

Особенности экструзии пленок из смесей ПЭНП и ЛПЭНП современных марок

Features of extrusion of films from blends of LDPE and LLDPE of modern grades

О.И. АБРАМУШКИНА¹, Г.А. БАТУХИН²

O.I. ABRAMUSHKINA¹, G.A. BATUKHIN²

¹ АО «Межотраслевой институт переработки пластмасс – НПО «Пластик», Москва, Россия

² «МИРЭА – Российский технологический университет» (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва, Россия

¹ JSC “Interindustry Institute of Plastics Processing – NPO “Plastic”, Moscow, Russia

² “MIREA – Russian Technological University” (Institute of Fine Chemical Technologies named after M.V. Lomonosov), Moscow, Russia
abramushkina@mail.ru

В работе проведено исследование реологических и вязкоупругих характеристик современных марок ЛПЭНП и их смесей с ПЭНП, предназначенных для производства пленочных изделий, а также проведена оценка механических характеристик пленок из них.

В результате изучения реологических свойств ЛПЭНП и ПЭНП установлено, что расплавы полимеров показывают типичное для псевдопластичных жидкостей поведение. Индекс течения для всех марок ЛПЭНП составлял 0,7–0,91, что говорит об узком ММР полимеров; ПЭНП имел индекс течения 0,56–0,57 и более высокую энергию активации вязкого течения, чем ЛПЭНП.

Вязкоупругие свойства полимеров оценивали по значению коэффициента разбухания (K_p) при двух температурах испытания. Показано, что K_p ПЭНП существенно превышал K_p для всех изученных марок ЛПЭНП при одинаковых скоростях или напряжениях сдвига. При этом повышение температуры имело незначительное влияние на величину K_p , как для ПЭНП, так и ЛПЭНП. Установлено, что увеличение содержания ПЭНП в смесях с ЛПЭНП ведет к росту K_p .

Анализ свойств при растяжении пленок, полученных из исходных полимеров и их смесей, показал, что характер изменения прочности и относительного удлинения при разрыве зависит от состава и вида ЛПЭНП разных производителей.

Максимальными прочностными показателями обладали пленки на основе м-ЛПЭНП марки LUCENE. Оптимальное содержание ПЭНП в смеси с ЛПЭНП зависит от вида ЛПЭНП и составляет не более 10–20 масс.%.

Ключевые слова: ЛПЭНП, смеси ЛПЭНП/ПЭНП, реологические свойства, экструзия пленок, коэффициент разбухания расплава, прочность пленок при растяжении

The study of rheological and viscoelastic characteristics of modern grades of LLDPE and their mixtures with LDPE, intended for the production of film products, as well as the evaluation of mechanical characteristics of films made of them have been carried out.

As a result of studying the rheological properties of LLDPE and LDPE, it was found that polymer melts show behavior typical of pseudoplastic liquids. The flow index for all grades of LLDPE was 0.78–0.91, which indicates a narrow MWD of polymers; LDPE had a flow index of 0.56–0.57 and a higher activation energy for viscous flow than LLDPE.

The viscoelastic properties of the polymers were assessed by the value of swelling coefficient (K_s) at two test temperatures. It is shown that the K_s of LDPE significantly exceeded that of all studied LLDPE grades at the same shear rates or shear stresses. The increase in temperature had an insignificant effect on the K_s value for both LDPE and LLDPE. It has been found that an increase in the content of LDPE in mixtures with LLDPE leads to an increase in K_s .

The analysis of tensile properties of films obtained from the original polymers and their blends showed that the character of change in strength and elongation at break depends on the composition and type of LLDPE from different manufacturers.

Films based on m-LLDPE of LUCENE brand had the maximum strength properties. The optimal content of LDPE in a mixture with LLDPE depends on the type of LLDPE and is no more than 10–20 wt.%.

Keywords: LLDPE, LLDPE/LDPE blends, film extrusion, rheological properties, melt swell ratio, film tensile strength

DOI: 10.35164/0554-2901-2024-01-6-10

Широкое распространение линейного полиэтилена низкой плотности (ЛПЭНП) в производстве пленочных изделий в последнее время обусловлено, во-первых, доступностью отечественных марок ЛПЭНП, а также теми преимуществами, которые дает этот полимер. Пленки из ЛПЭНП обладают лучшими прочностными характеристиками, в частности, при растяжении и раздире, а также повышенной теплостойкостью по сравнению с пленками из ПЭНП. Пленочные изделия из ЛПЭНП могут подвергаться стерилизации, что немаловажно при использовании пленок для упаковки продуктов питания. Одним из существенных преимуществ является также снижение времени термической сварки при производстве пакетов из таких пленок [1, 2].

Однако переработка ЛПЭНП имеет определенные сложности, обусловленные узким молекулярно-массовым распределением и более высокой вязкостью [3] по сравнению с ПЭНП с близкими значениями ПТР. Это приводит к тому, что при критических значениях скоростей (напряжений) сдвига течение полимеров переходит в неустойчивый режим, что приводит к дефектам поверхности пленочных изделий [4]. Поэтому часто для улучшения технологических свойств при переработке применяют не чистый ЛПЭНП, а смеси с ПЭНП. Причем, если ранее использовали ЛПЭНП в качестве добавки [5, 6], то в настоящее время ЛПЭНП применяют как основной полимер с добавлением небольшого количества ПЭНП. Введение ПЭНП способствует улучшению стабильности

технологических свойств при переработке, оптических показателей, а также прочности расплава (продольной вязкости), что особенно важно при производстве пленок методом раздува рукава [4]. Кроме того, с увеличением содержания ПЭНП повышаются значения критических скоростей сдвига, что может способствовать повышению производительности пленочных установок при сохранении качества поверхности пленок.

При модификации ЛПЭНП за счет добавления ПЭНП может снизиться теплостойкость пленок. Авторами работы [7] было показано, что при введении в ЛПЭНП до 20 масс.% ПЭНП на ДСК-термограммах определяется один пик плавления, соответствующий ЛПЭНП, при большем содержании определяются два пика плавления, соответствующие обоим компонентам смеси. Отсюда следует, что для сохранения теплостойкости пленок содержание ПЭНП в ЛПЭНП должно быть выше 20 масс.%.

Настоящая работа посвящена изучению особенностей экструзии ЛПЭНП разного состава и ПЭНП с учетом их реологических характеристик, а также влияния содержания ПЭНП в смеси с ЛПЭНП на механические характеристики пленок.

Объектами исследования служили три марки ЛПЭНП: LL09200 FE (ООО «Запсибнефтехим»), LUCENE марки HP 1018BH (LG Chem), DOWLEX 6000G (Dow) и ПЭНП марки PE LD08220 FE (ООО «Томскнефтехим»). Состав линейного ПЭ различен для изученных марок: марка LL09200 FE представляет собой сополимер этилена с бутеном, LUCENE – сополимер этилена с гексеном, полученный на металлоценовом катализаторе, а DOWLEX – сополимер этилена с октеном. Все марки применяются для производства пленок как методом раздува рукава, так и методом плоскощелевой экструзии, в том числе многослойных барьерных пленок.

В работе применялись следующие методы исследования: капиллярная вискозиметрия с использованием мировискозиметра MB-3 (капилляр $l/d = 40/2$), определение коэффициента разбухания расплава на приборе ИИРТ (капилляр $l/d = 32/2$). Испытание пленок на растяжение проводили на разрывной машине модели Р-5М по ГОСТ 14236-81 при скорости растяжения 500 мм/мин. Анализ методом ДСК проводили по ГОСТ Р 56724-2015.

Смеси получали путем предварительного смешения на экструдере фирмы GÖTTFERT с диаметром шнека 30 мм, отношением длины к диаметру 25, при температуре дозирующей зоны 230°C с последующей грануляцией стренг после охлаждения в водяной ванне. Пленки получали методом плоскощелевой экструзии на пластографе Брабендера, диаметр шнека 20 мм, $L/D = 25$, ширина щели плоскощелевой головки 230 мм, высота щели 1,5 мм. Толщина пленок варьировалась в пределах 90–130 мкм. Прием пленок осуществлялся двумя тянущими вальками с постоянной скоростью вытяжки.

В табл. 1 приведены характеристики использованных марок полимеров.

Известно, что при переработке ЛПЭНП из-за его высокой вязкости и низкого порога критических скоростей сдвига при изготовлении пленок методами экструзии снижают сдвиговые усилия, воздействующие на материал, либо за счет повышения температуры для плоскощелевых пленок, либо за счет увеличения зазора в формующей головке для раздувных пленок [4]. Поэтому для опре-

деления температурно-скоростного интервала переработки исследуемых полимеров изучали зависимость эффективной вязкости от скорости и напряжения сдвига в интервале температур 200–250°C. Интервал скоростей сдвига составил 10^0 – 10^2 с⁻¹. Зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига представлены на рис. 1.

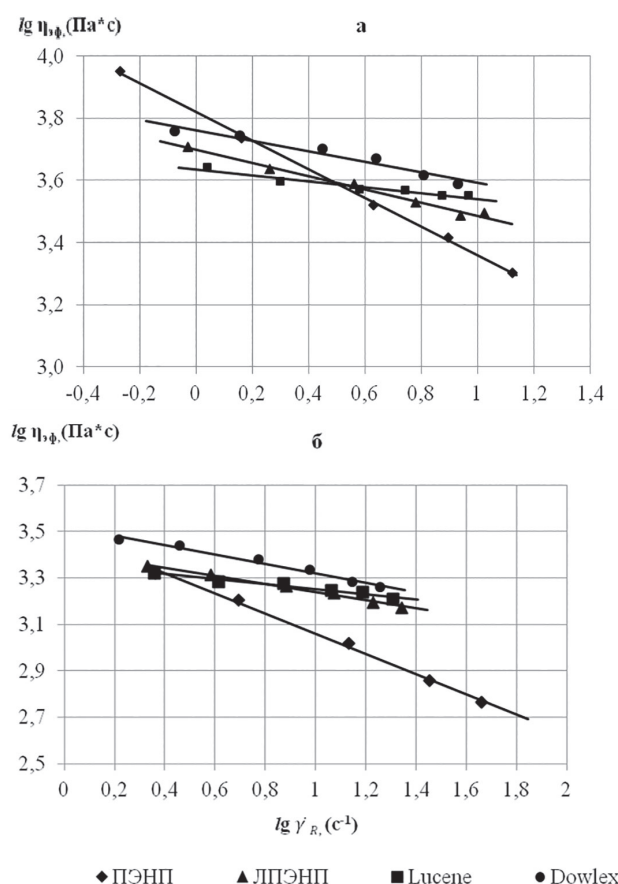


Рис. 1. Зависимость эффективной вязкости расплавов полиэтиленов от скорости сдвига при температуре 200 (а) и 250°C (б).

Из рис. 1 видно, что характер течения расплавов всех изученных полимеров типичен для псевдопластичных жидкостей [8] и описывается уравнением Оствальда–де Вилла:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

где τ , $\dot{\gamma}$ – напряжение и скорость сдвига; K – коэффициент консистенции или эффективная вязкость $\eta_{\text{эф}}$; n – индекс течения, $n < 1$.

Полученные данные показывают, что при температуре испытания 200°C эффективная вязкость расплава ПЭНП при скоростях сдвига менее $1,5$ с⁻¹ выше, чем вязкость всех изученных марок ЛПЭНП, а при скорости сдвига более $3,2$ с⁻¹ вязкость ПЭНП становится ниже вязкости всех марок ЛПЭНП, при этом наибольшая вязкость характерна для марки DOWLEX. В интервале $1,5$ – $3,2$ с⁻¹ вязкости полимеров примерно равны. При температуре 250°C при скорости сдвига > 2 с⁻¹ эффективная вязкость ПЭНП была ниже вязкости всех марок ЛПЭНП.

Таблица 1. Характеристики ПЭНП и ЛПЭНП.

Свойства	Ед. изм.	ПЭНП PE LD08220 FE	ЛПЭНП		
			LL09200 FE	LUCENE HP 1018BH	DOWLEX 6000G
Свойства гранулята					
Плотность	г/см³	0,921	0,920	0,918	0,916
ПТР	г/10 мин	0,8	0,9	1,0	0,7
Температура размягчения по Вика, Тв	°С	90	100	118	96
Свойства пленок*					
Прочность при растяжении MD/TD	МПа или кг/см²	14,1	44/40	– 520/450	36,7/37,6
Относительное удлинение MD/TD	%	630	800/850	550/640	570/640
Прочность на раздир по Элмендорфу MD/TD	г	–	160/360	280/370	860/1100
Мутность	%	9,3	11	18	8,5

* Справочные данные, значения показателей даны для пленок разной толщины.

В таблице 2 приведены результаты анализа реологических характеристик расплавов исходных полимеров, определенных методом капиллярной вискозиметрии.

Таблица 2. Реологические параметры течения расплавов полиэтиленов в диапазоне температур 200–250°C.

Марка материала	Индекс течения, n		$\eta_{\text{эф}}^*$, Па·с		$E_{\text{акт}}$, кДж/моль
	200°C	250°C	200°C	250°C	
PE LD08220FE	0,57	0,56	2010	1040	30,3
LL09200FE	0,79	0,82	3120	1720	23,6
LUCENE HP1018BH	0,91	0,89	3550	1770	27,4
DOWLEX 6000G	0,83	0,80	3870	2160	25,5

* Эффективная вязкость определена при постоянной скорости сдвига $\gamma_R = 10 \text{ с}^{-1}$.

Как следует из данных таблицы 2, индекс течения ПЭНП составляет 0,56–0,57, что говорит о широком ММР полимера. Для всех марок ЛПЭНП значение n составляет от 0,79 до 0,91, но для образца марки LUCENE, полученного на металлоцееновом катализаторе, индекс течения составляет 0,89–0,91, что говорит о более узком ММР этого полимера по сравнению с другими марками ЛПЭНП. Из изученных полимеров наибольшей вязкостью обладает образец марки DOWLEX 6000G, причем вязкость этой марки ЛПЭНП существенно (в 2 раза) выше вязкости ПЭНП. Вязкость остальных марок ЛПЭНП превышает вязкость ПЭНП в 1,6–1,8 раза. В целом в исследованном диапазоне скоростей сдвига при 250°C соотношение вязкостей ЛПЭНП и ПЭНП с увеличением интенсивности деформирования расплавов возрастает, а при 200°C имеет сложный характер.

При формировании структуры смесей важен показатель соотношения вязкостей компонентов в условиях смешения [10]. Отношение вязкостей смешиваемых полимеров определяет макроструктуру дисперсии ПЭНП в матрице ЛПЭНП. При более низких значениях вязкости дисперсной фазы частицы могут иметь вытянутую форму, что реализуется при скоростях сдвига более $3\text{--}4 \text{ с}^{-1}$ в изученном диапазоне температур смешения. Это может привести к большей ориентации матрицы. Ниже будет показано, что при производстве пленок методом раздува рукава в формующем инструменте реализуются скорости сдвига, при которых эффективная вязкость ПЭНП ниже эффективной вязкости ЛПЭНП всех приведенных марок в диапазоне температур 200–250°C.

Анализ ДСК-термограмм исходных полимеров и их смесей показал незначительный рост степени кристалличности ЛПЭНП при добавлении ПЭНП при практически неизменных температурах плавления и кристаллизации. В таблице 3 приведены температурные переходы и расчетная степень кристалличности ряда изученных полимеров.

Как следует из данных таблицы 3, общая степень кристалличности повысилась в смесях ЛПЭНП марок LL09200 FE и LUCENE с ПЭНП.

При этом температура плавления ЛПЭНП марки LL09200 FE в смеси с ПЭНП незначительно повысилась, а ЛПЭНП марки LUCENE – незначительно снизилась. Температура плавления ПЭНП в смесях возросла на 7–9 градусов. В смесях ЛПЭНП+ПЭНП обнаруживаются два пика плавления, характерные для каждого компонента, т.е. смеси ведут себя как двухфазные системы.

Одним из важных параметров при экструзии изделий, в том числе тонких пленок, является коэффициент разбухания расплава,

Таблица 3. Результаты анализа термограмм ДСК.

Состав материала	Температура плавления $T_{\text{пл}}$, °C	Температура кристаллизации $T_{\text{кр}}$, °C	Степень кристалличности общая, χ , %	Аддитивное значение, χ , %
LL09200 FE	120,8	106,2	33,7	–
LL09200 FE + 10% ПЭНП	109,8/121,4	107,9	36,1	34,1
LL09200 FE + 20% ПЭНП	109,1/121,4	108,2	36,6	34,0
ПЭНП	100,9	97,1	35,3	–
LUCENE	120,73	106,6	33,6	–
LUCENE + 10% ПЭНП	107,4/119,3	107,3/95,2	36,7	34,1
LUCENE + 20% ПЭНП	108,4/120,9	107,6/94,9	35,3	33,9

влияющий на размеры экструзионных изделий и характеризующий вязкоупругие свойства расплавов полимерных материалов.

Вязкоупругие свойства полимеров оценивали по значению коэффициента разбухания, равному отношению диаметра экструдата к диаметру капилляра $K_p = d_s/d_k$, при двух температурах испытания. Для сопоставления коэффициента разбухания, измеренного на приборе ИИРТ, с коэффициентом разбухания на реальной экструзионной пленочной установке, использовали капилляр с длиной 32 мм диаметром 2 мм, т.е. отношение длины к диаметру составляло 16. Известно [9], что пленочные плоскощелевые головки обычно имеют отношение длины щели к ее высоте от 30 до 50. При толщине зазора 2,0–2,5 мм отношение длины выходного канала к толщине щели составляет 15–25. Коэффициент разбухания снижается при увеличении отношения длины капилляра к диаметру, поэтому для оценки величины возможного разбухания полимеров при переработке в пленки использовали капилляр достаточной длины с соотношением $l/d = 16$.

Результаты определения коэффициента разбухания, представлены в таблице 4.

Таблица 4. Коэффициенты разбухания экструдатов при постоянном напряжении сдвига $4,34 \cdot 10^4$ Па и температуре испытания 200 и 250°C.

Материал	Коэффициент разбухания K_p при температуре испытания		K_p ПЭНП/ K_p ЛПЭНП при 200°C
	200°C	250 °C	
ПЭНП PE LD08220 FE	1,60	1,51	–
ЛПЭНП LL09200 FE	1,20	1,14	1,33
LUCENE HP 1018BH	1,21	1,13	1,32
DOWLEX 6000G	1,23	1,17	1,30

Установлено, что K_p ПЭНП превышал K_p трех изученных марок ЛПЭНП примерно на 30%. При повышении температуры K_p незначительно снижался. Величина коэффициента разбухания связана с величиной накопленной высокоэластической деформации в процессе течения полимера через каналы малых размеров. В структуре макромолекул ПЭНП наличие больших ответвлений в основной цепи обуславливает большие высокоэластические деформации и, соответственно, больший K_p при экструзии. Структура ЛПЭНП отличается от структуры ПЭНП наличием небольших боковых ответвлений $C_4\text{--}C_8$, что приводит к более низкому значению K_p при экструзии полимеров в результате более быстрой релаксации деформаций, накопленных в процессе течения. Это согласуется с данными [4].

Коэффициент разбухания расплава зависит как от напряжения сдвига, так и от скорости сдвига, непосредственно связанной с объемной производительностью экструзионных линий. Поэтому оценивали зависимость коэффициента разбухания расплавов полимеров от скорости сдвига. На рис. 2 и 3 представлены зависимости K_p для исследованных полимеров.

Как следует из данных рисунков 2 и 3, коэффициент разбухания ПЭНП существенно превышает K_p линейных полиэтиленов, причем с увеличением скорости сдвига для всех полимеров, за исключением LUCENE, наблюдается тенденция увеличения K_p . Кроме того, K_p практически не зависит от температуры расплава. Обычно наблюдается снижение K_p при повышении температуры для

термопластов. Однако такие измерения чаще всего проводят на коротких ($l/d = 4$) капиллярах, когда степень релаксации деформаций, накопленных в процессе прохождения расплава через каналы малой длины, проявляется максимально. При течении расплава через капилляры большей длины часть накопленных высокоэластических (упругих) напряжений успевает отрелаксировать в процессе течения через канал капилляра, что снижает влияние температуры на величину K_p .

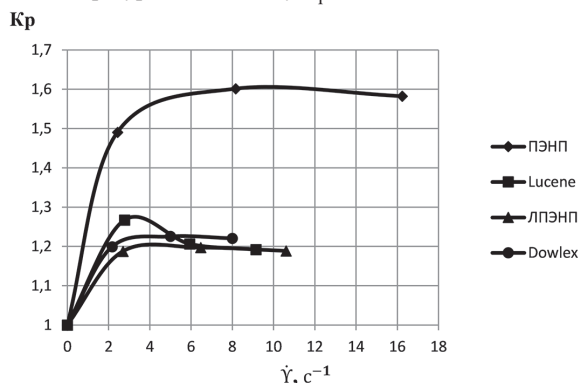


Рис. 2. Зависимость K_p от скорости сдвига на стенке капилляра при 200°C для ПЭНП и ЛПЭНП.

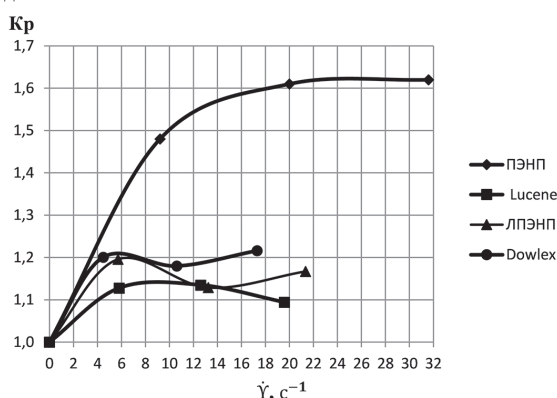


Рис. 3. Зависимость K_p от скорости сдвига на стенке капилляра при 250°C для ПЭНП и ЛПЭНП.

Введение в ЛПЭНП небольшого количества ПЭНП меняет картину накопления высокоэластических деформаций при течении через каналы формующего инструмента. Измерение K_p для смеси ЛПЭНП с ПЭНП в зависимости от состава проводили при тех же условиях, что и для исходных полимеров. При смешении ЛПЭНП с ПЭНП следовало ожидать рост K_p при увеличении содержания ПЭНП. На рис. 4 представлено изменение K_p расплава в зависимости от содержания ПЭНП в смеси с ЛПЭНП при двух температурах испытания при постоянном напряжении сдвига $2 \cdot 10^4$ Па.

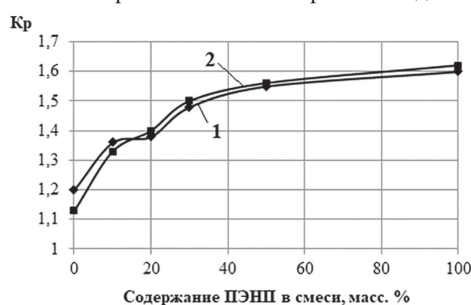


Рис. 4. Зависимость K_p от содержания ПЭНП в смеси с ЛПЭНП марки LL09200 FE от состава смеси при 200°C (1) и 250°C (2).

Как и ожидалось, при увеличении содержания ПЭНП в смеси K_p увеличивался, и при содержании 50 масс.% ПЭНП достигал значений, характерных для ПЭНП.

Релаксация накопленных в процессе течения напряжений, определяющая разбухание экструдата, будет приводить к утолщению пленки на выходе из экструзионной головки. Это необходимо учитывать, корректируя при получении пленок параметры вытяжки и раздува.

Следует отметить, что при получении смесевых композиций на одношнековом экструдере наблюдали явление срыва струи при

течении расплава через экструзионную фильеру. Такое явление иногда наблюдают и в промышленных условиях получения пленочных изделий. Поэтому было интересно сравнить достижимые скорости сдвига на лабораторном и промышленном оборудовании. Расчеты проводили по формулам, приведенным для разных конструкций экструзионных головок [9].

Ориентировочный расчет скоростей сдвига при экструзии проводили по формуле (2) для круглого отверстия (без учета индекса течения):

$$\dot{\gamma} = \frac{4q}{\pi r^3}, \quad (2)$$

где q – объемный расход, $\text{см}^3/\text{с}$; r – радиус выходной фильеры, см .

Объемный расход определяли по формуле (3)

$$q = \frac{G}{\rho_p}, \quad (3)$$

где G – производительность экструдера в $\text{г}/\text{с}$; ρ_p – плотность при температуре расплава, $\text{г}/\text{см}^3$.

Средняя производительность при 200°C для смесей с содержанием ПЭНП в ЛПЭНП от 10 до 30 масс.% составляла 0,94 $\text{см}^3/\text{с}$. Для получения стренг из исходных полимеров и их смесей использовали фильеру диаметром 4 мм и длиной цилиндрического отверстия 35 мм.

Расчетная плотность расплава марок ЛПЭНП и смесей с ПЭНП при температуре 200°C составила $0,75 \pm 0,03 \text{ г}/\text{см}^3$.

Расчет показывает, что скорость сдвига, реализуемая в фильере, составляет 150 с^{-1} .

Ориентировочный расчет скорости сдвига в кольцевой головке при производстве пленок методом раздува рукава проводили по формуле (4):

$$\dot{\gamma} = \frac{6q}{\pi(R_1 + R_2)(R_1 - R_2)^2} \quad (4)$$

где q – объемный расход расплава в экструзионной головке линии, $\text{см}^3/\text{с}$; R_1 и R_2 – внешний и внутренний радиус кольцевого отверстия в головке, см .

Расчет проводили при максимальной производительности линии 400 $\text{кг}/\text{час}$, диаметре головки 400 мм, кольцевом зазоре 2 мм.

При этих условиях скорость сдвига на выходе из головки составляет 178 с^{-1} . Из ориентировочных расчетов следует, что возможно достижение критических скоростей сдвига при достижении максимальной производительности линии при переработке ЛПЭНП без применения технологических добавок.

Явление срыва струи на пленке выглядит как «апельсиновая корка» или «акуля кожа», что весьма нежелательно при получении тонких прозрачных пленок. Данное явление описано в работе [4], где рекомендуется для устранения этого дефекта повышать температуру или снижать скорость сдвига в экструзионной головке.

Для сравнения приведем ориентировочный расчет скорости сдвига в щелевой головке опытной линии при получении экспериментальных образцов пленок из изучаемых полимеров и их смесей.

Скорость сдвига в щелевой головке определяется по формуле (5):

$$\dot{\gamma} = \frac{6q}{bh^2} \quad (5)$$

где b и h – ширина и высота щели, соответственно.

Размеры щелевой головки составили: $b = 230 \text{ мм}$, $h = 1,5 \text{ мм}$.

Объемная производительность составляла 0,23 $\text{см}^3/\text{с}$. Отсюда расчетная скорость сдвига в головке равна 2,5 с^{-1} .

При таких условиях экструзии пленка имела гладкую поверхность для всех исследованных составов материала. Толщина пленки составляла от 100 до 150 $\mu\text{м}$. Кроме того, наблюдали интересное явление: ширина пленки изменялась в зависимости от содержания ПЭНП в ЛПЭНП. Если ширина пленки из ПЭНП при одинаковых условиях экструзии составляла 192–195 мм при толщине 100–110 $\mu\text{м}$, то для пленок из DOWLEX ширина была 140 мм при колебании толщины 155–120 $\mu\text{м}$, а из LUCENE – 160 мм при колебании толщины 130–100 $\mu\text{м}$ по ширине пленки. Для смесевых пленок при увеличении содержания ПЭНП от 20 до 50 масс.% ширина пленки увеличивалась со 170 до 195 мм. Пленки меньшей толщины имели более низкую разнотолщинность.

При производстве пленок из ЛПЭНП плоскощелевым методом расстояние от формующей фильеры до охлаждающего вала

устанавливают минимальным во избежание сильного уменьшения ширины пленки. Это связано с высокой упругостью расплава ЛПЭНП и быстрой усадкой полимера при охлаждении. Отсюда напрашивается вывод о том, что введение ПЭНП в ЛПЭНП способствует меньшей зависимости геометрических размеров пленки от технологических параметров и конструктивных особенностей формующего и охлаждающего инструмента при получении пленок методом плоскощелевой экструзии.

Анализ гомогенности полученных пленок в поляризованном свете показал удовлетворительную однородность пленок по ширине, за исключением утолщенных кромок.

Полученные пленки испытывали на разрыв вдоль и поперек направления экструзии. На рис. 5 представлены результаты измерения прочности и относительного удлинения при разрыве от состава пленок из ПЭНП и ЛПЭНП марки LL09200 FE.

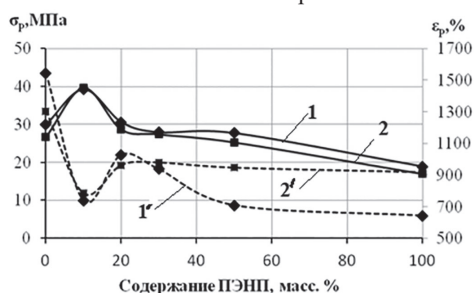


Рис. 5. Зависимость прочности при разрыве (1 и 2) и относительного удлинения при разрыве (1' и 2') пленок ПЭНП/ЛПЭНП марки LL09200 FE от состава вдоль (1 и 1') и поперек экструзии (2 и 2').

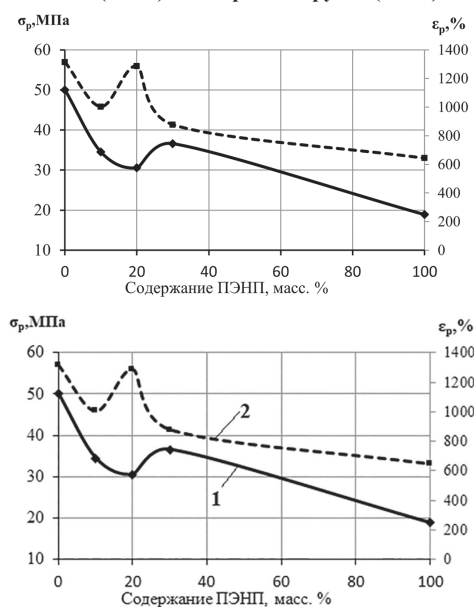


Рис. 6. Зависимость прочности при разрыве (1) и относительного удлинения при разрыве (2) пленок ПЭНП/ЛПЭНП (LUCENE) от состава вдоль экструзии.

Из рис. 5 следует, что при небольшом содержании ПЭНП (10–20 масс.%) в смеси наблюдается некоторое увеличение прочности при разрыве с одновременным снижением относительного удлинения. Вероятно, это связано с облегчением ориентации ЛПЭНП в присутствии ПЭНП, что может быть обусловлено уменьшением вязкости расплава смеси; но при дальнейшем увеличении содержания ПЭНП в смеси прочность снижается при практически неизменном относительном удлинении.

Испытания пленок в условиях растяжения показали, что для смеси ЛПЭНП LL09200 FE + ПЭНП не следует рекомендовать введение свыше 30 масс.% ПЭНП из-за снижения деформационно-прочностных показателей пленок.

В то же время для смеси ЛПЭНП марки LUCENE с ПЭНП снижение прочности при разрыве при введении ПЭНП происходило более резко, а относительное удлинение при разрыве снижалось более плавно (рис. 6).

Таким образом, на оптимальный состав смеси ПЭНП/ЛПЭНП влияет вид ЛПЭНП, и в зависимости от требований к пленке и технологии ее получения он может существенно меняться.

На рис. 7 представлено сравнение прочности при разрыве образцов пленок ЛПЭНП и смесей ЛПЭНП с 20 масс.% ПЭНП вдоль направления экструзии.

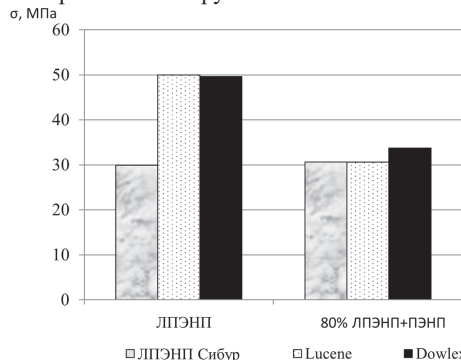


Рис. 7. Сравнительная диаграмма прочности при разрыве пленок вдоль экструзии для исходных марок ЛПЭНП и смесей с 20 масс.% ПЭНП.

Из рисунка видно, что при увеличении содержания ПЭНП до 20 масс.% в ЛПЭНП происходит существенное снижение прочности при разрыве для марок ЛПЭНП, являющихся сополимерами этилена как с гексеном, так и с октеном. Поэтому необходимо учитывать вероятность снижения прочностных показателей пленки при введении ПЭНП в состав материала.

Такие преимущества смесевой пленки, как улучшение стабильности процесса экструзии, прочности расплава, смещение критических скоростей сдвига в сторону увеличения и возможность повышения производительности установки чаще всего более важны, чем снижение прочностных показателей. Поэтому модификация ЛПЭНП путем введения ПЭНП является перспективным направлением повышения качества пленки и расширения ассортимента пленочных изделий. Следует добавить, что оптимальный состав пленок зависит как от метода получения пленки, так и параметров экструзии. Поэтому предполагается дальнейшее изучение влияния параметров экструзии на свойства смесевых пленок на основе ЛПЭНП.

Авторы выражают признательность за предоставленные материалы и консультации Генеральному директору ООО «Десногорский полимерный завод» Преферансову А.Г., а также за помощь в проведении эксперимента сотрудникам АО «МИПП – НПО «Пластик» Максимовскому А.Н., Мараховскому К.М., Мешалкину А.О.

Литература

1. «Линейная» альтернатива полиэтилена высокого давления (ПВД). [Электронный ресурс] //Plastinfo.ru: отраслевой портал переработчиков пластмасс. 2013, март. URL: <https://plastinfo.ru/information/articles/64> (дата обращения: 21.08.2023).
2. Линейный полиэтилен низкой плотности (ЛПЭНП, ЛПЭВД, LLDPE). [Электронный ресурс] Справочник упаковщика. // Отраслевой портал Unipack.ru. URL: <https://ref.unipack.ru/95> (дата обращения: 21.08.2023).
3. ПЭВД будет вытеснен линейным полиэтиленом. [Электронный ресурс] // ПластЭксперт: отраслевой портал. URL: <https://e-plastic.ru/spravochnik/research/pevd-budet-vytesnen-lineinym-polietilenom> (дата обращения: 21.08.2023).
4. Film extrusion and conversion. [Electronic resource] // ALKAMAX.com URL: <https://alkamax.com.au/wp-content/uploads/2017/12/tg-3film.pdf> (дата обращения: 21.08.2023).
5. Иманаев И.Р., Жуков В.В., Спиридонова Р.Р. Смесевые композиции на основе полиэтилена высокого давления и линейного полиэтилена высокого давления. // Вестник Казанского технологического университета. 2017, Т. 20, №6. С. 29–31.
6. Кутовой А. Раздувные пленки: управление качеством //Пластик, N3 (121), 2013. С. 28 – 32.
7. Delgadillo-Velázquez O., Hatzikiriakos S. G., Sentmanat M. Thermorheological properties of LLDPE/LDPE blends. // Rheol Acta (2008) 47:19–31.
8. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров. М: Химия, КолосС, 2005. С.25–26.
9. Натти РАО С. Технологические расчеты в переработке пластмасс. /пер. с англ. под ред. О.И. Абрамушкиной. СПб: Профессия, 2013. С. 19–20.
10. Шерышев М.А. Производство изделий из полимерных пленок. СПб.: НОТ, 2011. С. 39.
11. Кулезнев В.Н. Смесей и сплавы полимеров: конспект лекций. СПб: НОТ, 2013. 216 с.