁻¹) в смесях ПЭНП с различными компонентами после пластического деформирования под давлением 1 ГПа

действием с материалом низкомолекулярного компонента.

Можно было ожидать, что плавление полимера с усиленным межмолекулярным взаимодействием будет проходить при температурах выше $T_{\rm пл} \Pi \Theta H \Pi$. Однако при нагреве смеси с индиго до 180—190°С обнаружить какие-либо тепловые эффекты на термограмме не удалось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На термограммах нагревания деформированных смесей наряду с эндопиком плавления ПЭНП в температурных диапазонах 20–90 и 108– 164°С присутствуют эндо- и экзотермические пики. Энтальпия плавления ПЭНП при 108°С варьируется от 25 до 170 Дж r^{-1} , то есть может быть, как в 3 раза меньше, так и в 2 раза больше, чем в исходном полимере.

Эндопики на термограммах в диапазоне 44— 57°С связаны с плавлением мелких кристаллитов. Плавление – это нарушение упорядоченного расположения полимерных цепей. При 108°С такой процесс сопровождается увеличение молекулярной подвижности и результате образуется расплав. При низких температурах для разрушения упорядоченного расположения макроцепей необходимо затратить энергию (эндопроцесс) и в результате часть мелких кристаллитов переходит в аморфное состояние.

Экзопики на термограммах в низкотемпературном диапазоне свидетельствуют о протекании в смесях процессов кристаллизации или перекристаллизации — эти процессы всегда протекают при температурах выше тех, при которых проявляются эндопроцессы плавления.

Экзопроцессы в диапазоне 108—161°С связаны с упорядочиванием полимерных цепей, которые приобретают в расплаве высокую подвижность. В этом случае центры кристаллизации находятся на поверхности низкомолекулярного компонента — эпитаксиальная кристаллизация.

Эндопики в диапазоне 137–164°С могут описывать процессы разрушения межмолекулярных связей в полимерной фазе, образовавшихся в расплаве при эпитаксиальной кристаллизации.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФХЭ РАН по теме госзадания "Физикохимия функциональных материалов на основе архитектурных ансамблей металл-оксидных наноструктур, многослойных наночастиц и пленочных нанокомпозитов". Регистрационный номер НИОКТР АААА-А19-119031490082-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Полимерные смеси / под ред. Пола Д., Ньюмена С. М.: Мир, 1981.
- Hybrid Nanocomposites for Nanotechnology / Ed. Mehrani L. Springer Science + Business Media, LLC 2009.
- 3. *Kestelman V.N., Pinchuk L.S., Goldade V.A.* Electrets In Engineering. Springer, Boston, MA. 2000.
- 4. Жорин В.А., Киселев М.Р., Котенев В.А. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2016. Т. 52. № 5. С. 533.
- 5. Чернядьев А.Ю., Котенев В.А., Цивадзе А.Ю. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2015. Т. 51. № 6. С. 964.
- Асламазова Т.Р., Котенев В.А., Золотаревский В.И., Цивадзе А.Ю. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2011. Т. 47. № 5. С. 468.
- Крючков А.И., Жорин В.А., Прут Э.В., Никольский В.Г., Будницкий Ю.М., Акутин М.С., Ениколопян Н С. // Высокомолек. соед. А. 1982. Т. 24. № 1. С. 184.
- Larsen H.A., Drickamer H.G. // J. Phys. Chem. 1957. V. 61. № 12. P. 1643.
- 9. Electrets / Ed. by Sessler G.M. Topics in Applied Physics. Springfer-Verlag, New York, 1980.
- 10. *Жорин В.А.* // Высокомолек. соед. 1994. Т. 36. № 4. С. 559–579.
- Жорин В.А., Годовский Ю.К., Ениколопян Н.С. // Высокомолек. соед. А. 1982. Т. 24. № 5. С. 953–956.
- Жорин В.А., Сапрыгин О.Н., Барашкова И.И., Литвинов В.М., Ениколопян Н.С. // Высокомолек. соед. А. 1988. Т. 31. № 6. С. 1311–1315.
- 13. *Жорин В.А., Киселев М.Р. //* Высокомолек. соед. А. 2010. Т. 52. № 3. С. 403–407.
- Жорин В.А., Киселев М.Р., Котенев В.А. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2019. Т. 55. № 3. С. 261.
- Исаев А.Ф., Жорин В.А., Туманов В.В., Ениколопян Н.С.// Высокомолек. соед. Б. 1989. Т. 31. № 1. С. 6–9.
- Кучменова Л.Х. // Дис. Термические свойства полимер-полимерных композитов на основе полипропилена. канд. техн. наук. ФГБУ Кабардино-Балкарский гос. Университет. Нальчик, 2014.
- Ushakova T.M., Starchak E.E., Krasheninnikov V.G., Grinev V.G., Ladygina T.A. // J. Appl. Polym. Sci. 2014. https://doi.org/10.1002/app.40151
- Селихова В.И., Неверов В.М., Синевич Е.А., Тихомиров В.С., Чвалун С.Н. // Высокомолек. Соед. А. 2005. Т. 47. № 2. С. 228–241.
- Qiu J., Xu J., Niu Y., Wang Z. // J. Polymer Sciens: part B: Polymer Physics. P. 2100–2115. https://doi.org/10.1002/polb