

Пленочные фторполимеры

Через 70 лет после открытия политетрафторэтилена (PTFE) фторполимеры прочно закрепились в самых разных областях применения, как чрезвычайно полезные материалы технического назначения. Наряду с собственно PTFE, который не представляется возможным перерабатывать с применением многих традиционных полимерных технологий, свое место в повседневной жизни занял целый ряд более удобных для переработки и использования фторполимеров. В производстве пленок, в частности, особенно ценятся такие их свойства, как очень высокая прочность на раздир и химстойкость. Самыми известными для многих потребителей являются фторполимерные пленки наружного применения. В этих областях они успешно закрепились во многом благодаря своей малой чувствительности к механическим повреждениям и способности самоочищаться. Еще одним важным их преимуществом по сравнению с минеральным стеклом является значительно меньшая масса, что позволяет выполнять несущие конструкции более изящными, а иногда вообще является единственным условием, определяющим возможность их изготовления. Далеко не последнюю роль эти устойчивые к воздействию светопогоды пленки играют при реализации особенно смелых архитектурных решений, к которым предъявляются высокие требования с эстетической точки зрения. Проблему накопления тепла под прозрачными крышами из фторполимеров удалось с течением времени решить за счет применения новых многослойных оптических пленок.

С. Цеентмайер, Dyneon GmbH, 3M Advanced Materials Division (г. Бургкирхен, Германия)

Введение.

1. Свойства пленочных фторполимеров.
2. Технологии производства фторполимерных пленок.
3. Области и критерии применения фторполимерных пленок.
4. Управление солнечной тепловой энергией с помощью фторполимерных пленок.

Введение

Все фторполимеры можно разделить на три группы:

- термопластичные фторполимеры (FTR);
- фторэластомеры (FE);
- политетрафторэтилен (PTFE).

Особое положение PTFE обусловлено его ярко выраженным низким индексом текучести расплава (MFI). Этот полимер, как известно, не плавится и при температурах выше примерно 330 °С он лишь превращается в прозрачный нетекучий гель. По этой причине для его переработки приходится применять специальные технологии, например изостатическое прессование или экструзию пастообразного PTFE.

Термопластичные фторполимеры (далее фторопласты. – Прим. ред.), напротив, несмотря на высокие температуры плавления,

характеризуются значениями MFI в пределах от 1 до 40 г/10 мин, что делает их вполне пригодными для переработки с применением технологий, используемых и для других термопластичных материалов [1]. Не надо также забывать и о том, что эти полимеры как раз и были разработаны для того, чтобы привести их выдающиеся свойства в соответствие с требованиями технологий экструзии, литья под давлением и др. В результате получилось, что эти фторполимеры в наилучшей степени оказались пригодными для производства пленок. Наряду с этим с помощью соответствующих технологий переработки из PTFE можно изготавливать и ткани (фото 1).



Фото 1. Парус для защиты от солнца в кафе Mozart (Вена) изготовлен из просвечивающей, устойчивой к пожелтению PTFE-ткани

1. Свойства пленочных фторполимеров

1.1. Объекты анализа

В пленочном производстве применяются главным образом следующие виды фторопластов: ETFE, FEP, PFA, PVF, PVDF и THV (расшифровку этих международных обозначений фторопластов см. во вставке в статью. – Прим. ред.). В табл. 1 приведены показатели некоторых основных физико-механических свойств фторопластов в сравнении с представителями «стандартных» крупнотоннажных термопластов – полипропиленом (PP), полиэтиленом высокой плотности (HDPE) и поливинилхлоридом (PVC).

ETFE является частично фторированным сополимером, который для придания ему требуемых свойств иногда модифицируется с применением третьего мономера, что позволяет варьировать его температуру плавления от 220 до 280 °С. ETFE обладает очень высокой светопропускаемостью (коэффициент светопропускания превышает 90 %) и при необходимости может окрашиваться пигментами. Благодаря своей высокой химстойкости, ETFE устойчив к воздействию многих агрес-

Справка

В таблице приведены принятые международные сокращения названий фторопластов, упомянутых в данной статье, их расшифровка на русском языке и марки отечественных аналогов.

Редакция журнала

Международные сокращенные обозначения фторопластов, их полные названия на русском языке и марки российских аналогов

Международное обозначение	Русскоязычное название (аналог)
ETFE*	Сополимер этилена и тетрафторэтилена (Ф-40)
FEP*	Сополимер тетрафторэтилена и гексафторпропилена (Ф-4МБ)
PFA*	Сополимер тетрафторэтилена с перфторалкилперфторвиниловым эфиром (Ф-50)
PVF	Поливинилфторид
PVDF*	Поливинилиденфторид (гомополимер), сополимер винилиденфторида с трифторхлорэтиленом и др. (Ф-2М)
THV*	Тройной сополимер тетрафторэтилена, гексафторпропилена и винилиденфторида (Ф-246)

* Источник: Барвинский И. А., Барвинская И. Е. Справочник по литьевым термопластичным материалам. [электронный ресурс] URL: http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials_1_fluoropolymers.htm (дата обращения: 07.05.2018)

сивных сред, причем не только чистящих химических веществ, но и птичьего помета, а также кислотного дождя.

FEP является сравнительно «мягким», химически инертным и так же, как и PTFE, характеризуется хорошими антифрикционными свойствами. Главная область применения FEP – это производство изоляционных оболочек проволоки и кабелей. Кроме того, из него изготавливают пленки и клейкие ленты. Он также обладает отличной светопрозрачностью по отношению к УФ-излучению и видимому свету. Показатель преломления FEP ниже, чем у всех других фторопластов и близок по значению к соответствующему показателю воды.

PFA по своим физическим и химическим свойствам очень близок к трудноперерабатываемому PTFE, но в то же время вполне пригоден для переработки методами литья под давлением и экс-

трузии. PFA может на протяжении длительного времени выдерживать воздействие температур порядка 260 °С, что является наиболее высоким показателем в группе рассматриваемых в данной работе фторопластов. Благодаря своей более высокой температуре длительной эксплуатации, PFA может быть использован в качестве альтернативы FEP, особенно в тех случаях, когда изделия из него подвергаются воздействию высоких температур на протяжении всего срока службы.

PVDF как в виде мономера, так и в виде сополимера с гексафторпропиленом или хлортрифторэтиленом благодаря низкой температуре плавления (в зависимости от химического состава – от 135 до 175 °С) можно перерабатывать при более низких температурах, чем другие фторопласты. В то же время эти полимеры характеризуются высокой механической прочностью и стабильностью раз-

меров, хорошей химстойкостью и низкой проницаемостью. По этой причине PVDF среди прочего находит применение при улучшении качества поверхностей (например, при отделке поверхностей PVC-пленок) и при изготовлении антиграффити-пленок.

THV также можно перерабатывать при низких температурах. Он характеризуется отличной гибкостью и прозрачностью. THV может присоединяться к эластомерам и полиолефинам. По этим причинам он часто используется при производстве многослойных пленок, состоящих из комбинаций вышеуказанных материалов. Устойчивые к воздействию УФ-излучения пленки из материала марки Dyneon THV вполне пригодны также для соединения слоев тканых ламинатов.

В дальнейшем эти фторопласты были проанализированы на предмет возможностей практического применения изготовленных из них пленок в архитектуре и для наружных работ.

1.2. Общая характеристика

Как видно из табл. 1, члены семейства фторопластов превосходят «традиционные» пленочные материалы прежде всего по максимальной температуре длительной эксплуатации и лучшей пожаробезопасности. Особенно важно, что при этом их свойства перекрывают весь диапазон температур, которые должны выдерживать полимерные материалы для наружного применения. Речь идет в первую очередь о регионах, где не являются редкостью мощное солнечное излучение и высокие температуры. При температурах, приближающихся к нижней границе допустимого диапазона, некоторые фторопласты все еще со-

Таблица 1. Показатели некоторых физико-механических свойств ряда термопластичных полимеров (источник: Dyneon GmbH)

Показатель (стандарт испытаний)	PVDF	PVDF flex	ETFE	PTFE	PP	HDPE	PVC
Плотность (DIN 53497), г/см ³	1,78	1,78	1,7–1,76	2,12	0,90–0,92	0,95	1,42
Прочность при растяжении (DIN 53455), Н/мм ²	30–50	28–41	40–46	20–40	33	24–29	45–55
Удлинение при разрыве (DIN 53455), %	20–60	300–400	200	140–500	20–800	100–1000	20–30
Верхняя температура длительной эксплуатации, °С	150	120	155	260	100	85	60
Нижняя температура длительной эксплуатации, °С	–40	–30	–190	–200	–15	–50	–15
Температура плавления (DIN 53736), °С	172–178	155–160	270	330*	165	130	160
Класс горючести (UL 94)	V-0	V-0	V-0	V-0	HB/V-2	V-2	V-0

* Условная.

Таблица 2. Показатели свойств пленок из фторопластов (источник табл. 1–3: DuPont GmbH)

Показатель	ETFE	FEP	PFA	PVF	PVDF	THV
Толщина, мкм	12–300	12–500	12–750	12–50	12–500	12–250
Ширина, м	< 2	< 2	< 1,5	–	< 2	< 2
Прочность при растяжении, МПа	40–55	25–30	15–25	30–40	35–50	25–30
Удлинение при разрыве, %	300–500	300–350	300–400	100–200	20–200	300–500
Модуль упругости при растяжении, МПа	900–1100	500–600	500–600	–	2200–2500	200–300
Температура длительной эксплуатации, °С	150	205	250	105	130	130
Химическая стойкость*	++	+++	+++	+	+	+

* «+++» – высокая, «++» – хорошая, «+» – удовлетворительная.

храняют эластичность, в то время как прочие полимеры уже становятся хрупкими.

В отличие от полиолефинов и PVC фторопласты PTFE, PFA и FEP характеризуются еще и высокой устойчивостью к воздействию кислот, щелочей и органических растворителей. В этой группе фторопластов ETFE является условно устойчивым к кетонам, аминам и фуранам; при выборе PVDF и THV следует больше внимания уделять химической природе контактирующих с ними веществ. Но и эти фторопласты обладают достаточно высокой устойчивостью к неорганическим и органическим кислотам, спиртам, алифатическим и органическим углеводородам.

1.3. Свойства, важные для применения в производстве пленок

1.3.1. Механические свойства

Для применения фторопластов в производстве пленок особенно важное значение имеет высокая прочность на раздир (рис. 1). Наиболее высокие значения этого показателя характерны для ETFE.

Именно это и делает ETFE наиболее предпочтительным материалом для производства пленок различного назначения, и прежде всего тех, к которым предъявляются особые требования в отношении механической прочности. Прочность на раздир THV-пленки находится примерно на таком же уровне, как и у ВОРЕТ (биаксиально ориентированного полиэтилентерефталата). Другие фторопласты характеризуются близкими к ним по величине значениями этого показателя.

Специфические свойства исходных фторопластов отражаются и на свойствах изготавливаемых из них пленок. В табл. 2 приведены некоторые основные свойства наиболее распространенных на рынке пленок из фторопластов. Свойства исходных полимеров, само собой разумеется, не переходят один к одному в свойства пленок. По данным табл. 3 на примере PTFE можно судить, в частности, о том, какое влияние оказывают особенности применяемой технологии на свойства производимых пленок. Бросается в глаза то, что ширина и толщина пленок варьируют-

ся в широких пределах, в то время как температуры длительной эксплуатации и показатели химстойкости изменяются в незначительной степени, как внутренне присутствующие исходным полимерам свойства. Известным колебаниям в зависимости от выбранной технологии производства пленок подвержены также их прочность при растяжении и удлинение при разрыве. Эти факты следует обязательно учитывать при выборе вида пленочного фторопласта.

Многие фторопласты и изготовленные из них пленки способны сохранять при испытаниях на растяжение характерные для них свойства в широком диапазоне варьирования температур. Прочность при растяжении ETFE, FEP и PFA при повышении температуры с 20 до 200 °С практически не снижается; почти неизменным остается в этом же температурном диапазоне также удлинение при разрыве пленок толщиной около 200 мкм, изготовленных из PFA и FEP, а в случае применения ETFE оно даже заметно увеличивается при повышении температуры от –20 до +140 °С.

1.3.2. Способность самоочищаться

Также хорошо проявляют себя пленки из фторопластов с точки зрения свойств, которые прочно ассоциируются с этими материалами даже за пределами мира профессионалов: речь идет об их способности самоочищаться или об антиадгезионных грязеотталкивающих свойствах. Поверхностное натяжение ряда полимерных материалов снижается в такой последовательности: ПА (полиамид), ПЕТ (полиэтилентерефталат), РЕЕК (полиэфирэфирке-

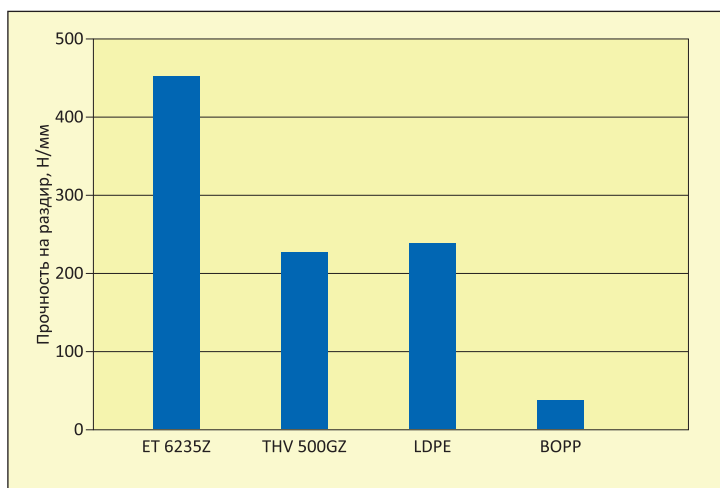


Рис. 1. Прочность на раздир пленки на основе ETFE (DuPont ET 6235Z) в сравнении с пленками других видов (согласно DIN 5336)

Таблица 3. Показатели свойств пленок из PTFE, изготовленных разными методами (источник: Dupeon GmbH)

Показатель	Метод (условное обозначение)			
	Отслаивание от монолита (S-PTFE)	Экструзия со спеканием (E-PTFE)	Экструзия без спекания (E-PTFE)	Экструзия поливом дисперсии (E-PTFE)
Толщина, мкм	12–300	50–250	50–250	12–125
Ширина, м	< 1,5	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Прочность при растяжении, МПа	20–30	40–50	5–12	25–30
Удлинение при разрыве, %	200–300	150–300	50–100	400–500
Модуль упругости при растяжении, МПа	600–650	600–650	600–650	600–650
Температура длительного пользования, °C	260	260	260	260
Химстойкость*	+++	+++	+++	+++

* «+++» – высокая, «++» – хорошая, «+» – удовлетворительная.



Фото 2. Внутренний двор Центра Уильяма Раппарда – главного здания Всемирной торговой организации в Женеве – имеет покрытие из ETFE-пленки Nowoflon ET 6235Z. Под этой самоочищающейся прозрачной конструкцией могут даже успешно расти растения (источник: WTO)

тон), PE (полиэтилен), PVDF, ETFE, PTFE. Это означает, что, например, дождевая вода стекает с поверхности изделий из фторопластов каплями и смывает находящиеся на этой поверхности в свободном состоянии частицы загрязнений (фото 2). Этот эффект хорошо коррелирует с величиной краевого угла смачивания θ , который полярные жидкости, например вода, образуют с поверхностью изделий из фторопласта; начиная со значения θ , равного примерно 90°, материалы проявляют себя как гидрофобные. Вода образует с PTFE краевой угол, значительно превышающий 100°; впрочем, с увеличением количества связей C–H в полимере его величина несколько уменьшается по причине повышающейся полярности полимера [2].

1.3.3. Тепло- и атмосферостойкость

Федеральное ведомство по энергии Швейцарии на основе результатов длительных испытаний установило, что коэффициент светопропускания как для видимого света, так и для УФ-излучения пленок из FEP и PVF после 20-летнего воздействия атмосферного воздуха и чистки этанолом не только не ухудшается, но даже несколько улучшается по сравнению с исходными материалами. Следовательно, ухудшение прозрачности вследствие деструкции материалов можно исключить. Одновременно проводившиеся испытания образцов из поликарбоната (PC), PET, PVC и ненасыщенных сложных полиэфиров позволили, напротив, выявить существенные негативные эффекты, обусловленные деструкцией материалов, а именно: изменение цвета, пожелтение, поражение плесенью, охрупчивание и т. п. [3].

В ходе длительных испытаний нашла свое подтверждение и высокая устойчивость фторопластов к механическим воздействиям: ни одна из фторполимерных пленок толщиной от 25 до 120 мкм, подвергнутых испытаниям в двух различных регионах Швейцарии, не претерпела за 20 лет воздействия атмосферного воздуха существенных повреждений.

Даже при еще более суровых условиях фторопласты сохраняют на протяжении продолжительного времени свои свойства. В ходе проведенного компанией Dupeon испытания ETFE на старение после 10 тыс. ч воздействия УФ-излучения (тест Xenontest 150) не было выявлено признаков опти-

ческого повреждения полимера; показатели механических свойств испытуемых образцов снизились при этом менее чем на 10 %. Аналогичные результаты были получены после 7-, 10- и 20-летнего воздействия атмосферного воздуха на фторполимерные материалы в г. Бомбее, штате Аризона (США) и в Южной Германии. Так, в частности, эксперты утверждают, что крыши из ETFE характеризуются вдвое более продолжительным сроком службы, чем аналогичные конструкции из PVC.

Более подробно старение, сопротивление атмосферным воздействиям и изменение механических свойств фторопластов в зависимости от температуры описаны в работе [4].

2. Технологии производства фторполимерных пленок

В настоящее время пленки из фторопластов производятся главным образом экструзией – раздувным или плоскощелевым методом. В придании пленкам требуемых свойств важную роль играет правильное охлаждение. Особое внимание отводится охлаждающим валам [5]. Толщина пленок при плоскощелевом методе производства варьируется в пределах от 10 до 300 мкм и лишь в особых случаях может достигать 500 мкм. По раздувной технологии производятся пленки шириной до 2 м и толщиной до 150 мкм. Однако эта технология в отличие от плоскощелевой имеет ряд недостатков. Во-первых, достаточно высокие цены на исходное сырье и сравнительно невысокая достигаемая производительность экструзии не со-

ответствуют имеющим, как правило, высокую производительность экструзионно-раздувным установкам. Во-вторых, едва ли можно считать, что более низкое, как правило, качество изготавливаемых рукавных пленок в полной мере отвечает задачам использования столь высококачественных материалов, как фторполимеры. К этому следует добавить, что фторопласты по причине своей высокой плотности, существенно отличающей их, например, от значительно более легкого полиэтилена, не являются идеальным материалом для переработки в пленки путем раздувной экструзии. Существует большая опасность оседания пленочного рукава под воздействием его собственного веса. Уже при толщине порядка 100 мкм поверхностная плотность пленок из THV или ETFE составляет соответственно 200 и 175 г/м². По этой причине плоскощелевая экструзия является более предпочтительной технологией производства пленок из фторопластов.

При необходимости изготовления пленок из PTFE, напротив, следует обратить внимание на другие технологии. При переработке гранулированного PTFE (S-PTFE, суспензионного PTFE) материал под давлением от 150 до 300 бар нагнетается в форму и спекается при температуре около 370 °С [6]. Изготовленные таким образом заготовки характеризуются гомогенной структурой. Подобные блоки могут применяться для производства пленок самой разной толщины по технологии отслаивания (Schaelverfahren). Используемые для этой цели производственные установки напоминают по своему виду токарные станки.

Полученный с применением эмульсионной технологии PTFE (E-PTFE) представляет собой мелкодисперсный порошок и может перерабатываться в пленки с применением технологии экструзии пасты и каландрования. Для этого порошок смешивается со вспомогательным материалом и спрессовывается под давлением до 10 бар с получением «зеленой» заготовки цилиндрической формы. На следующем этапе технологического процесса эта заготовка подвергается

выдавливанию с помощью формообразующего сопла с постепенным приданием ей требуемой формы. После этого экструдат двумя валами каландруется вплоть до образования пленки. В зависимости от требуемой толщины пленки материал может пропускаться через установку несколько раз. Вслед за этим осуществляется сушка при температуре от 160 до 200 °С до полного испарения вспомогательных веществ; иногда может потребоваться дополнительное спекание пленки. Для придания необходимых свойств пленка может быть также подвергнута вытяжке.

Значительно реже для производства PTFE-пленок используется водная дисперсия этого полимера. Поверхность, на которую наносится покрытие, либо погружается в эту дисперсию, либо опылается ею, а затем высушивается. В этом случае также может быть предусмотрена дополнительная стадия спекания. Такая технология применима и для производства многослойных пленок. Ее недостатком является относительно низкая экономическая эффективность [7, 8].

3. Области и критерии применения фторполимерных пленок

Пленки из фторопластов находят широкое применение в отдельных областях промышленности. Сферы их применения простираются от разделительных, антиадгезионных пленок (например, для электроники и электрооборудования) до клейких лент, фармацевтической упаковки, архитектуры и технологий, связанных с использованием энергии солнца. В данной статье основное внимание уделено возможностям наружного применения.

3.1. Фотогальваника

Фторполимерные пленки могут способствовать повышению эффективности, надежности и экономичности фотогальванических установок, использующих энергию солнца. Коэффициент пропускания солнечного света тонкими пленками из фторированных полимеров может превышать

0,9, что даже выше, чем у не содержащего железа стекла [3]. Высокая светопрозрачность сочетается с высокой устойчивостью к УФ-излучению, влаге и атмосферным воздействиям, т. е. к тем факторам, которые резко снижают сроки службы компонентов традиционных солнечных модулей.

Благодаря этому даже тонкие пленки из ETFE, например Ultra Barrier Solarfilm 9L компании 3М, имеет смысл использовать вместо защитного остекления элементов солнечных батарей. Зачастую фторопластовые пленки применяются в гелиосистемах в форме компонентов многослойных пленочных конструкций. В качестве примера можно привести так называемые Backsheet-пленки (отражающие подложки фотоэлементов), в которых поверхностный слой из THV комбинируется с устойчивым к электрическому пробое промежуточным слоем из PET и адгезионным слоем из этиленвинилацетата (EVA), обеспечивающим плотное соединение пленки с поверхностью солнечного модуля. Такая конструкция в дополнение ко всему обладает отличными электроизоляционными свойствами (напряжение разряда для постоянного тока превышает 1100 В). Важной технической задачей при изготовлении подобных пленок является, само собой разумеется, обеспечение прочного соединения между фторполимерным компонентом и другими слоями. Компания 3М решила эту задачу и уже с 2006 г. поставляет на рынок под общим названием Scotchshield различные пленки, содержащие слои из THV толщиной от 61 до 74 мкм. Они соответствуют требованиям норм UL 1703, а также стандартов IEC 61215 (вторая редакция) и IEC 61730 и в настоящее время применяются производителями многих видов модулей по всему миру.

В отличие от стеклянных покрытий фторполимерные пленки привлекают к себе внимание прежде всего малой массой, что облегчает монтаж (в том числе за счет отказа от массивных несущих конструкций) и способствует снижению логистических расходов. Кроме того, благодаря высокой гибко-

сти они значительно более «терпимы» к возможным ошибкам, возникающим в процессе монтажа. В общем и целом такие пленки позволяют существенно сократить расходы на солнечные модули и в долгосрочной перспективе оправдывать инвестиции в подобное оборудование.

3.2. Строительство и архитектура

Полимерные материалы впервые начали использовать в строительном секторе в 1940-х гг., т. е. они являются относительно молодыми для этой области применения. Среди пленочных материалов пленки из фторопластов открывают архитекторам совершенно новые возможности для самовыражения. Как правило, в этой области применяются пленки толщиной от 50 до 300 мкм, характеризующиеся сравнительно малой поверхностной плотностью. Высокая физическая плотность фторопластов компенсируется высокой прочностью, которой обладают даже тонкие пленки. Пленки из термопластичных фторполимеров обладают хорошей свариваемостью; к тому же они являются экологически безопасными и пригодными для рециклинга.

Фторопласты являются далеко не единственными полимерными материалами, используемыми в строительном секторе. В этой области часто можно встретить также поликарбонаты (PC), полиметилметакрилат (PMMA), стабилизированные полиолефины (используются с определенными ограничениями) и сложные полиэфирные. Тем не менее фторопласты не конкурируют напрямую с этими полимерными материалами. Это объясняется, с одной стороны, значительным превосходством фторопластов с точки зрения атмосферостойкости, а также широкими возможностями решения важных, прежде всего эстетических, вопросов на стадии разработки строительных проектов. Фторполимеры в основном используются в двух специальных областях – как покрывные материалы в сфере так называемой текстильной архитектуры, истоки которой возвращают нас к производству палаток и шатров (фото 3), а также как



Фото 3. Спортивные стадионы, например стадион для проведения чемпионата мира в г. Манаусе (Бразилия), являются распространенной сферой применения мембран с покрытием из PTFE (источник: M. Bredt)

прозрачные или просвечивающие, эстетически привлекательные пленочные конструкции из ETFE, например в форме элементов крыш и фасадов, состоящих из сегментированных воздушных подушек. В обоих случаях пленочные полотна должны быть натянуты и зафиксированы дополнительными элементами, например тросами (в палатках и шатрах) или металлическими рамами.

ETFE обладает рядом известных преимуществ по сравнению с минеральным стеклом, включая малую плотность и высокую ударную прочность, в том числе при воздействии града. Хотя используемое в архитектуре стекло и обладает высокой прочностью, но по причине своего значительно большего веса оно требует применения массивных поддерживающих конструкций. Таким образом, решение об использовании пленок из фторопластов или тканей с фторполимерным покрытием принимается застройщиком главным образом в зависимости от того, какую конструкцию он желает создать – прозрачную, стеклоподобную или традиционную шатровую.

Что понимается под конкретными проектами, можно проиллюстрировать на следующем примере. Если нужно по возможности экономично построить плавательный бассейн, то свой выбор можно остановить на недорогой железной крыше. Если же, напротив, бассейн должен привлекать платежеспособных посетителей, как, например, в парке развлечений, то более целесообразной оказывается амбициозная архитектура с прозрачными элементами

или непрозрачной шатровой крышей (фото 4). Если будет принято решение в пользу прозрачных элементов, то сразу же встает очередной вопрос о том, какие материалы следует использовать для реализации проекта, а именно: стекло, стеклоподобные панели (например, из PMMA) или эстетически более привлекательное футуристическое конструктивное оформление? В этом случае в игру вступают пленки из фторопластов.

Принципиальная возможность выбора «прозрачного» решения обычно требует дополнительного учета механических особенностей строительного объекта. Если необходимо перекрывать большие пролеты, как, например, на спортивном стадионе с широкими ярусами для зрителей, то более целесообразным может оказаться выбор непрозрачной ткани с фторполимерным покрытием (в частности, стеклоткани с покрытием из PTFE), позволяющей более удобно перекрывать большие площади. Такое техническое решение было использовано, между прочим, на берлинском олимпийском стадионе.

Все изложенное свидетельствует о том, что решения, основанные на использовании тканей и пленок, совсем не обязательно должны конкурировать между собой; они, скорее, дополняют друг друга.

Как следует из выводов, приведенных в разд. 1 статьи, наиболее распространенным фторопластом для применения в архитектуре является ETFE. FEP и PFA, хотя и обладают многочисленными положительными свойствами, но все-таки по общему комплексу свойств именно ETFE остается главным материаль-



Фото 4. Легкие конструкции крыш из ETFE-пленки позволяют сделать строительное сооружение особенно привлекательным и притягивающим гостей, как, например, показанный на фото плавательный бассейн Принавера в г. Прин-ам-Химзее (Германия)



Фото 5. Фасад верхней станции канатной дороги на лыжной горе Гайслахкогль (Австрия). ETFE-пленке (Nowoflon ET 6235Z) приходится противостоять здесь мощным ветрам, а также выдерживать низкие температуры и интенсивное воздействие ультрафиолетового излучения (источник: A. Niederstrasser)

лом для этой области применения. Решающим фактором для этого наряду с прозрачностью является прежде всего теплостойкость, т. е. способность сохранять стабильные механические свойства в обычных для практического использования диапазонах температур. При этом самыми важными показателями механических свойств считаются напряжение, соответствующее 10%-ному удлинению, и прочность на раздир.

THV-пленки в последнее время применяются в архитектуре главным образом в форме армированных тканями ламинатов. PVDF практически не может быть использован в архитектуре в форме пленки по причине недостаточной прозрачности. Тем не менее он применяется во внутренних архитектурных решениях, основанных на использовании тканей.

3.3. Примеры практического применения

Далее возможности эффективного применения фторопластовых пленок в архитектуре проиллюстрированы на трех конкретных примерах.

3.3.1. Верхняя станция канатной дороги на лыжной горе Гайслахкогль

В австрийских Альпах, на горе Гайслахкогль, на высоте около 3000 м над уровнем моря стоит самое высоко расположенное на сегодняшний день строительное сооружение мира, построенное с применением полимерной пленки. Речь идет о конечной станции гор-

ной канатной дороги (фото 5). Эта строительная конструкция должна не только противостоять мощным ветрам, но и выдерживать низкие температуры, изредка достигающие отметки -60°C . Пленка из материала 3M Dyneon ETFE отлично проявляет в этих условиях свою высокую прочность при растяжении, а также типичную для фторполимеров температуростойкость и устойчивость к воздействию УФ-излучения. Низкая поверхностная энергия не только обеспечивает уменьшение степени постепенного загрязнения пленки, но и предотвращает накопление снега на строительном сооружении.

3.3.2. Внутренний двор центрального корпуса Всемирной торговой организации в Женеве

Значительно меньшая масса, чем у стекла, послужила достаточно веским основанием для использования конструкции из ETFE-подушек в качестве покрытия стен внутреннего двора центрального корпуса Всемирной торговой организации в Женеве (см. фото 2). В общей сложности 105 элементов из наполненных воздухом ETFE-пленок Nowoflon ET 6235Z (производитель – компания Nowofol), изготовленных из материала 3M Dyneon ETFE, оказались примерно на 95 % легче, чем сопоставимая стеклянная система. Благодаря этому удалось упростить несущую конструкцию, что еще больше подчеркивает открытый легкий вид крыши. Крыша из пленочного ETFE обладает высокой проницаемостью для УФ-излучения, что допускает возможность свободного роста под ней растений и даже деревьев. Низкая склонность материала к накоплению загрязнений делает в основном излишними ручные работы по очистке крыши.

3.3.3. Проект Eden в Корнуолле

Одним из наиболее известных строительных сооружений, созда-



Фото 6. Биомы проекта Eden в Корнуолле (Великобритания) представляют собой конструкции, состоящие из подушек, изготовленных из ETFE. Пленки из ETFE-материала компании Dyneon пропускают 90 % видимого света и 80 % падающего на них УФ-излучения ближнего диапазона

ние которого без применения фторопластовых пленок едва ли стало бы возможным, является проект Eden в графстве Корнуолл на юго-западе Англии. Он представляет собой группу так называемых биомов (шарообразных структур, изготовленных из прозрачной ETFE-пленки), которые с течением времени превратились в настоящий туристический аттракцион (фото 6). Биомы состоят из сотен гекса- и пентагональных подушек, которые имеют оболочки из ETFE-пленки и поддерживаются легкой стальной конструкцией. Дизайн этого объекта имеет в своей основе геодезические купола американского архитектора *Ричарда Бакминстера Фуллера* (Richard Buckminster Fuller). Наряду с малой массой еще одно обстоятельство послужило в пользу выбора фторопласта в качестве основного материала: ETFE-подушки характеризуются также хорошими теплоизоляционными свойствами. Значения коэффициента теплопередачи многослойных конструкций из ETFE-подушек могут изменяться в пределах от 1,2 до 2 Вт/(м²·К). Благодаря этому под куполом создаются идеальные оранжерейные климатические условия.

4. Управление солнечной тепловой энергией с помощью фторполимерных пленок

Накапливание тепла под освещаемыми солнцем крышами, изготовленными с применением фторопластовых пленок, может стать проблемой для архитекторов. ETFE-пленки способны хорошо пропускать видимый свет и излучение с длиной волны, соответствующей ближней инфракрасной области спектра (NIR) (рис. 2). Это приводит к тому, что люди, находящиеся под прозрачной крышей, в полной мере ощущают на себе тепловое излучение солнца. Чтобы избежать этого, можно попытаться исключить или уменьшить прямое воздействие солнечного света, например, путем нанесения рисунков, окрашивания пленки (зачастую в белый цвет) или дополнительного использования создающих тень механических устройств, например ламелей, в результате

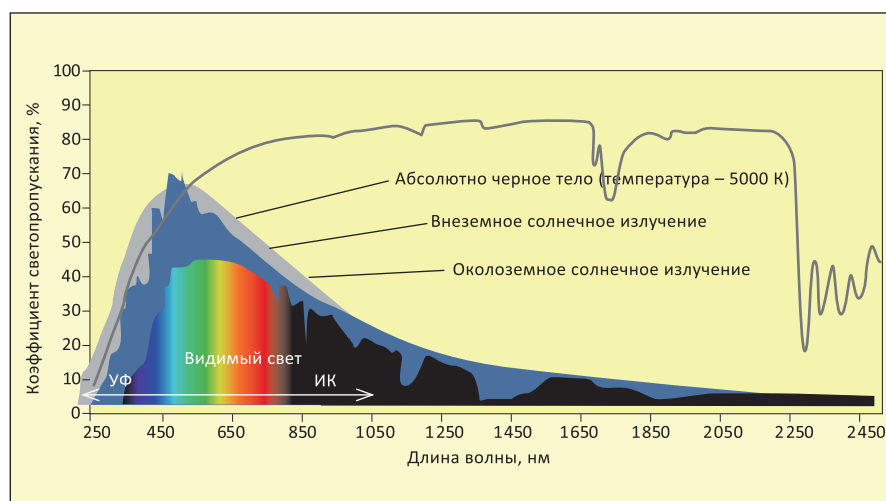


Рис. 2. Светопрозрачность ETFE-пленок для различных составляющих спектра солнечного света (УФ и ИК – соответственно ультрафиолетовая и инфракрасная части спектра оптического излучения)

чего естественная прозрачность ETFE-пленки снижается.

Значительно более инновационное техническое решение заключается в изменении физических свойств пленки. Речь идет о том, чтобы пленка пропускала только видимый свет и не пропускала характеризующийся высокой энергией свет, соответствующий инфракрасной части спектра. Практически этого можно добиться, например, за счет введения в состав пленки соответствующих (оптически проницаемых) пигментов, которые способны отражать свет с длиной волны, соответствующей NIR. Лучший и более гибкий выход открывают так называемые многослойные оптические пленки (Multilayer Optical Films, MOFs), которые были

описаны еще в конце 1960-х гг. и получили быстрое развитие, начиная с 1990 г. В таких пленках используется эффект отражения света на границе раздела фаз, имеющих разную оптическую плотность. Путем целенаправленного регулирования толщины слоев и показателя преломления можно оказывать влияние на длину волны отражаемого света. Изменение слоистой структуры позволяет создавать МОФ, которые в состоянии блокировать прохождение света с определенными ограниченными диапазонами длин волн. МОФ производятся в основном из полимерных материалов, которые обеспечивают самые широкие возможности для целенаправленного регулирования светоотражающих свойств этих пленок.

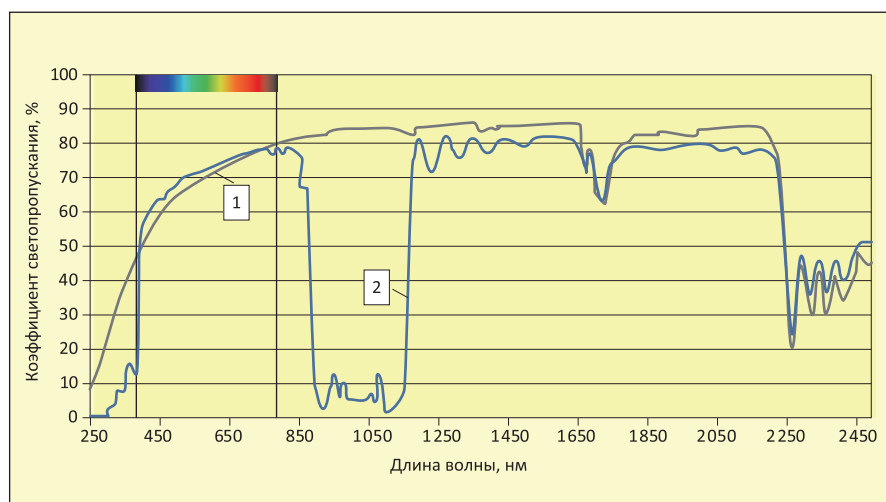


Рис. 3. Изготовленные с учетом эффекта преломления многослойные оптические пленки (МОФ) могут с высокой точностью отфильтровывать определенные части электромагнитного спектра с требуемыми диапазонами длин волн: 1 – два слоя фторопластовой пленки марки ET 6235Z толщиной 200 нм; 2 – два внешних слоя фторопластовой пленки марки ET 6235Z толщиной 200 нм и внутренний слой, не содержащий фторполимер

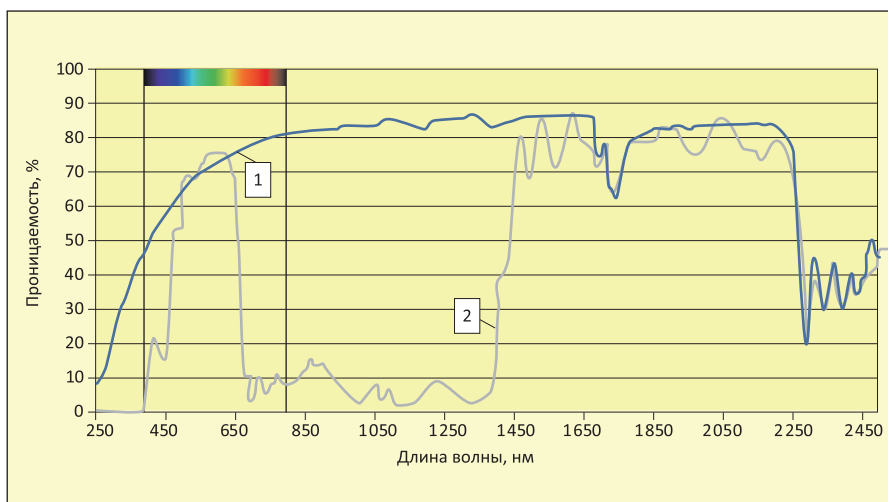


Рис. 4. Многослойные оптические пленки могут отражать ИК-излучение, сохраняя в полной мере свою проницаемость для видимого света. Благодаря этому под пленкой не происходит чрезмерного накопления тепла; за счет наличия двух поверхностных слоев из ETFE сохраняются также характерные для фторопластов высокие показатели устойчивости к атмосферным воздействиям и УФ-излучению: 1 – два слоя фторопластовой пленки марки ET 6235Z толщиной 200 нм; 2 – два внешних слоя фторопластовой пленки марки ET 6235Z толщиной 200 нм и внутренний слой, не содержащий фторполимер

нок. В качестве основных регулирующих факторов при разработке многослойных пленок с требуемыми свойствами выступают показатель преломления, количество и толщина слоев, а также вид исходного материала. Производимые в коммерческих масштабах МОФ могут состоять из многих сотен отдельных полимерных слоев. Результатом этого является особенно четко ограниченный диапазон варьирования длин волн отражаемого излучения. Процесс производства таких пленок выходит далеко за пределы представлений о традиционных технологиях соэкструзии. Так, например, можно производить МОФ, которые способны отражать часть лучей солнечного света с длинами волн в пределах от 870 до 1100 нм (рис. 3). Пленки еще одного вида блокируют даже более широкий диапазон длин волн – от 700 до 1300 нм, т. е. именно ту инфракрасную часть спектра солнечного излучения, которая приносит на поверхность Земли наибольшую долю ощущаемого тепла (рис. 4). Такие пленки могут быть интегрированы, в частности, в конструкции из ETFE-подушек.

Новые разработки в области пленок МОФ позволяют эффективно комбинировать преимущества фторопластов и технологий изготовления многослойных систем:

они не только предотвращают накопление избыточного тепла за счет отражения солнечного света с определенным диапазоном длин волн при полном сохранении своей проницаемости для видимой части спектра, но и в правильно выбранных комбинациях обеспечивают показатели прочности и надежности, присущие традиционным ETFE-пленкам. По устойчивости к атмосферным воздействиям пленки МОФ сопоставимы с обычными фторопластовыми пленками. Поскольку все эти виды продукции состоят исключительно из полимерных материалов и не содержат металлов, отпадают возможные проблемы с радиоволнами, которые отражаются теплозащитным остеклением с наносимым на него металлическим покрытием. Это означает, что многослойные пленки не создают препятствий для сигналов мобильных телефонов. Само собой разумеется, что непроницаемые для инфракрасного излучения пленки МОФ могут комбинироваться и с другими фторопластами, что позволяет еще больше расширить спектр их применения.

Литература

1. Zehentmaier S. Fluoropolymers in Film Applications // 27th Annual World Symposium on Performance Films. Duesseldorf. April. – 2012.

2. Lee S., Lee T. R., Park J.-S. The Wettability of Fluoropolymer Surfaces: Influence of Surface Dipoles // Langmuir. – 24 (2008). – P. 4817.

3. Ruesch F., Brunold S. Langzeitalterungsuntersuchung an Abdeckungsmaterialien fuer Thermische Sonnenkollektoren // Bundesamt fuer Energie (BFE) der Schweizerischen Eidgenossenschaft. – 2008.

4. Ebnesajjad S. Fluoroplastics. Vol. 2 // Melt Processible Fluoropolymers. William Andrew Publishing. Norwich. NY. – 2002. – P. 376.

5. Nentwig J. Kunststoff-Folien, Herstellung – Eigenschaften – Anwendung // Carl Hanser Verlag. Muenchen. Wien. – 2006. – P. 59.

6. Neupauer A. Technisches Merkblatt 02. Einführung in die Verarbeitung von PTFEKunststoffen, pro-K Fluoropolymergroup. – 2010.

7. Ebnesajjad S. Fluoroplastics. Vol. 1 // Non-Melt Processible Fluoroplastics. – William Andrew Publishing. 1st Ed. Norwich. NY. – 2001. 195 p.

8. Drobny J. G. Fluoroplastics // Rapra Technology Limited, Shawbury. Shrewsbury. Shropshire. UK. – 2006. – 16/4. – P. 31.

Перевод А. П. Сергеевкова

Fluoropolymers in Film Applications

S. Zehentmaier

More than 70 years after the discovery of polytetrafluoroethylene (PTFE), fluoropolymers have become well-established as an extremely useful material family in a variety of technical applications. In addition to PTFE itself, which cannot be processed with many of the conventional methods, utilised in plastics technology, a whole series of fluorothermoplastics that are flexible to handle has gained a place in everyday life. In film applications they stand out among other things by exceptional resistance to tear propagation and chemical resistance. Most visible for many consumers are fluorothermoplastic films in outdoor applications. Here they convince for example due to their high robustness and self-cleaning properties. Another advantage is the considerably lower weight compared to glass, which enables the design of more filigree load-bearing structures or permits them in the first place. Not least, these weather-resistant films allow the realisation of very courageous and aesthetically pleasing architectural ideas. Also, the problem of heat build-up under transparent fluorothermoplastic roofs can now be solved, thanks to the new, multi-layer optical films. ■

Zehentmaier S. Fluorthermoplaste in Filmanwendungen // GAK. – 2015. – Nr. 7. – S. 476–483.