

## АНИЗОТРОПИЯ СВОЙСТВ РУКАВНЫХ ПЛЕНОК ПЭВД ПРИ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ В ЭКСТРУЗИОННОЙ УСТАНОВКЕ

Н. Ф. Ефремов, О. А. Будникова, А. В. Канаичева, М. А. Иванова

*Кафедра «Технологии и управление качеством в полиграфическом  
и упаковочном производстве», nf.efremov@mail.ru,  
ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия*

**Ключевые слова:** аморфные и кристаллические образования; анизотропия прочности; изохромы; пленка ПЭВД; продольная вытяжка; технологическая анизотропия; физическая модификация.

**Аннотация:** Исследования свойств рукавных пленок полиэтилена высокого давления (ПЭВД) показали, что при физической модификации в экструзионной установке путем больших кратностей продольной вытяжки расплава  $K_r = 7,2 \dots 12,4$ , возникает технологическая анизотропия  $K_{ат}$  в диапазоне значений  $2,77 \dots 3,65$ , прямо пропорциональная величине кратности продольной вытяжки  $K_r$ . Данная технологическая анизотропия в 1,8 раз превышает анизотропию прочности пленок  $K_{ас}$ , которая также прямо пропорциональна  $K_r$  и связана с ориентацией аморфных структур в конусной части рукава и изменениями соотношения обнаруженных трех форм кристаллических образований с различными температурами плавления. При одноосном растяжении у исследованных пленок в поляризованном свете наблюдается появление изохром в следующей последовательности: желтый, оранжевый, красный, фиолетовый, синий, голубой, зеленый. Появление изохром объясняется ориентацией мелких кристаллов.

---

### Введение

Около 75 % объема потребления термопластичных пленок в производстве упаковки приходится на полиэтилен высокого давления (ПЭВД) [1]. Пленки из ПЭВД применяют для упаковки широкого спектра товаров, в том числе пищевых продуктов, содержащих не более 30 % жира, а также для производства тары и упаковочных материалов типа лотков, коробок, ящиков и т.п. [2].

Примерно 85 % всей пленочной продукции производится рукавным способом в установках экструзии с раздувом [3]. В секции раздува осуществляется двухосная вытяжка рукава в продольном и поперечном направлении с одновременным его охлаждением. При этом происходит физическая модификация свойств пленок ПЭВД, оказывающая влияние как на аморфную, так и кристаллическую фазы полимера [4, 5]. Такая модификация, как правило, приводит к появлению анизотропии свойств пленок.

Под анизотропией понимают различие количественных характеристик физических свойств (механических, термических, оптических, акустических, электрических и др.) полимеров по различным направлениям. Выделяют следующие виды анизотропии:

- конструкционную, спроектированную с определенными целями;
- технологическую, возникающую в процессе производства изделий;
- физическую, связанную с особенностями строения кристаллической решетки [6].

У рукавных пленок ПЭВД анизотропия может быть технологической и физической. Анизотропия может влиять на качество печати, формообразования, сварки в процессах производства мягкой упаковки, а также на механические и эксплуатационные свойства упаковки [7, 8].

Цель работы – исследование влияния технологических режимов в секции раздува рукава экструзионной установки на анизотропию механических и оптических свойств пленок ПЭВД, определяющих основные характеристики мягкой упаковки.

### Методика проведения исследований

Пленку из гранул ПЭВД 15803-020 ГОСТ 16337–77 изготавливали на лабораторной установке Э–16 [9] с диаметром шнека экструдера 16 мм, отношением длины шнека  $L_{ш}$  к диаметру  $D_{ш}$ , равным  $L_{ш}/D_{ш} = 26$ , с тремя зонами обогрева (1, 2, 3) материального цилиндра и двумя зонами обогрева (4, 5) угловой кольцевой головки. Температурные режимы экструзионной части установки, принятые равными в зонах нагрева 1, 2, 3 – 140, 170, 180 °С соответственно и 4, 5 – по 180 °С, и производительность экструдера 0,02 кг/мин при частоте вращения шнека 73 об/мин поддерживались постоянными. При диаметре выходной щели кольцевой головки  $d_k = 30$  мм и ширине щели  $\delta_{щ} = 1$  мм скорость выхода расплава составляла  $v_3 = 0,23$  м/мин.

Раздув выходящего из кольцевой головки расплава осуществляли при постоянном давлении внутри рукава  $P_p = 0,6$  МПа. За счет регулирования интенсивности охлаждения поддерживали постоянной высоту линии кристаллизации  $H_{кр} \approx 120$  мм и, изменяя скорость вращения приемных валов путем бесступенчатой регулировки частоты тока приводного двигателя, получали пленку с различной кратностью продольной горячей вытяжки  $K_r$ , рассчитанную по формуле

$$K_r = \frac{v_{пл}}{v_3}. \quad (1)$$

Линейную скорость вращения приемных валов  $v_{пл}$ , м/мин, определяли по формуле

$$v_{пл} = 2\pi R_{пр} n_{пр}, \quad (2)$$

где  $n_{пр}$ ,  $R_{пр}$  – частота вращения, об/мин, и радиус, м,  $R_{пр} = 0,05$ , приемных валов соответственно.

Диаметр рукава  $D_p$  определяли по формуле

$$D_p = \frac{2B}{\pi} = 0,64B, \quad (3)$$

где  $B$  – ширина сложенного пополам рукава.

Кратность поперечной вытяжки пленки  $K_{пв}$  рассчитывали по соотношению

$$K_{пв} = \frac{D_p}{d_k}. \quad (4)$$

Прочность при растяжении определяли по ГОСТ 14236–81 (ASTM D882-10) на разрывной машине ИМ-10 со скоростью растяжения 50 мм/мин. Образцы пленки длиной 100 мм и шириной 10 мм вырезали с помощью специального приспособления в продольном и поперечном направлениях рукава.

Толщину пленки измеряли скобой с отсчетным устройством типа СРП-2 с ценой деления 1 мкм.

Теплофизические свойства определяли методом дифференциально-сканирующей калориметрии по ГОСТ Р 55134–2012 [10] с использованием прибора DSK 204 F1 Phoenix фирмы NETZSCH в атмосфере аргона, при нагревании и охлаждении со скоростью 10 °С/мин [11].

Поляризационно оптические исследования выполняли при помощи поляризационного микроскопа ЛОМО ПОЛАР-М Р-312. Образец пленки закрепляли в приспособлении и растягивали с шагом 4–5 % в продольном направлении. Приспособление с образцом помещали на предметный столик микроскопа. Исследования проводили в проходящем поляризованном свете. Поляризатор и анализатор устанавливали в скрещенном положении, а образец – под углом 45° к ним. Все наблюдения фиксировали фотоаппаратом Nikon Coolpix 4500, закрепленном на фототубусе, и обрабатывали в программе Ps.

### Результаты и обсуждение

Многие практические рекомендации для производства пленок ПЭВД [1, 2, 12, 13], предлагая оптимальные значения  $K_{\Gamma} = 2,5 \dots 3,5$ , а  $K_{\text{пв}} = 1,5 \dots 3,0$ , предусматривают некоторую технологическую анизотропию. Исследованы свойства пленок, полученных при значительно больших кратностях вытяжки расплава  $K_{\Gamma} = 7,2 \dots 12,4$ . Такие пленки толщиной 25...50 мкм с прочностью, в 2-3 раза превышающей прочность обычных пленок [4], наиболее перспективны для применения в упаковочной промышленности.

Рассчитанные по формулам (1) – (4) значения кратностей продольной  $K_{\Gamma}$  и поперечной  $K_{\text{пв}}$  вытяжки приведены в табл. 1. Их отношение определяет технологическую анизотропию пленки  $K_{\text{ат}}$

$$K_{\text{ат}} = \frac{K_{\Gamma}}{K_{\text{пв}}}. \quad (5)$$

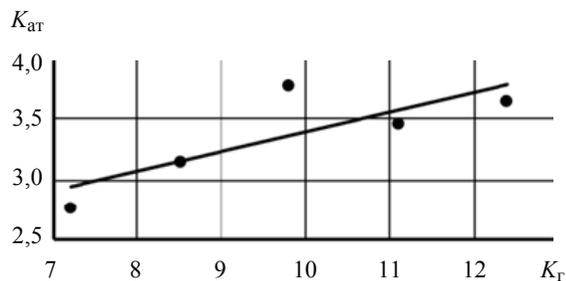
Установлено, что технологическая анизотропия пленки  $K_{\text{ат}}$  прямо пропорциональна величине кратности продольной вытяжки  $K_{\Gamma}$  (рис. 1), находится в диапазоне 2,77...3,65 и ее можно определять по линейному уравнению

$$K_{\text{ат}} = 0,16K_{\Gamma} + 1,8. \quad (6)$$

Таблица 1

#### Основные характеристики исследованных пленок

$K_{\Gamma}$	$\delta_{\text{пл}}$ , мкм	$D_{\text{р}}$ , мм	$v_{\text{пл}}$ , м/мин	$K_{\text{пв}}$	$K_{\text{ат}}$	BC, мм	$\alpha$ , °	$K_{\text{ае}}$
7,2	53	79	1,66	2,6	2,77	24,5	76	2,04
8,5	44	80	1,89	2,7	3,15	25	75	2,0
9,8	40	79	2,16	2,6	3,77	24,5	76	2,04
11,1	28	97	2,58	3,2	3,47	33,5	72,5	1,49
12,4	24	101	2,81	3,4	3,65	35,5	71,5	1,41



**Рис. 1. График зависимости технологической анизотропии пленки  $K_{ат}$  от кратности продольной вытяжки  $K_G$**

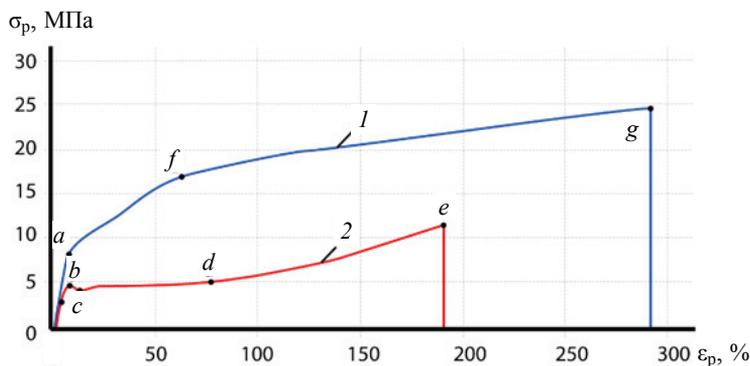
Подобная технологическая анизотропия приводит к анизотропии прочностных свойств пленок. Она проявляется в различном поведении при испытаниях на растяжение пленок в продольном и поперечном направлениях рукава (рис. 2).

В поперечном направлении (кривая 2) величина условно упругих деформаций составляет 3 – 5 %, на участке *bc* на образце образуется местное сужение – «шейка» с последующим большим участком вынужденно эластических деформаций *cd*, что типично для гибкоцепных полимеров. Прочность при растяжении для пленки с кратностью продольной вытяжки  $K_G = 7,2$  составляет 8,3 МПа, относительное удлинение при разрыве 180 %.

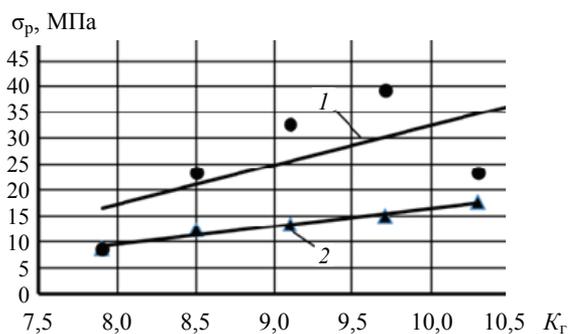
В продольном направлении (кривая 1) условно-упругие деформации (участок *oa*) достигают 4 – 6 %, «шейки» не наблюдается (участок *af*), материал растягивается равномерно по всей длине и его поведение более характерно для жесткоцепных полимеров. Прочность при растяжении составляет 21,5 МПа, относительное удлинение при разрыве 285 %.

Можно полагать, что такая анизотропия объясняется значительной упорядоченностью и ориентацией аморфных структур ПЭВД в направлении продольной вытяжки расплава в зоне раздува рукава.

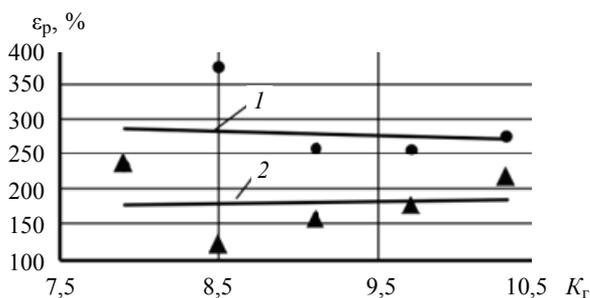
Прочность при растяжении как в продольном, так и в поперечном направлениях рукава возрастает при увеличении кратности продольной вытяжки (рис. 3, *a*). Но интенсивность увеличения прочности в продольном направлении в 2 раза выше, чем в поперечном, о чем свидетельствуют значения коэффициентов при  $K_G$  в уравнениях (7) и (8), определяющих зависимости прочности в продольном  $\sigma_p$  и поперечном  $\sigma_{pp}$  направлениях соответственно:



**Рис. 2. Кривые растяжения пленок ПЭВД в продольном (1) и поперечном (2) направлениях рукава при кратности вытяжки  $K_G = 9,8$**



а)



б)

**Рис. 3. Графики зависимостей прочности при растяжении  $\sigma_p$  (а) и относительного удлинения при разрыве  $\epsilon_p$  (б) от кратности продольной вытяжки  $K_{\Gamma}$  пленок ПЭВД в продольном (1) и поперечном (2) направлениях рукава**

$$\sigma_p = 7,7K_{\Gamma} - 44; \quad (7)$$

$$\sigma_{p\perp} = 3,5K_{\Gamma} - 18. \quad (8)$$

Относительное удлинение при разрыве мало изменяется при увеличении кратности продольной вытяжки (рис. 3, б) и в продольном направлении оно примерно в 1,5 раза больше, чем в поперечном направлении.

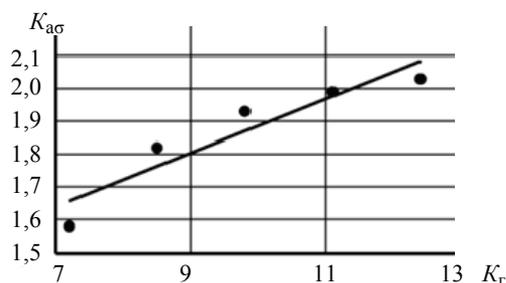
Примем, что анизотропию прочности пленок можно оценивать коэффициентом анизотропии  $K_{a\sigma}$ , определяемым по соотношению

$$K_{a\sigma} = \frac{\sigma_p}{\sigma_{p\perp}}. \quad (9)$$

Анализ результатов испытаний на растяжение (см. рис. 3, а, уравнения (7) и (8)) показывает, что повышение кратности продольной вытяжки рукава с 7,2 до 12,4 приводит к линейному увеличению анизотропии прочности пленок  $K_{a\sigma}$  с 1,58 до 2,03 (рис. 4). Значения  $K_{a\sigma}$  можно рассчитать по уравнению

$$K_{a\sigma} = 0,08K_{\Gamma} + 1,06. \quad (10)$$

Сравнение данных рис. 1 и рис. 3, а, а также уравнений (6) и (10) показывает, что технологическая анизотропия в 1,8 раз превышает анизотропию прочности пленок во всем исследованном диапазоне кратностей продольной вытяжки. Объяснение этому, по всей вероятности, следует искать во влиянии технологии формирования рукава на надмолекулярную структуру полимера.



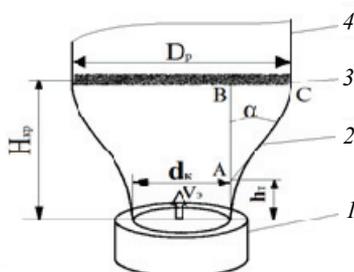
**Рис. 4. График зависимости анизотропии прочности  $K_{ас}$  от кратности продольной вытяжки  $K_G$**

Полиэтилен высокого давления относится к аморфно-кристаллическим полимерам. Отличительной его особенностью является низкая температура стеклования  $T_c = (-120...-70)^\circ\text{C}$  [1, 2, 14, 15]. При режимах наших исследований, а также эксплуатации упаковки, его аморфная фаза находится в высокоэластическом состоянии. Поэтому прочность ПЭВД ограничивается прочностью его аморфных структур. Кроме этого, значительный вклад в прочность вносят кристаллические образования. Следовательно, и анизотропия прочности зависит в первую очередь от их строения в продольном и поперечном направлениях рукава.

Продольная и поперечная деформации расплава в зоне раздува рукава смещены во времени и в пространстве. Сначала большая часть вытяжки в продольном направлении реализуется ближе к формирующей части головки на участке  $h$  (рис. 5). В этой области наибольшая температура, вязкость расплава минимальна, что способствует продольной вытяжке и пропорциональному уменьшению толщины. Затем выше у расплава меньшей толщины интенсивность охлаждения становится больше, а вязкость расплава значительно понижается, образуется зона раздува конусной формы с двухосной вытяжкой материала в продольном и поперечном направлении [1, 12, 13].

Можно полагать, что при больших значениях продольной вытяжки  $K_G > 7$ , а, следовательно, при большой скорости движения рукава, на первом участке высотой  $h$  реализуется часть продольной одноосной деформации расплава, которая приводит к уменьшению толщины пленки и мало влияет на анизотропию ее свойств. Основной же вклад в создание анизотропных структур вносит конусный участок рукава.

Об этом свидетельствуют следы течения расплава, которые отчетливо видны при поляризационно-оптических исследованиях (рис. 6). Эти следы ориентированы относительно боковой поверхности конуса. С центральной осью конуса, вдоль которой осуществляется продольная вытяжка рукава, они составляют угол  $\alpha$  (см. рис. 5).



**Рис. 5. Зона раздува рукава:**

*1* – кольцевая головка экструдера; *2, 4* – конусная и цилиндрическая части рукава соответственно; *3* – линия кристаллизации

Для пленки с  $K_{\Gamma} = 11,1$  данный угол составляет  $72,5^{\circ}$  (стрелкой показано направление продольной вытяжки) (см. рис. 6). Из треугольника  $ABC$  можно рассчитать сторону  $AB$ , которая является высотой усеченного конуса рукава:  $AB = BC/\text{tg}\alpha$ . Учитывая, что  $BC = (D_p - d_k)/2$ , для примера с  $K_{\Gamma} = 11,1$ , когда  $D_p = 97$  мм (см. табл. 1) и угол  $\alpha = 72,5^{\circ}$ ,  $AB = 100$  мм.

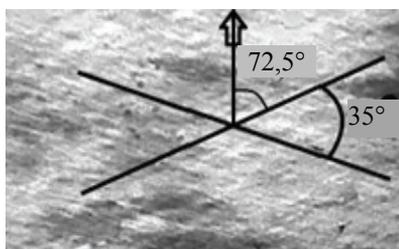


Рис. 6. Следы движения расплава в конусной части рукава при  $K_{\Gamma} = 11,1$

Таким образом, при высоте линии кристаллизации  $H_{кр} = 120$  мм высота конусной части рукава, на которой происходит двухосное растяжение расплава, составляет 100 мм, а высота цилиндрической части, где осуществляется только продольная вытяжка расплава,  $h = 20$  мм. Очевидно, это одна из причин различия между значениями технологической анизотропии и анизотропии прочности.

Второй причиной возникновения таких различий является превышение величины продольных деформаций расплава над поперечными при двухосном растяжении в зоне конусной части рукава. Обозначим отношение продольной к поперечной деформации расплава в конусной части рукава как коэффициент анизотропии деформации  $K_{ае}$ . Его можно определить по соотношению

$$K_{ае} = \frac{AB}{(D_p - d_k)} \quad (11)$$

С увеличением кратности продольной вытяжки  $K_{\Gamma}$  от 7,2 до 12,4 коэффициент анизотропии деформации  $K_{ае}$  уменьшается с 2 до 1,41 (табл. 1, рис. 7). Данную зависимость можно выразить линейным уравнением

$$K_{ае} = 3,13 - 0,14K_{\Gamma} \quad (12)$$

При увеличении кратности продольной вытяжки рукава анизотропия деформации расплава в конусной части рукава уменьшается (см. уравнение (12)), а анизотропия прочности получаемой пленки при этом возрастает (см. уравнение (10)). Вероятно, причину такого противоречия следует искать во влиянии условий формирования рукава на надмолекулярную структуру пленки. По-видимому, такое воздействие на анизотропию прочности пленки оказывают не только ориентационные явления аморфных структур, но и происходящие изменения кристаллических образований.

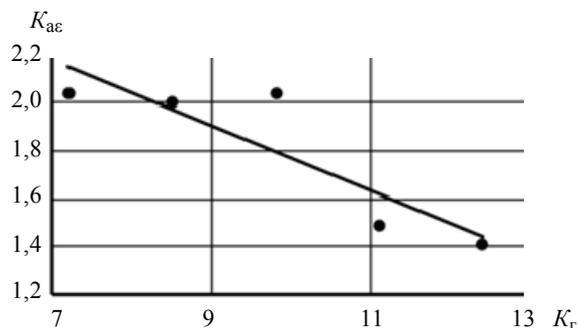


Рис. 7. График зависимости анизотропии деформации в конусной части рукава пленок ПЭВД  $K_{ае}$  от кратности продольной вытяжки  $K_{\Gamma}$

Известно, что микроструктура полиэтилена, кристаллизующегося при течении расплава, является поликристаллической и имеет преимущественное направление ориентации кристаллов и аморфных участков. Размеры кристаллов и степень ориентации зависят от напряжений, возникающих при деформации расплава и скорости его охлаждения [1, 12, 13, 15].

Проведенные исследования методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) показали, что при увеличении кратности продольной вытяжки рукава  $K_T$  степень кристалличности получаемых пленок возрастает с 37,25 до 40,8 %. При этом температура плавления кристаллов линейно увеличивается со 107 до 111 °С.

Разложение экспериментальных кривых ДСК-анализа с помощью программы Peak Separation фирмы NETZSCH [11] на три пика методом Фразера–Сузуки (пик Гаусса с асимметрией, коэффициент корреляции 0,9996) показало наличие трех кристаллических образований с температурами плавления 109,8; 97,1 и 59 °С. Эти температуры плавления практически не изменяются при увеличении кратности продольной вытяжки расплава  $K_T$ , что свидетельствует о стабильности формы и размеров данных кристаллов.

В работах [16, 17] у пленок ПЭВД также обнаружены три формы кристаллов с близкими к выявленным температурами плавления 110; 97,7 и 58,7 °С. Наличие мелких кристаллов объясняется появлением низкоплавких компонентов с температурой плавления парафинов, которые не успевают кристаллизоваться при быстром охлаждении полимера. На кривых повторного плавления, так же как и в исследованиях, широкий экстремум, относящийся к низкоплавким компонентам полиэтилена, отсутствует.

Чем выше температура плавления, тем больше размеры кристалла у полимеров [15]. Таким образом, выявленные кристаллы с  $T_{пл} = 109,8$  °С являются самыми крупными;  $T_{пл} = 97,1$  °С – крупными;  $T_{пл} = 59$  °С – мелкими. Установлено, что увеличение кратности продольной вытяжки  $K_T$  приводит к возрастанию содержания в пленке самых крупных кристаллов в 2 раза с 25,5 до 53 % и крупных кристаллов с 23,1 до 39,4 % (рис. 8). При этом число мелких кристаллов резко уменьшается с 51,3 до 7,6 %. Линейные зависимости содержания данных трех форм кристаллов от кратности продольной вытяжки приведены в табл. 2.

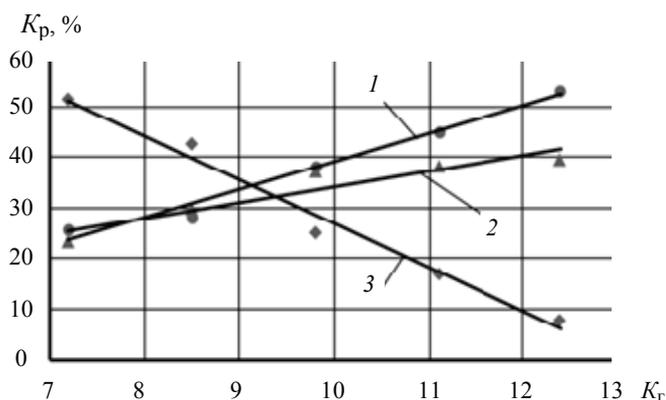


Рис. 8. Графики зависимостей содержания кристаллов  $K_p$  с температурой плавления 109,8 °С (1), 97,1 °С (2) и 59 °С (3) от кратности продольной вытяжки  $K_T$

**Аналитическое выражение зависимостей содержания кристаллов  
с различными температурами плавления от кратности  
продольной вытяжки  $K_T$  пленок ПЭВД**

График (см. рис. 8)	Характеристика кристаллов	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	Зависимость содержания кристаллов $K_p$ , % от $K_T$
1	Самые крупные	109,8	$5,5K_T - 16,2$
2	Крупные	97,1	$3,2K_T - 2,4$
3	Мелкие	59	$113,8 - 8,7K_T$

В работе [5] показано, что мелкие кристаллы снижают прочность пленок ПЭВД. Поэтому факт значительного снижения содержания мелких кристаллов при увеличении кратности продольной вытяжки наряду с ориентацией аморфных участков является второй причиной повышения прочности как в продольном, так и в поперечном направлениях рукава (см. уравнения (7) и (8)). Одновременное увеличение анизотропии прочности, вероятнее всего, связано с ориентацией крупных кристаллов при течении расплава с технологической анизотропией в продольном направлении.

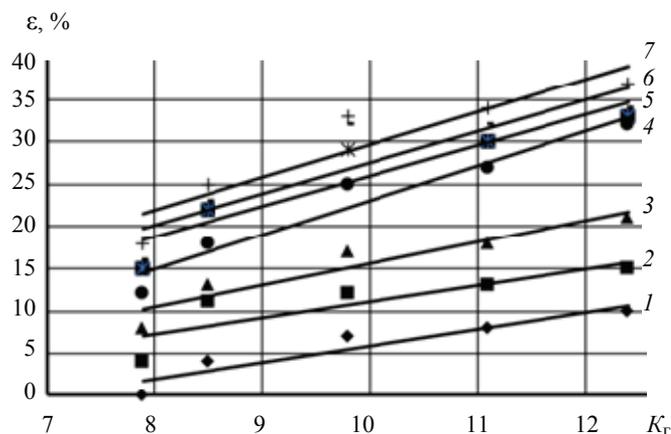
Ориентационные явления в задачах изменения формы и структуры материала под воздействием внешних нагрузок можно изучать поляризационно-оптическим методом [18 – 20]. В его основе лежит давно установленный факт, что плоская волна поляризованного света, попадающая на оптически анизотропную среду, распадается на две волны, распространяющиеся с различными скоростями [21]. В результате интерференции этих волн на экране после анализатора может возникать характеристическое окрашивание различного цвета. Окрашивание одинаковой цветности называют изохромами.

При одноосном растяжении у исследованных пленок в поляризованном свете с увеличением деформации наблюдается появление изохром в следующей последовательности: желтый, оранжевый, красный, фиолетовый, синий, голубой, зеленый, далее изохромы повторяются в том же порядке.

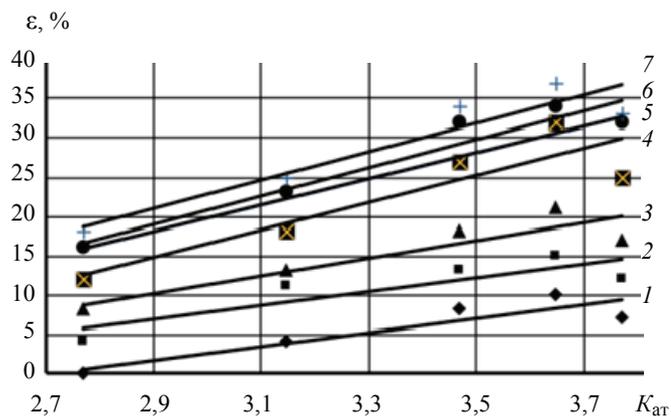
Величина деформации до появления изохром прямо пропорционально зависит от кратности продольной вытяжки пленок (рис. 9, а), а также от коэффициента технологической анизотропии при их получении (рис. 9, б).

Интересно, что в исходном состоянии без деформации первая желтая изохрома наблюдается только у пленки с наименьшей кратностью продольной вытяжки  $K_T = 7,2$ , причем технологическая анизотропия при этом минимальна. Для появления первой желтой изохромы у пленок с большей кратностью продольной вытяжки образцы следует растягивать, при этом необходимая величина деформации прямо пропорциональна  $K_T$ , несмотря на то, что величина технологической анизотропии тоже увеличивается.

Учитывая, что при  $K_T = 7,2$  содержание мелких кристаллов в пленке максимально и с возрастанием кратности продольной вытяжки их число прямо пропорционально уменьшается (см. рис. 8), а в процессе деформации расплава именно мелкие кристаллы в первую очередь будут ориентироваться, можно предположить, что появление первой желтой изохромы связано с ориентацией мелких кристаллов.



а)



б)

**Рис. 9. Графики зависимостей величины деформации  $\varepsilon$  от кратности продольной вытяжки  $K_r$  (а) и коэффициента технологической анизотропии  $K_{ат}$  (б) пленок ПЭВД до появления цветных изохром:**  
 1 – желтой; 2 – оранжевой; 3 – красной; 4 – фиолетовой; 5 – синей; 6 – голубой; 7 – зеленой

### Выводы

Полученные зависимости технологической анизотропии (6), анизотропии прочности (10) и деформационной способности (12) рукавных пленок ПЭВД от условий физической модификации в экструзионной установке являются основой для разработки технологических процессов производства пленок с прогнозируемыми свойствами, обеспечивающими бесперебойную работу фасовочно-упаковочных машин и повышающими качество и надежность выпускаемой на них мягкой упаковки.

Установленная взаимосвязь появления цветных изохром при деформации одноосного растяжения от режимов физической модификации и происходящих изменениях в надмолекулярной структуре может быть использована для создания нового поляризационно-оптического способа неразрушающего контроля качества рукавных пленок ПЭВД.

### Список литературы

1. Уайт, Дж. Л. Полиэтилен, полипропилен и другие полиолефины / Дж. Л. Уайт, Д. Д. Чой ; пер. с англ. под ред. Е. С. Цобкалло. – СПб. : Профессия, 2006. – 250 с.
2. Ефремов, Н. Ф. Тара и ее производство. Ч. 1. Производство тары из полимерных пленок и листов / Н. Ф. Ефремов. – М. : МГУП, 2009. – 341 с.
3. Лебедева, Т. М. Экструзия полимерных пленок и листов / Т. М. Лебедева. – СПб. : Профессия, 2009. – 216 с.
4. Ефремов, Н. Ф. Влияние режимов экструзионной установки в зоне раздува рукава на физическую модификацию пленок ПЭВД / Н. Ф. Ефремов, А. Н. Утехин, А. В. Канаичева // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2018. – № 2. – С. 21 – 36.
5. Экструзионная установка: влияние высоты линии кристаллизации на физическую модификацию рукавных пленок полиэтилена высокого давления / Н. Ф. Ефремов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2018. – № 3. – С. 37 – 50.
6. Новый справочник химика и технолога. Основные свойства неорганических, органических и элементоорганических соединений. – СПб. : Мир и Семья, 2002. – 1280 с.
7. Мандрусов, А. А. Минимизация несоответствия красок при флексографской печати путем получения пленок полиэтилена с заданными свойствами : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / А. А. Мандрусов. – М., 2007. – 235 с.
8. Колесниченко, М. Г. Повышение качества упаковки из пленок полиэтилена с прогнозируемыми свойствами : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / М. Г. Колесниченко. – М., 2010. – 142 с.
9. Ананьев, В. В. Установка для исследования процесса получения рукавных полимерных пленок / В. В. Ананьев, Н. Ф. Ефремов, А. А. Мандрусов // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2007. – № 1. – С. 16 – 25.
10. ГОСТ Р 55134–2012. Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). – Введ. 2014–01–01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 24 с.
11. NETZSCH PeakSeparation [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/> свободный (дата обращения: 14.11.2018).
12. Росато, Д. В. Раздувное формование / Д. В. Росато, А. Росато, Д. ДиМаттиа ; пер. с англ. под ред. О. Ю. Сабса. – СПб. : Профессия, 2008. – 649 с.
13. Панов, Ю. Т. Современные методы переработки полимерных материалов. Экструзия. Литье под давлением / Ю. Т. Панов, Л. А. Чижова, Е. В. Ермолаева. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2013. – 128 с.
14. Kaisersberger, E. DSK on Polymeric Materials / E. Kaisersberger, H. Möhler // NETZSCH Annual for Science and Industry. – 1991. – Vol. 1. – 93 p.
15. Жирнов, А. Е. Структура полимеров / А. Е. Жирнов, М. С. Аржаков. – М. : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2013. – 41 с.
16. Рекристаллизация полиэтилена низкой плотности как способ записи информации на многослойных пленках / И. В. Нагорнова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2015. – № 5. – С. 37 – 46.
17. Влияние структурных параметров полиэтилена на его электретные свойства / М. Ф. Галиханов [и др.] // Пластические массы. – 2017. – № 1-2. – С. 14 – 17.
18. Шарафутдинов, Г. З. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. Пособие по механическому практикуму / Г. З. Шарафутдинов, Е. Д. Мартынова. – М. : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011. – 27 с.
19. Поляризационно-оптические методы исследования / И. Е. Скалецкая [и др.]. – СПб. : Университет ИТМО, 2015. – 142 с.

20. Разумовский, И. А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела : учеб. пособие / И. А. Разумовский. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 235 с.

21. Миндлин, Р. Изучение напряжений методом фотоупругости / Р. Миндлин // Успехи физических наук. – 1940. – Т. 23, вып. 1. – С. 16 – 66.

---

## **Anisotropy Properties of High-Density Polyethylene Sleeve Films during Physical Modification in an Extrusion Machine**

**N. F. Efremov, O. A. Budnikova, A. V. Kanaicheva, M. A. Ivanova**

*Department of Technologies and Quality Management in Printing and Packaging Industries, nf.efremov@mail.ru, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia*

**Keywords:** amorphous and crystalline formations; strength anisotropy; isochromes; HDPE film; longitudinal drawing; technological anisotropy; physical modification.

**Abstract:** Studies of the properties of HDPE sleeve films showed that during physical modification in an extrusion installation by large longitudinal stretching of the melt  $K_g = 7.2\text{--}12.4$ , technological anisotropy of  $K_{at}$  occurs in the range of 2.77–3.65, directly proportional to the magnitude of the multiplicity of the longitudinal drawing  $K_g$ . This technological anisotropy is 1.8 times higher than the anisotropy of the strength of  $K_{ас}$  films, which is also directly proportional to  $K_g$  and is associated with the orientation of amorphous structures in the conical part of the sleeve and changes in the ratio of the detected three forms of crystalline formations with different melting points. Under uniaxial tension in the studied films in polarized light, the appearance of isochrom is observed in the following sequence: yellow, orange, red, violet, blue, blue, green. The appearance of isochrom is explained by the orientation of small crystals.

### *References*

1. Uayt Dzh.L., Choy D.D. *Polietilen, polipropilen i drugiye poliolefiny* [Polyethylene, polypropylene and other polyolefins], St. Petersburg: Professiya, 2006, 250 p. (In Russ.)

2. Yefremov N.F. *Tara i yeye proizvodstvo. Ch. 1. Proizvodstvo tary iz polimernykh plenok i listov* [Tara and its production. Part 1. Production of containers from polymeric films and sheets], Moscow: MGUP, 2009, 341 p. (In Russ.)

3. Lebedeva T.M. *Ekstruziya polimernykh plenok i listov* [Extrusion of polymer films and sheets], St. Petersburg: Professiya, 2009, 216 p. (In Russ.)

4. Yefremov N.F., Utekhin A.N., Kanaicheva A.V. [Influence of extrusion installation modes in the zone of sleeve inflation on the physical modification of LDPE films], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela* [Proceedings of higher educational institutions. Problems of printing and publishing], 2018, no. 2, pp. 21-36. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Yefremov N.F., Utekhin A.N., Kanaicheva A.V., Syursina P.P. [Extrusion installation: the effect of the height of the crystallization line on the physical modification of the sleeve films of high pressure polyethylene], *Izvestiya vysshikh*

*uchebnykh zavedeniy. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela* [Proceedings of higher educational institutions. Problems of printing and publishing], 2018, no. 3, pp. 37-50. (In Russ., abstract in Eng.)

6. *Novyy spravochnik khimika i tekhnologa. Osnovnyye svoystva neorganicheskikh, organicheskikh i elementoorganicheskikh soyedineniy* [New reference chemist and technologist. The main properties of inorganic, organic and organoelement compounds], St. Petersburg: Mir i Sem'ya, 2002, 1280 p. (In Russ.)

7. Mandrusov A.A., *PhD Dissertation (Technical)*, Moscow, 2007, 235 p. (In Russ.)

8. Kolesnichenko M.G. *PhD Dissertation (Technical)*, Moscow, 2010, 142 p. (In Russ.)

9. Anan'yev V.V., Yefremov N.F., Mandrusov A.A. [Installation for the study of the process of producing sleeve polymer films], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela* [Proceedings of higher educational institutions. Problems of printing and publishing], 2007, no. 1, pp. 16-25. (In Russ.)

10. *GOST R 55134-2012. Plastmassy. Differentsial'naya skaniruyushchaya ka-lorimetriya (DSK)* [GOST R 55134-2012. Plastics. Differential Scanning Calorimetry (DSC)], Moscow: Standartinform, 2014, 24 p. (In Russ.)

11. <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/> svobodnyy (accessed 14 November 2018).

12. Rosato D.V., Rosato A., DiMattia D. *Razduvnoye formovaniye* [Inflatable molding], St. Petersburg: Professiya, 2008, 649 p. (In Russ.)

13. Panov Yu.T., Chizhova L.A., Yermolayeva Ye.V. *Sovremennyye metody pererabotki polimernykh materialov. Ekstruziya. Lit'ye pod davleniyem* [Modern methods of processing polymer materials. Extrusion. Injection molding], Vladimir: Izdatel'stvo VIGU, 2013, 128 p. (In Russ.)

14. Kaisersberger E., Möhler H. DSK on Polymeric Materials, *NETZSCH Annual for Science and Industry*, 1991, vol. 1, 93 p.

15. Zhirnov A.Ye., Arzhakov M.S. *Struktura polimerov* [The structure of polymers], Moscow: MGU im. M. V. Lomonosova, 2013, 41 p. (In Russ.)

16. Nagornova I.V., Bablyuk Ye.B., Utekhin A.N., Kondratov V.P. [Recrystallization of low density polyethylene as a way of recording information on multilayer films], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela* [Proceedings of higher educational institutions. Problems of polygraphy and publishing], 2015, no. 5, pp. 37-46. (In Russ., abstract in Eng.)

17. Galikhanov M.F., Deberdeyev T.R., Karimov I.A., Kuznetsova N.V., Petrov V.A. [Influence of structural parameters of polyethylene on its electret properties], *Plasticheskiye massy* [Plastics], 2017, no. 1-2, pp. 14-17. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Sharafutdinov G.Z., Martynova Ye.D. *Polyarizatsionno-opticheskiy metod issledovaniya napryazheniy. Posobiye po mekhanicheskomu praktikumu* [Polarization-optical method for studying stresses. A manual on a mechanical workshop], Moscow: MGU im. M. V. Lomonosova, 2011, 27 p. (In Russ.)

19. Skaletskaya I.Ye., Skaletskiy Ye.K., Prokopenko V.T., Nikushchenko Ye.M. *Polyarizatsionno-opticheskiye metody issledovaniya* [Polarization-optical research methods], St. Petersburg: Universitet ITMO, 2015, 142 p. (In Russ.)

20. Razumovskiy I. A. *Interferentsionno-opticheskiye metody mekhaniki deformiruyemogo tverdogo tela: uchebnoye posobiye* [Optical interference methods of mechanicsdeformable solid: a training manual], Moscow: Izdatel'stvo MGU im. N. E. Baumana, 2007, 235 p. (In Russ.)

21. Mindlin R. [The study of stresses by photoelasticity], *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], 1940, vol. 23, issue 1, pp. 16-66. (In Russ.)

## **Anisotropie der Eigenschaften von HPPE-Schlauchfolien bei physischer Modifikation in der Extrusionsanlage**

**Zusammenfassung:** Untersuchungen der Eigenschaften von HPPE-Schlauchfolien haben gezeigt, dass bei der physischen Modifikation in einer Extrusionsanlage durch große Vielfache der Längsstreckung der Schmelze  $K_g = 7,2-12,4$  direkt eine technologische Anisotropie von  $K_{at}$  im Bereich von  $2,77-3,65$  auftritt, proportional zur Größe des Vielfachen der Längszeichnung  $K_g$ . Diese technologische Anisotropie ist 1,8-mal höher als die Anisotropie der Festigkeit von  $K_{a\sigma}$ -Folien, die ebenfalls direkt proportional zu  $K_g$  ist und mit der Orientierung amorpher Strukturen im konischen Teil des Schlauchs und Änderungen des Verhältnisses der nachgewiesenen drei Formen kristalliner Formationen mit unterschiedlichen Schmelzpunkten zusammenhängt. Unter einachsiger Dehnung wird in den untersuchten Filmen bei polarisiertem Licht das Auftreten von Isochrom in der folgenden Reihenfolge beobachtet: gelb, orange, rot, violett, blau, hellblau, grün. Das Auftreten von Isochrom ist durch die Orientierung kleiner Kristalle zu erklären.

---

## **Anisotropie des proprietés des films à manchon HDPE lors de la modification physique dans une installation d'extrusion**

**Résumé:** Les études des propriétés des films à manchon HDPE ont montré que lors d'une modification physique dans une installation d'extrusion par de grandes coupures de l'étrirage longitudinal de la masse fondue  $K_g = 7,2-12,4$ , une anisotropie technologique de  $K_{at}$  se produit dans la gamme de  $2,77-3,65$ , directement proportionnelle à la multiplicité de l'étrirage longitudinal  $K_g$ . Cette anisotropie technologique est de 1,8 fois supérieure à l'anisotropie de la résistance des films  $K_{a\sigma}$ , qui est également directement proportionnelle au  $K_g$  et est liée à l'orientation des structures amorphes dans la partie conique du manchon et aux changements dans le rapport des trois formes de formations cristallines détectées à différents points de fusion. Avec l'étirement uniaxial dans les films étudiés en lumière polarisée, il y a l'apparition d'isochromes dans la séquence suivante: jaune, orange, rouge, violet, bleu, bleu clair, vert. L'apparition d'isochrome s'explique par l'orientation des petits cristaux.

---

**Авторы:** *Ефремов Николай Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и управление качеством в полиграфическом и упаковочном производстве»; *Будникова Ольга Александровна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и управление качеством в полиграфическом и упаковочном производстве»; *Канаичева Анна Васильевна* – аспирант кафедры «Технологии и управление качеством в полиграфическом и упаковочном производстве»; *Иванова Марина Александровна* – студент, ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия.

**Рецензент:** *Беляев Павел Серафимович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.