

Технологические особенности реакционной динамической экструзии нанокompозитов на основе полиолефинов, алюминия и технического углерода

Technological features of reactive dynamic extrusion of nanocomposites based on polyolefins, aluminum and technical carbon

H.T. KAKHRAMANOV, X.B. ALLAHVERDIYEVA
N.T. KAKHRAMANOV, KH.V. ALLAHVERDIYEVA

Институт Полимерных Материалов Национальной Академии Наук Азербайджана, г. Сумгайыт
Institute of Polymer Materials of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Sumgayit
najaf1946@rambler.ru

Рассмотрено влияние концентрации алюминиевой пудры и наночастиц технического углерода на основные физико-механические свойства нанокompозитов на основе полиэтилена высокой плотности, полиэтилена низкой плотности и сополимера этилена с гексеном. Определены оптимальные технологические параметры реакционной экструзии нанокompозитов, вулканизованных серой и пероксидом дикумила. Исследовано влияние типа полиолефина, наполнителей и сшивающих агентов на формирование изотропных нанокompозитов в процессе производства листового изделия.

Ключевые слова: нанокompозит, технический углерод, сера, разрушающее напряжение, относительное удлинение, удельная электропроводность, изотропные материалы

The effect of the concentration of aluminum powder and technical carbon nanoparticles on the main physical and mechanical properties of nanocomposites based on high density polyethylene, low density polyethylene and an ethylene-hexene copolymer is considered. The optimal technological parameters of the reaction extrusion of nanocomposites vulcanized with sulfur and dicumyl peroxide have been determined. The influence of the type of polyolefin, fillers and crosslinking agents on the formation of isotropic nanocomposites during the production of sheet products has been investigated.

Keywords: nanocomposite, technical carbon, sulfur, ultimate tensile stress, elongation at break, specific conductivity, isotropic materials

DOI: 10.35164/0554-2901-2021-9-10-34-38

По мере расширения мирового производства полимерных материалов значительно расширяется география их использования в различных областях промышленности: машиностроении, автомобилестроении, судостроении, сельском хозяйстве, авиации, военной, космической технике и т.д. Обусловлено это, прежде всего, особенностями структуры и свойств полимеров [1–3]. Однако по мере ужесточения требований к условиям эксплуатации полимерных изделий возникла необходимость в дальнейшем улучшении их качественных характеристик и перерабатываемости. С этой целью разрабатываются различные методы модификации структуры и свойств полимерных материалов путем химической модификации макромолекул, введения различных минеральных и металлических наполнителей, пластификаторов, стабилизаторов, позволяющие в той или иной степени расширить область их практического применения в специальных областях техники и технологии [4–6]. Одним из эффективных и широко используемых способов модификации свойств полимеров является использование различных минеральных и металлических наполнителей. В этом направлении со стороны ученых и специалистов проводятся довольно обширные исследования [5–7]. Однако, несмотря на это, весьма ограничены исследования, направленные на изучение технологических особенностей переработки полимерных композитных материалов. Правильный выбор технологического режима переработки композитов, например, методом экструзии, позволит, в первую очередь, значительно улучшить качество изделий, получаемых на их основе, и снизить потери, связанные с технологическими отходами.

Принимая во внимание вышеизложенное, нами в данной работе приводятся результаты исследования по выбору оптимальных условий экструзии нанокompозитов на основе полиолефинов.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования использовали такие полиолефины, как полиэтилен высокой плотности (ПЭВП), полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) и сополимер этилена с гексеном (СЭГ).

ПЭВП: разрушающее напряжение – 31,3 МПа, модуль упругости при изгибе – 753 МПа, относительное удлинение – 435%, плотность – 946 кг/м³, показатель текучести расплава (ПТР) – 3,6 г/10 мин., теплостойкость – 119°C, температура плавления – 131°C, степень кристалличности – 80%.

ПЭНП: разрушающее напряжение – 11,2 МПа, модуль упругости на изгиб – 196 МПа, плотность – 927 кг/м³, относительное удлинение – 720%, теплостойкость – 85°C, температура плавления – 101°C, ПТР = 1,9 г/10 мин., степень кристалличности – 57%.

Сополимер этилена с гексеном (СЭГ), представляющий собой термостойкий линейный полиэтилен низкой плотности марки SP980: ПТР = 3,4 г/10 мин., разрушающее напряжение – 34,5 МПа, относительное удлинение – 700%, температура плавления – 127°C.

В качестве металлического наполнителя использовали алюминиевую пудру размером 1–2 мкм.

Компатибилизатор (РПП-МА) – это привитой сополимер марки Exxeler PO 1020, полученный в процессе реакционной экструзии в результате механо-химического синтеза рандом полипропилена (РПП) с малениновым ангидридом (МА). Степень прививки МА в составе РПП составляла 5,7% масс.

Технический углерод (ТУ) марки Printex XE 2-B с размером наночастиц 18–40 нм.

В качестве металлического наполнителя использовали алюминиевую пудру с размером частиц 0,5–2 мкм.

Размер наночастиц определяли на приборе модели STA PT1600 Linseiz, Германия.

Удельную электропроводность определяли на приборе марки E7-20 в переменном токе в соответствии с ГОСТ 31770-2012.

При исследовании сопротивления отслаиванию в системе адгезив-субстрат испытание осуществляли таким образом, чтобы толщина пластинки полимерного материала была в пределах 1,6–1,8 мм. Испытание проводили на разрывной машине, предназначенной для испытания пластмасс на прочность при растяжении.

Для этого приспособление для испытания устанавливали в нижнем зажиме испытательной машины, свободный конец фольги закрепляли в верхнем зажиме. В процессе перемещения подвижной traversы фольгу вытягивали с поверхности полимерной пластинки с постоянной скоростью 100 мм/мин. Нагрузку фиксировали на участке образца длиной не менее 115 мм.

Реакционную экструзию нанокомпозитов проводили на одночервячном экструдере с длиной материального цилиндра 800 мм и диаметром шнека 35 мм. Экструдер состоит из четырех зон: зоны питания, зоны пластикации, зоны дозирования и головки экструдера. Все компоненты (полимерную матрицу и аппретированные наночастицы) подвергали предварительно сухому перемешиванию. После этого подготовленную смесь вводили в бункер экструдера. Скорость вращения шнека регулировалась асинхронным двигателем мощностью 15 кВт. Нагрев материального цилиндра осуществлялся с помощью нагревательных пакетов: 4 на материальном цилиндре и 1 на формующей головке. Формующая головка имела щелевое отверстие, позволяющее получать листы шириной 150 мм и толщиной 1,5–2 мм. Из этих листов вырубались образцы (лопатки) для определения разрушающего напряжения и относительного удлинения.

Показатель текучести расплава (ПТР) определяли на капиллярном реометре марки MELT FLOW TESTER, CEAST MF50 (INSTRON, Италия) в температурном диапазоне 190–250°C и в интервале нагрузок 2,16–21,6 кг, отношение длины сопла к диаметру капилляра равно 24.

Испытание разрушающего напряжения и относительного удлинения нанокомпозитов определяли в соответствии с ГОСТ 11262-80. Результаты испытания обработаны статистически по ГОСТ 14359-69. Для определения каждого показателя прочностных характеристик испытывалось по 5 образцов.

Результаты и их обсуждение

В процессе исследования технологических особенностей экструзии полимерных нанокомпозитов первостепенное значение приобретало осуществление правильного выбора температурного режима материального цилиндра, давления, скорости экструзии и, соответственно, производительности агрегата. Процесс экструзии полимерного композита по монотрем технологии (однопроходной схеме) предполагает не только получение погонажных изделий: пленок, труб или листовых изделий, но и гранулированного материала [8, 9]. Гранулированный материал полимерного композита может быть использован в процессе литья под давлением для производства конструкционных изделий. Следует при этом отметить, что переработка металлонаполненных полимерных композитов представляет собой довольно сложный технологический процесс. Особенно большие трудности возникают при переработке алюминийсодержащих композитов. Обусловлено это обстоятельством, что при длительном нахождении этого композита в нагретом материальном цилиндре экструдера или литьевого агрегата алюминий подвергается окислению. С термодинамической точки зрения реакция окисления алюминия представляет собой экзотермический процесс, сопровождающийся выделением тепла [10]. При остановке экструзионного агрегата с включенным нагревом более чем на 1 час в материальном цилиндре вязкость расплава снижается настолько, что давление экструзии резко падает, переработка наполненного композита становится практически невозможной. Поэтому мы при исследовании технологического режима переработки исходили из того, что необходимо добиться максимального использования находящегося в материальном цилиндре алюминийсодержащего композита. Для расширения возможных областей применения полимерных композитов мы наряду с алюминием в состав полимерной матрицы вводили технический углерод

Таблица 1. Влияние концентрации ТУ, алюминия (Ал) и компатибилизатора (К) на свойства композитов на основе ПЭНП, ПЭВП и СЭГ.

№	Состав композита, % масс	Разрушающее напряжение, МПа	Относительное удлинение, %	Соппротивление отслаиванию от железа А, Н/м	Удельная электропроводность σ_e , (Ом·м) ⁻¹
1	88 ПЭНП + 5 ТУ + 5 Ал + 2 К	14,2	235	82,4	$4,6 \times 10^{-4}$
2	83 ПЭНП + 10 ТУ + 5 Ал + 2 К	14,4	145	75,3	$7,1 \times 10^{-4}$
3	78 ПЭНП + 15 ТУ + 5 Ал + 2 К	12,1	75	71,2	$9,3 \times 10^{-4}$
4	90 ПЭВП + 3 ТУ + 5 Ал + 2 К	35,3	215	92,7	$2,6 \times 10^{-3}$
5	88 ПЭВП + 5 ТУ + 5 Ал + 2 К	36,0	210	99,5	$5,2 \times 10^{-3}$
6	83 ПЭВП + 10 ТУ + 5 Ал + 2 К	31,4	115	89,3	$7,9 \times 10^{-3}$
7	88 СЭГ + 5 ТУ + 5 Ал + 2 К	32,1	350	84,6	$2,4 \times 10^{-5}$
8	86 СЭГ + 7 ТУ + 5 Ал + 2 К	33,6	350	85,0	$5,7 \times 10^{-5}$
9	83 СЭГ + 10 ТУ + 5 Ал + 2 К	31,0	270	72,8	$7,8 \times 10^{-5}$

Таблица 2. Влияние температурного режима материального цилиндра экструдера на основные физико-механические свойства нанокомпозитов на основе ПЭВП, ПЭНП и СЭГ.

№	Температурный режим материального цилиндра, °С	Время пребывания расплава в экструдере, сек	Разрушающее напряжение, МПа	Относительное удлинение, %
	ПЭВП + 5,0% масс. ТУ + 5,0% масс. алюминий + 2,0% масс. РПП-МА			
1	140–160–170–180–185*	180	32,2	200
2	140–165–175–185–190*	180	34,3	200
3	140–165–175–190–200*	155	36,0	210
4	140–165–180–195–210*	135	34,7	210
5	140–170–185–210–220*	205	33,0	210
	ПЭНП + 10% масс. ТУ + 5,0% масс. алюминий + 2,0% РПП-МА			
6	120–140–150–155–160*	165	13,6	135
7	120–140–155–160–170*	140	14,0	140
8	120–145–160–165–175*	110	14,4	145
9	120–145–165–170–175*	105	14,2	145
10	120–150–170–180–190*	145	13,9	150
	СЭГ + 7,0% масс. ТУ + 5,0% масс. алюминий + 2,0% масс. РПП-МА			
11	140–150–160–170–175*	190	31,7	320
12	140–155–165–175–180*	185	32,8	335
13	140–160–170–180–185*	185	33,6	350
14	140–160–175–185–190*	175	33,0	350
15	140–165–180–195–210*	230	32,5	350

* температура в головке экструдера

специализированной марки. Необходимость получения подобных типов композитов была связана с получением материалов с антистатическими или электропроводящими свойствами [10].

В задачу исследования входило, наряду с получением композитов с улучшенными свойствами, обеспечение удовлетворительной текучести расплава и перерабатываемости на стандартном оборудовании. В качестве объекта исследования использовали такие полиолефины, как ПЭВП, ПЭНП и СЭГ. В качестве наполнителя использовали алюминиевую пудру и ТУ. Введение ТУ в состав полиолефинов позволяет в значительной степени снизить статическое электричество и улучшить электропроводность нанокompозитов. Наличие алюминиевого наполнителя в составе полиолефинов позволяло существенным образом увеличить адгезию к металлической поверхности. Речь идет о получении изделий, которые обладают антистатическими свойствами и используются в контакте с металлической поверхностью. При этом для обеспечения необходимой технологической совместимости смешиваемых компонентов смеси в качестве компатибилизатора использовали привитой сополимер рандом полипропилена с малеиновым ангидридом (РПП–МА).

В результате проведенных исследований было установлено, что в зависимости от типа исходной полимерной матрицы изменяется соотношение компонентов смеси, при котором достигаются сравнительно высокие физико-механические и электрофизические свойства. Экспериментальные данные сведены в таблицу 1. Как видно из этой таблицы, введение алюминиевой пудры и ТУ в состав полиолефинов способствует заметному улучшению свойств при определенных соотношениях компонентов смеси. Так, например, согласно данным, приведенным в таблице 1, в наибольшей степени этим требованиям соответствуют следующие композиты: ПЭВП + 5,0% масс. ТУ + 5,0% масс. алюминий + 2,0% масс. РПП–МА; СЭГ + 7,0% масс. ТУ + 5,0% масс. алюминий + 2,0% масс. РПП–МА; ПЭНП + 10% масс. ТУ + 5,0% масс. алюминий + 2,0% масс. РПП–МА. Из приведенных данных следует, что, независимо от типа полиолефина, с увеличением концентрации ТУ в присутствии компатибилизатора в составе композита наблюдается закономерное улучшение удельной электропроводности. Но вместе с тем наблюдается некоторое снижение адгезионной прочности к металлу, которая оценивалась методом определения сопротивления отслаиванию полимерной пленки с металлической поверхности. Как видно из этой таблицы, при более высокой концентрации ТУ и алюминия в составе композитов образцы характеризуются сравнительно низкими значениями прочностных показателей и относительного удлинения. При сравнительно низкой концентрации ТУ и алюминия эффективность их воздействия на улучшение адгезионных свойств и удельной электропроводности была недостаточной.

Поэтому представлялось интересным на отобранных образцах с улучшенными свойствами рассмотреть влияние технологических параметров экструзии на такие их показатели, как разрушающее напряжение и относительное удлинение. Результаты исследования сведены в таблицу 2.

Таблица 3. Влияние концентрации серы на технологические параметры реакционной экструзии нанокompозитов на основе полиолефинов, ТУ, алюминия и компатибилизатора.

Состав композита, % масс.	Температура по зонам, °С	Число оборотов шнека, об/мин.	Давление экструзии, МПа	ПТР, г/10 мин
K ₁ + 1,0 сера	140–155–180–190	17	15	2,5
K ₁ + 3,0 сера	140–160–185–200	17	16	2,1
K ₁ + 5,0 сера	140–165–190–200	18	18	1,8
K ₁ + 7,0 сера	140–170–190–205	19	18	1,8
K ₂ + 1,0 сера	125–135–145–150	17	16	1,6
K ₂ + 3,0 сера	125–135–145–150	17	17	1,4
K ₂ + 5,0 сера	125–140–145–155	19	17	1,1
K ₂ + 7,0 сера	130–140–150–160	19	18	1,0
K ₃ + 1,0 сера	135–155–180–190	17	15	2,8
K ₃ + 3,0 сера	140–165–180–190	17	15	2,4
K ₃ + 5,0 сера	140–165–185–195	18	16	2,2
K ₃ + 7,0 сера	140–165–190–200	18	17	2,2

K₁ – ПЭВП + 5,0% масс. ТУ + 5,0% масс. алюминий + 2,0% масс. РПП–МА

K₂ – ПЭНП + 10% масс. ТУ + 5,0% масс. алюминий + 2,0% масс. РПП–МА

K₃ – СЭГ + 7,0% масс. ТУ + 5,0% масс. алюминий + 2,0% масс. РПП–МА

Анализируя данные, приведенные в этой таблице, можно установить, что температурный режим материального цилиндра оказывает заметное влияние на свойства нанокompозитов. С увеличением температурного режима экструзии наблюдается закономерное снижение времени пребывания материала за счет увеличения производительности установки. Только при очень высоких температурах в материальном цилиндре и головке экструдера наблюдается обратный процесс, связанный с увеличением времени пребывания материала в материальном цилиндре [8–11]. Есть основание полагать, что при очень высоких температурных режимах переработки вязкость расплава резко падает, что приводит к появлению противотока расплава в материальном цилиндре, снижению производительности экструдера и, соответственно, увеличению времени нахождения в нем материала. Наилучшие режимы экструзии проявляются на опытах №3, 8 и 13.

При разработке полимерных нанокompозитов представлялось интересным рассмотреть влияние концентрации вулканизующего агента (серы) на закономерность изменения ПТР и технологических параметров реакционной экструзии. Результаты исследования сведены в таблицу 3.

Экструзионная переработка называется «реакционной», потому что в материальном цилиндре наряду со смешением компонентов смеси в режиме расплава одновременно протекает процесс химического сшивания [8]. Под действием термомеханического воздействия восьмичленная циклическая структура молекулы серы (S₈) в объеме расплава полимерной матрицы разрывается с образованием низкомолекулярных радикалов. Эти радикалы, как правило, присоединяются по месту разрыва двойных связей в макроцепи полиолефина с образованием поперечных восьмичленных эластичных структур типа C–S–S...S–S–C. Принимая во внимание, что концентрация двойных связей в составе структуры различных типов полиэтилена ничтожно мала, следует предполагать образование редкосетчатой макромолекулярной структуры [8]. Подтверждением самого факта образования подобной структуры является некоторое снижение ПТР нанокompозитов. Об этом довольно наглядно свидетельствуют данные, приведенные в таблице 3. Согласно полученным данным, независимо от типа полиолефина, чем больше концентрация серы, тем в большей степени наблюдается тенденция к снижению ПТР нанокompозитов. Характерно, что при концентрации серы свыше 5,0% масс. значения ПТР практически не претерпевают серьезных изменений. Интерпретируется это обстоятельство тем, что содержание винильных групп в составе полиолефинов ничтожно мало, поэтому повышение концентрации серы более 5,0% масс. не может способствовать каким-либо серьезным изменениям в структуре макроцепи полиолефина, т.е. происходит максимальное использование потенциальных активных центров.

Как видно из таблицы 3, концентрация серы влияет и на технологические параметры экструзии: температурный режим материального цилиндра, число оборотов шнека и давление экструзии. Сопоставительный анализ данных в этой таблице показывает, что

с увеличением температурного режима экструзии наблюдается определенная тенденция к увеличению числа оборотов шнека и давления экструзии. Эти технологические параметры тесно связаны между собой, так как с повышением температуры происходит снижение эффективной вязкости расплава полимерной матрицы, что способствует некоторому повышению числа оборотов шнека и сохранению давления экструзии.

В литературе практически отсутствуют исследования по влиянию серы и пероксида дикумила на изотропию свойств нанокм-позитов в процессе производства листового изделия. Но перед этим предстояло выяснить, как изменяются свойства образцов исходных нанокм-позитов (K_1 , K_2 , K_3), вырубленных вдоль и поперек листового изделия, полученного в процессе экструзии (результаты исследования сведены в таблицу 4). Анализируя данные в этой таблице, можно установить, что у образцов, вырубленных вдоль и поперек листа, разрушающее напряжение и относительное удлинение нанокм-позитов несколько различаются, т.е. характеризуются анизотропией свойств. При этом образцы, расположенные поперек листа, характеризуются относительно низкими значениями разрушающего напряжения, но сравнительно высокими значениями относительного удлинения. Однако образцы, полученные в процессе серной вулканизации, наоборот, при определенной концентрации характеризуются изотропными свойствами. Так, например, анализируя данные, приведенные в таблице 4, можно заметить, что в нанокм-позитах на основе ПЭВП и СЭГ с увеличением концентрации серы свыше 5,0% масс. наблюдается выравнивание свойств как по разрушающему напряжению, так и по относительному удлинению. В нанокм-позитах на основе ПЭНП этот эффект не проявляется даже при концентрации серы, равной 7,0% масс. Обусловлено это обстоятельство в первую очередь кристаллическостью полимерной матрицы. Чем выше кристалличность полимерной основы, тем при относительно более низкой концентрации серы проявляется эффект изотропии в изменении свойств. При относительно низкой кристалличности исходного полиолефина, в данном случае ПЭНП, редкосетчатая структура не влияет на

ориентацию макроцепей вдоль направления экструзии листового изделия.

Несколько иначе следует рассматривать формирование надмолекулярной структуры у вулканизованных пероксидом дикумила (ПД) нанокм-позитов в процессе экструзии листового изделия. По сравнению с серной перекисная вулканизация протекает более интенсивно. При этом вулканизация протекает не только по месту разрыва двойных связей, но и у третичных углеродных атомов с образованием жестких поперечных связей типа:



Такая поперечная связь увеличивает жесткость полимерного материала. В ряде случаев при очень большой плотности поперечных связей в нанокм-позите нарушается кристаллическая структура с переходом в стеклообразное состояние [9, 10]. Поэтому в данном случае для получения сопоставимых данных количество ПД, вводимого в состав нанокм-позита, изменяли в пределах 0,5–1,0% масс.

Как видно из таблицы 5, при введении ПД в количестве 0,5% масс наблюдается незначительное повышение разрушающего напряжения и снижение относительного удлинения. Когда содержание ПД в составе нанокм-позита составляет 1,0% масс., наряду со снижением разрушающего напряжения происходит резкое снижение относительного удлинения. Это может быть связано с тем, что в процессе кристаллизации сшитого полиолефина меняется не только механизм кристаллизации, но и закономерность формирования их структуры [10–12]. В процессе кристаллизации уплотняются в кристаллические образования только те сегменты макромолекул, которые не имеют поперечно сшитых цепей. При концентрации ПД, равной 0,5% масс., содержание гель-фракции в составе сшитого нанокм-позита не превышало 25–35% масс., что способствовало сохранению ПТР образцов на уровне, достаточном для их переработки методом экструзии. При росте кристаллических образований сшитая часть вместе с частицами наполнителя выталкивается

Таблица 4. Влияние концентрации серы на разрушающее напряжение и относительное удлинение образцов нанокм-позитов K_1 , K_2 , K_3 , вырубленных вдоль и поперек экструзионного листового изделия.

Состав композиции, % масс.	Разрушающее напряжение вдоль, σ_p , МПа	Относительное удлинение вдоль, %	Разрушающее напряжение поперек, σ_p , МПа	Относительное удлинение поперек, %
K_1	36,0	210	33,4	230
K_2	14,4	145	13,1	135
K_3	33,6	350	30,4	295
$K_1 + 1,0$ сера	37,0	225	36,4	235
$K_1 + 3,0$ сера	38,4	245	38,0	250
$K_1 + 5,0$ сера	39,5	250	39,2	255
$K_1 + 7,0$ сера	38,1	250	38,0	250
$K_2 + 1,0$ сера	14,9	155	13,0	160
$K_2 + 3,0$ сера	15,6	170	15,1	160
$K_2 + 5,0$ сера	16,0	190	15,5	190
$K_2 + 7,0$ сера	16,0	185	15,5	190
$K_3 + 1,0$ сера	34,2	355	33,8	355
$K_3 + 3,0$ сера	35,5	370	35,3	375
$K_3 + 5,0$ сера	36,0	370	35,8	370
$K_3 + 7,0$ сера	35,9	370	35,9	375

K_1 – ПЭВП + 5,0% масс., ТУ + 5,0% масс. алюминий + 2,0% масс. РПП–МА

K_2 – ПЭНП + 10% масс., ТУ + 5,0% масс. алюминий + 2,0% масс. РПП–МА

K_3 – СЭГ + 7,0% масс., ТУ + 5,0% масс. алюминий + 2,0% масс. РПП–МА

Таблица 5. Влияние концентрации ПД на разрушающее напряжение и относительное удлинение образцов нанокм-позитов K_1 , K_2 , K_3 , вырубленных вдоль и поперек экструзионного листового изделия.

Состав композиции, % масс.	Разрушающее напряжение вдоль, σ_p , МПа	Относительное удлинение вдоль, %	Разрушающее напряжение поперек, σ_p , МПа	Относительное удлинение поперек, %	ПТР, г/10 мин.
$K_1 + 0,5$ ПД	39,0	135	39,0	135	1,0
$K_1 + 1,0$ ПД	35,4	20	35,3	25	0,2
$K_2 + 0,5$ ПД	15,7	155	14,9	170	0,6
$K_2 + 1,0$ ПД	15,9	30	15,9	30	0,05
$K_3 + 0,5$ ПД	36,2	90	36,2	95	1,3
$K_3 + 1,0$ ПД	35,5	20	35,4	20	0,1

в аморфную область. При скоплении в этой области происходит затруднение релаксационных процессов и блокирование подвижности сшитых проходных цепей, ответственных за относительное удлинение [13, 14]. В конечном итоге при содержании ПД, равном 1,0% масс., это проявляется в ухудшении режима протекания деформационных процессов и резком снижении относительного удлинения сшитых нанокомполитов. Характерно, что в этих образцах содержание гель-фракции составляло 45–65% масс. Такое высокое содержание гель-фракции в кристаллических полимерах является неприемлемым, поскольку приводит к заметному снижению свойств сшитых нанокомполитов. Поэтому, согласно данным таблицы 5, лучшими свойствами в сравнении обладают нанокомполиты, сшитые 0,5% масс. ПД. В этом случае на достаточном уровне сохраняется ПТР нанокомполитов, при котором обеспечивается способность этого материала к переработке.

Серную и перекисную вулканизацию нанокомполитов в экструзионном агрегате следует рассматривать, как «реакционную динамическую вулканизацию», так как смешение компонентов и химическое сшивание протекает одновременно в едином технологическом процессе.

На основании вышеизложенного можно прийти к следующему выводу:

Изучено влияние концентрации алюминия и наноразмерных частиц ТУ, типа исходной полимерной основы на разрушающее напряжение, относительное удлинение, сопротивление отслаиванию и удельную электропроводность нанокомполитов на основе ПЭВП, ПЭНП и СЭГ. Найдены оптимальные соотношения компонентов, при которых достигаются сравнительно высокие значения физико-механических характеристик нанокомполитов.

Установлен температурный режим материального цилиндра, число оборотов шнека, давление экструзии и ПТР материала, при котором обеспечиваются сравнительно высокие значения разрушающего напряжения и относительного удлинения нанокомполитов.

В результате реакционной экструзии серных и перекисных вулканизатов нанокомполитов представляется возможным при определенном содержании агента вулканизации получить новые типы динамически вулканизированных полимерных материалов, обладающих изотропными свойствами.

Литература

- Берлин А.А., Вольфсон С.А., Ошман В.Г. Принципы создания композиционных материалов. М.: Химия, 1990. 240 с.
- Симонов-Емельянов И.Д., Кулезнев В.Н., Трофимичева Л.З. Обобщенные параметры дисперсной структуры наполненных полимеров. // Пластические массы, 1989, №1, с. 19–22.
- Волкова Н.В., Емельянов Д.Н., Молодова А.А. Фазовое состояние и реологические свойства смесей полиметакрилатов, образующихся в процессе полимеризации. // Вестник нижегородского университета им. Н. Лобачевского, 2014, №4, с.154–158.
- Рудакова Т.А. Евтушенко Ю.М. Григорьев Ю.А. Озерин А.Н. Полиэтилен низкого давления, модифицированный органомонтмориллонитом. // Все материалы. Энциклопедический справочник, 2018, №8, с. 12–16. http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2807
- Спиридонов А.М., Соколова М.Д., Охлопкова А.А. Полимерные композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного органомодифицированным цеолитом. // Все материалы. Энциклопедический справочник, 2019, №8, с. 7–11. http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2963
- Нгуен Минь Туан, Чалая Н.М., Осипчик В.С. Структура и физико-механические свойства смесей ПЭ и металлоцепоного этилен-пропиленового сополимера. //Пластические массы, 2017, №9–10, с. 12–16. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2017-9-10>
- Kakhramanov N.T., Azizov A.G., Osipchik V.S., Mammadli U.M., Arzumano N.B. Nanostructured composites and polymer materials. // International Polymer Science and technology, 2017, Vol. 44, No2, p. 37–47.
- Кахраманов Н.Т., Курбанова Р.В., Гулиев А.Д., Осипчик В.С. Реакционная экструзия органо-неорганических гибридных гелей на основе модифицированных полиолефинов и аппретированных минеральных нанонаполнителей. // Пластические массы, 2021, №1–2, с. 57–61. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-1-2-57-61>
- Дудочкина Е.А., Лямкин Д.И., Рудаков Г.Ф. Модификация технологических и механических свойств высоконаполненных полиэтиленовых композиций. //Пластические массы, 2018, №7–8, с. 44–47.
- Allahverdiyeva Kh.V., Kakhramanov N.T., Abdullin M.I., Mustafayeva F.A. Influence of the aluminum powder concentration on the mechanism and kinetic regularities of the crystallization of composites based on low density polyethylene.// Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol., 2020, V. 63, No 2, p. 77–83.
- Кравченко Т.П., Ермаков С.Н., Кербер М.Л. и др. Научно-технические проблемы получения композиционных материалов на основе конструкционных термопластов.//Пластические массы, 2010, №10, с. 32–37.
- Атлуханова Л.Б., Козлов Г.В., Долбин И.В. Взаимосвязь структуры нанонаполнителя и свойств полимерных нанокомполитов: фрактальная модель. // Материаловедение, 2019, №7, с.19–22. http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2948
- Калистратова Л.Ф., Егорова В.А. Упорядочение аморфной фазы как одна из характеристик надмолекулярной структуры аморфно-кристаллического полимера. //Материаловедение, 2019, №1, с. 3–5. http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2871.
- Аллахвердиева Х.В., Кахраманов Н.Т., Намазлы У.В. Механизм и кинетика ступенчатой кристаллизации композитов на основе полиэтилена высокой плотности и алюминия. // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020, №12, с. 2–7. http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=3160