

# Коррекция толщины полимерных пленок в процессе их изготовления

А.Р. Смышляев, к.т.н.,

ООО «Арсенал Инжиниринг»;

Б.В. Бердышев, д.т.н., проф., МГУИЭ;

Ф. Губерман, д-р, Macro Engineering and Technology Inc. (Канада)

(Продолжение.)

Начало в ПМ № 11 (102), 12 (103), 2007)

1. Качество — это материальная субстанция.
2. Килограммы или квадратные метры?
3. Как измерить толщину пленки?
4. Как измерить разнотолщинность пленки?
5. Интерпретация и анализ данных.
6. Комплексные системы коррекции толщины пленки.

В заключение третьего раздела статьи, основная часть которого была опубликована в журнале «Полимерные материалы» № 12 (103), 2007, с. 10-16, следует отметить сравнительно новые разработки фирмы NDC (США) в области непрерывного рентгенометрического контроля толщины полимерных пленок и других пленочных материалов. Возможность одностороннего контроля и принципиальная схема осуществления данного метода толщинометрии (рис. 9) остаются такими же, как в описанном ранее методе гамма-контроля. Однако существенными преимуществами рентгеновского контроля являются возможность регулирования и поддержания на заданном уровне интенсивности первичного (падающего на пленку) и, соответственно, вторичного (рассеиваемого пленкой) излучений.

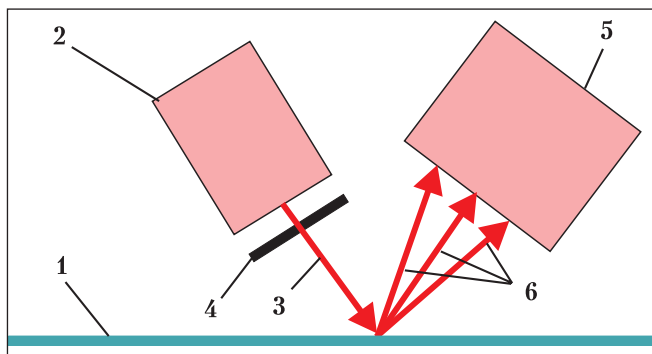


Рис. 9. Схема непрерывного рентгенометрического контроля толщины движущейся пленки (1): 2 — источник (рентгеновская трубка) первичного рентгеновского излучения (3); 4 — диафрагма; 5 — приемник вторичного, рассеянного излучения (6)

## 4. Как измерить разнотолщинность пленки?

Поперечная разнотолщинность пленок — это «лакмусовая бумажка качества», свидетельствующая о пригодности пленки к дальнейшей переработке и эксплуатации. Процедура измерения толщины пленки в поперечном направлении проста в лабораторных условиях, но становится сложной в процессе изготовления пленки. Для этого потребуется либо перемещать датчик поперек движения полотна, либо стационарно установить необходимое количество датчиков в поперечном к движению пленки направлении. В первом случае следует учесть то обстоятельство, что достаточно высокая скорость движения полотна при ограниченном минимальном времени одного замера толщины приведет к тому, что расстояние между точками измерений будет

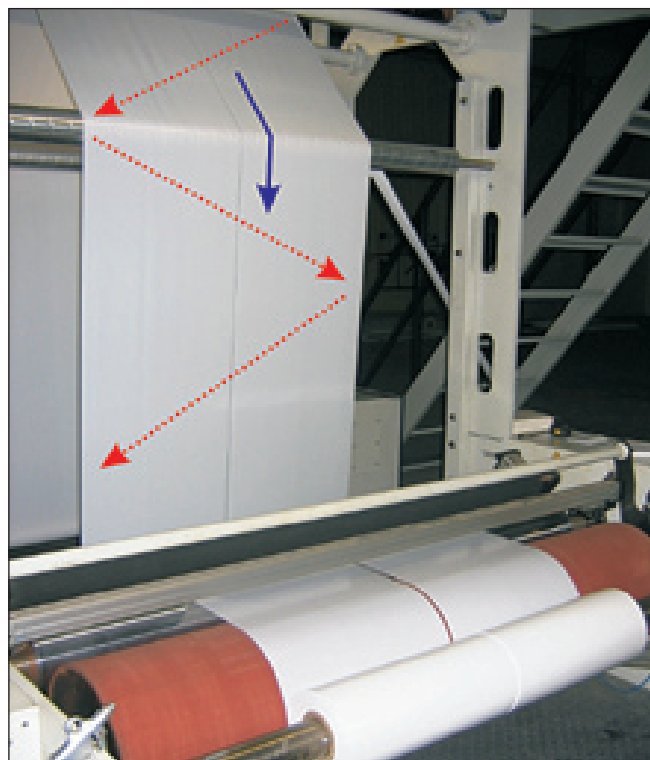


Рис. 10. Траектория (выделена красным цветом) измерений (показаны точки на траектории) толщины движущейся пленки (направление движения указывает синяя стрелка)

сравнительно большим, а сама траектория измерений пройдет по диагонали, т. е. под углом к продольному направлению, определяемым соотношением скоростей движения полотна и его сканирования (рис. 10). Тогда получается, что профилограмма, полученная таким образом, будет некоей результирующей характеристикой толщины и разнотолщинности пленки не только в поперечном, но и в продольном направлениях.

Для вычленения поперечной разнотолщинности следует сделать четное количество проходов датчика поперек пленки, тогда можно рассчитать путем усреднения профиль толщины пленки в поперечном направлении. Картина еще более усложняется при производстве пленки методом раздува, когда траектория измерений толщины будет располагаться по спирали вокруг рукава. Поскольку головка или тянущие валы вращаются, то рукав слегка скручивается и простое арифметическое усреднение уже не адекватно — требуются более сложные формулы. Наибольшая сложность в расчетах отмечается при измерении толщины сложенного рукава (фактически — двойной толщины пленки), когда требуется, во-первых, рассчитать толщину пленки по всей окружности рукава, а во-вторых, вычленить профиль поперечной разнотолщинности пленки.

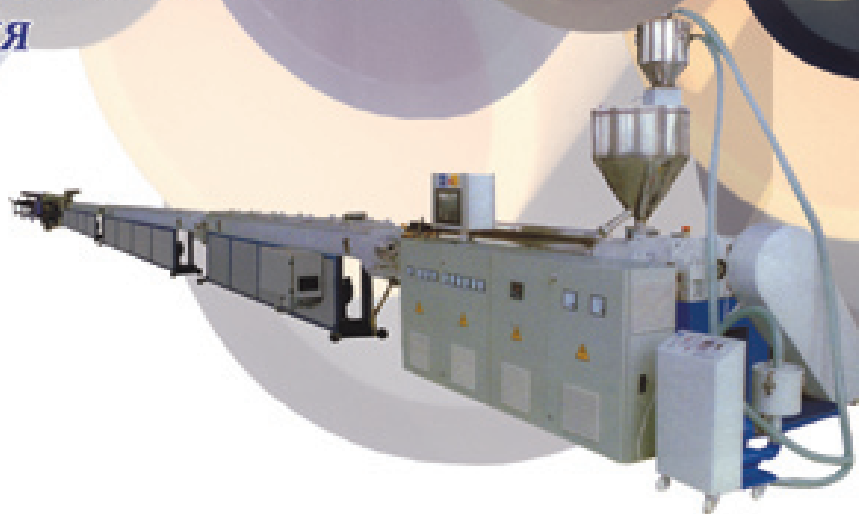
#### 5. Интерпретация и анализ данных

При каждом цикле сканирования датчик поставяет массив из множества значений данных, которые необходимо зарегистрировать и интерпретировать.

Очевидно, что характеризовать рассеивание результатов измерений толщины пленки только минимальным и максимальным ее значениями было бы наименее трудоемко, но и необъективно, поскольку единственная грубая ошибка может привести к ошибочным выводам и браковке всего рулона пленки. Более подходящим, характеризующим весь статистический массив данных и общепринятым в мировой практике параметром распределения случайной величины, каковой является толщина пленки, служит ее выборочное среднеквадратическое отклонение (за рубежом — «стандартное отклонение» или просто «стандарт»), обозначаемое  $\sigma$ . При этом подразумевается нормальный закон распределения контролируемого показателя качества, что является внешним признаком и нормального хода производства. В так называемый «шестисигмовый интервал» укладывается почти 100 % фактических значений измерений, и если, например, какое-то из значений толщины не укладывается в этот диапазон (слишком большое или слишком маленькое), то оно отбрасывается в предположении, что причина этого связана не с разнотолщинностью пленки, а с грубой ошибкой измерений.

Широкое распространение получил также интервал, равный  $4\sigma$  ( $\pm 2\sigma$ ), который с доверительной вероятностью порядка 95 % оценивает рассеивание случайной величины, «отбрасывая» 5 % выбросов в большую или меньшую сторону. Однако в данном случае отсеиваются не грубые ошибки, а отдельные значения толщины,

## ЭКСТРУЗИОННЫЕ ЛИНИИ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ И МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ БЫТОВОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ



**SINA-PLAST**

129164, Россия, Москва, ул. Ярославская, дом 8, корпус 2, офис 4  
тел./факс +7 (495) 933 3437, +7 (495) 504 0700 доб. 262  
www.sinaplast.ru e-mail: sina\_rm@mail.ru

связанные, например, со случайными включениями в пленке, но которые все же не свидетельствуют о качестве материала в смысле его дальнейшей переработки. Вторая причина использования интервала « $\pm 2\sigma$ » лежит в области коммерции. Дело в том, что, отбрасывая «неудобные результаты», можно повысить (порой значительно) количественную оценку качества пленки. Иногда, с учетом реалий, на оценку по методу « $\pm 2\sigma$ » сознательно идут и поставщики, и покупатели. Так, например, трудно получить высокие показатели разнотолщинности для очень тонких пленок при применении определенных видов сырья или не самого совершенного оборудования. Тогда использование метода « $\pm 2\sigma$ » позволяет достаточно точно определить хотя бы перерасход сырья.

Массив из сотен значений толщины содержит в себе, однако, гораздо больше информации, чем сухие цифры среднего арифметического значения и стандартного отклонения. В случае присутствия регулярных циклических факторов отклонения толщины анализ всего массива статистических данных позволяет выявить (а затем и устранить) источники повышенной разнотолщинности.

Возникновение разнотолщинности полимерных пленок в процессе их производства на линиях с кольцевой щелью обусловлено рядом факторов. Так, например, причинами поперечной разнотолщинности могут быть:

- некачественный расплав, подаваемый из экструзионных прессов;
- несовершенство фильерной головки или неотрегулированность толщины кольцевой щели по ее периметру;
- несовершенство системы подачи и распределения воздуха для наружного и внутреннего охлаждения (если эта система по какой-то причине не обеспечивает равномерной по периметру подачи воздуха);
- нагары (продукты частичной термоокислительной деструкции экструдированных полимеров) на кромках щели фильеры или в каналах фильеры вблизи выхода из щели;
- неоднородность по периметру температуры выходящего из щели фильеры расплава, которая может иметь место при возникновении неисправности в нагревателях фильеры;
- нестабильность рукава или неравномерность полива при плоскощелевой экструзии, дрейф воздуха и т.п.

Технологические факторы возникновения разнотолщинности можно разделить на две группы: случайные и постоянные.

Группа случайных факторов потому так и называется, что вызвана непрогнозируемыми причинами, длительность действия которых не может быть предсказана. Примером этому может служить относительно кратковременное искажение формы получаемого пленочного рукава под действием случайно возникшего и совершенно не заметного для человека перепада давле-

ния воздуха в рабочей зоне производства, что, естественно, приведет к возникновению разнотолщинности в пленке. Не вдаваясь в подробности, следует заметить, что для устранения влияния факторов случайной природы необходимо создать систему управления, которая будет иметь скорость срабатывания более высокую, чем продолжительность действия случайных внешних воздействий.

Группа регулярных факторов поддается анализу и воздействию на них в значительно большей степени, иллюстрацией чему может служить упрощенный пример поиска и устранения причин возникновения разнотолщинности у производителя пленки, располагающего современной компьютерной системой контроля, регистрации и обработки результатов измерения толщины пленки. На рис. 11 (а) непрерывной черной кривой линией показан профиль толщины пленки, снятый по 3600 точкам. Ломаная линия с кружочками представляет собой полиномиальную аппроксимацию профиля толщины пленки (гармоническое разложение полинома представлено диаграммами на рис. 12). Горизонтальная линия посередине соответствует средней толщине, равной 11 мкм, а коэффициент вариации  $V$  (равен отношению среднеквадратичного отклонения толщины пленки к ее среднему значению) толщины составил 18 %, что не удовлетворило производителя пленки.

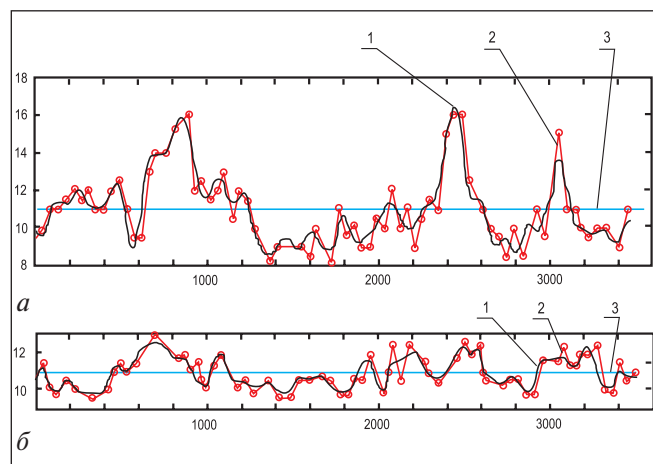


Рис. 11. Построенный по 3600 точек измерений профиль толщины (1) пленки до (а) и после (б) наладки системы распределения охлаждающего воздуха: 2 – полиномиальная аппроксимация профиля; 3 – среднее значение толщины

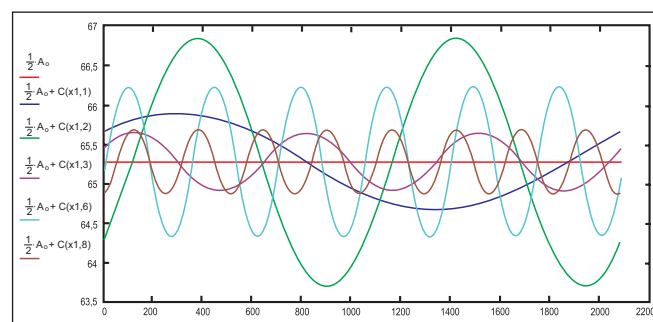


Рис. 12. Шесть гармоник полиномиального разложения, аппроксимирующего профиль толщины исходной рукавной пленки (см. также рис. 11, а)

Опыт идентификации причин повышенной разнотолщинности пленок по форме соответствующих гармоник (см. рис. 12), накопленный на рассматриваемом предприятии, позволил предположить, что наиболее вероятной причиной недопустимой вариации толщины пленки в данном случае является несовершенство системы распределения охлаждающего воздуха. После ее модифицирования и наладки были проведены повторные измерения толщины пленки, которые подтвердили первоначальные предположения и принесли благоприятные результаты (рис. 11, б): коэффициент вариации толщины пленки уменьшился до приемлемого значения – 8 %.

### 6. Комплексные системы коррекции толщины (КТ) пленки

Как упоминалось ранее, комплексные системы КТ пленки в процессе ее непрерывного производства состоят, как правило, из трех структурных элементов:

- сканирующего по ширине полотна или вокруг рукава датчика;
- исполнительного механизма, расположенного в фильере или в непосредственной близости;
- блока управления с программным обеспечением, в функции которого входит обработка результатов измерения толщины, приведение в соответствие профиля толщины и управление исполнительным механизмом на фильере.

Ниже рассмотрены основные методы регулирования толщины пленки в реальном масштабе времени технологического процесса. Так, в процессе получения плоского полотна (пленки), например, при плоскощелевой экструзии, наиболее эффективным является метод регулирования зазора гибкой фильеры.

При изготовлении раздувной пленки в качестве метода КТ используется фактор самого раздува. Связано это с тем обстоятельством, что более высокая температура пленки способствует более значительной вытяжке в поперечном направлении. При этом более толстые участки пленки остывают медленнее, что приводит к парадоксальному явлению реверса толщин. Более толстые участки после раздува становятся тоньше, чем изначально более тонкие участки трубчатой заготовки. Подогрев отдельных секторов фильеры изменяет ее пропускную способность, что позволяет регулировать толщину трубчатой заготовки.

Регулирование толщины пленки производится также с помощью секторного подогрева или охлаждения потока охлаждающего воздуха. Аналогичный эффект дает изменение направления и скорости воздушного потока, обтекающего рукав с наружной или внутренней сторон рукава. Успешно применяются также системы, реализующие локальный подогрев трубчатой заготовки пленочного рукава.

Сегодня в большинстве случаев поперечная толщина регулируется путем локального нагрева соответствующих секторов экструзионной головки в зоне формирующей щели (рис. 13). Долгие годы монопольным



**oerlikon**  
**barmag**

**ЭРМАФА Кунштштоффтехник Хемниц ГмБХ**  
Представительство в России:  
119571, г. Москва,  
ул. 26 Бакинских Комиссаров, дом 9, офис 49  
Тел./Факс: (495) 514 1703  
(495) 232 1426  
e-mail: wemexmos@online.ru  
internet: www.ermafa.de

- ▶ Установки компаундирования с двухшнековыми экструдерами параллельного и встречного вращения
- ▶ Одношнековые экструдеры
- ▶ Установки для ресайклинга пластмасс и резины
- ▶ Закрытые смесители (для резины, пластмассы)
- ▶ Вальцовые системы (резины, пластмассы)
- ▶ Модернизация и капитальный ремонт оборудования и установок фирмы «ТРУЗИОМА»

Приглашаем посетить наш стенд FF71 в павильоне Форум на выставке ИНТЕРПЛАСТИКА с 29 января по 01 февраля 2008 года



**Berlingtoun**

**ПРЕДЛАГАЕТ:**

- экструзионные линии для производства ПЭ пленки
- флексопечатные машины
- пакетопечатные машины

**ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ:**

- дробилки
- шредеры однороторные
- грануляторы
- капсуляторы

**SteelHard**

ООО "Полимерные Технологии"  
Polymer Technology LLC  
344002, г. Ростов-на-Дону,  
Бизнес-центр "Купеческий Двор",  
ул. Социалистическая, 74, офис, 44  
Тел.: (883) 300-30-10 (многоканальный)  
http: www.berlingtoun.ru  
E-mail: info@berlingtoun.ru

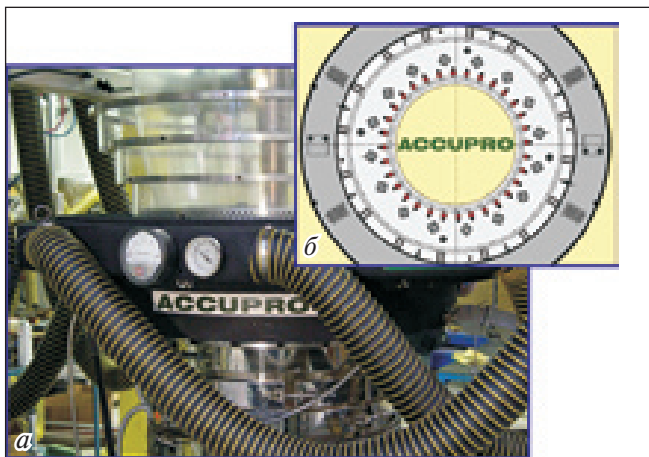


Рис. 13. Система регулирования поперечной толщины пленки путем локального нагрева секторов экструзионной головки (а) и схематичное изображение зоны формирующей щели с установленными в ней нагревательными элементами (б)

владельцем патента на данную систему была немецкая фирма Windmoeller & Hoelscher, что сдерживало более широкое применение данного метода.

При реализации метода регулирования толщины пленки с помощью воздуха принцип остается тот же самый: локальное изменение термомеханического состояния полимера в необходимых зонах. Для этого экструзионная головка оснащается секторным воздушным кольцом, сквозь отдельные отверстия которого подается холодный или нагретый воздух. За счет этого отдельные зоны пленочного рукава либо охлаждаются, либо дополнительно нагреваются, что ведет к изменению релаксационного состояния полимера в этих зонах. Последнее обстоятельство приводит к снижению или увеличению деформаций полимера в этих зонах при раздувании пленочного рукава и соответствующему изменению формы расплава при раздуве, что и обеспечивает возможность регулирования толщины пленки (рис. 14).

Как показывает практика, любые мероприятия по управлению качеством пленочной продукции окупаются достаточно быстро. К тому же непрерывный контроль практически исключает производство некон-

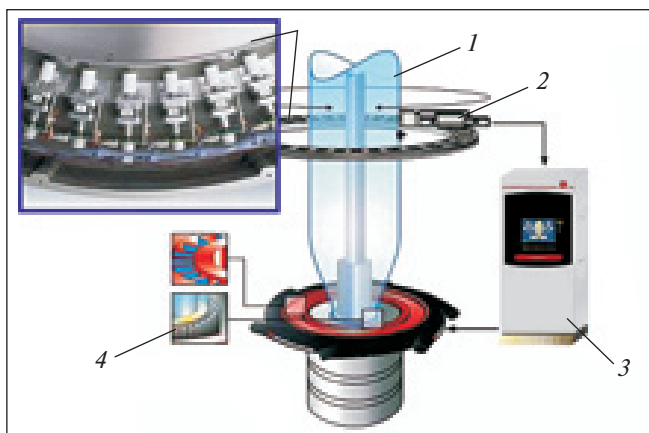


Рис. 14. Система регулирования поперечной толщины пленки (1) путем локального подогрева охлаждающего воздуха в зоне обдува по секторам: 2 – сканирующий вокруг рукава датчик; 3 – блок управления с программным обеспечением; 4 – исполнительный механизм управления секторным воздушным кольцом

диционной продукции и позволяет снизить влияние человеческого фактора (как источника погрешностей производства), что дает дополнительный технико-экономический эффект. Кроме того, использование систем контроля и управления качеством продукции позволяет несколько продлить срок службы морально стареющего оборудования. Однако впереди переработчиков ждет борьба за доли процентов и доли микрометров, которые в конечном счете превращаются в десятки процентов прибыльности производства.

В этих условиях наибольшим уровнем конкурентоспособности будет обладать современное оборудование нового поколения, спроектированное с использованием совершенных методов расчета и оснащенное современными электронными системами управления качеством продукции.

В заключение следует указать на возможность использования результатов анализа толщины в качестве критерия оценки качества оборудования. Дело в том, что при выборе оборудования следует учитывать множество факторов. Это и показатели оборудования, влияющие на качество пленки, и расход сырья и материалов, удобство и надежность работы. Специалистов, способных объективно разобраться во всех тонкостях, с тем чтобы сделать обоснованный выбор, крайне мало. Пожалуй, можно даже сказать, что, кроме самих разработчиков оборудования, всех тонкостей не знает никто. Поэтому при выборе оборудования встает, на первый взгляд, трудноразрешимая проблема, решить которую, однако, можно, сравнивая качество конечной продукции разных производителей. Поэтому логично выбрать именно ту установку, которая способна производить лучшую пленку с меньшими затратами. При этом сравнивать физико-механические показатели пленки (усадку, прочность ...) не имеет смысла, потому что они зависят не только от качества оборудования, но и от качества сырья и режимов переработки. Практически единственным объективным критерием качества оборудования является равномерность толщины получаемой на нем пленки. От разброса толщины пленки сильно зависят и затраты на ее производство. А добиться хороших показателей по разнотолщинности пленки можно только на хорошем во всех отношениях оборудовании.

При подготовке статьи были использованы материалы Интернет-изданий «Арсенал Инжиниринг», *Plastics Technology*, «Индустрия полимеров» и материалы фирм *Macro Engineering and Technology Inc.*, *GAP Italy SRL* и др.

### **Correction of Polymer Film Thickness in the Process of Tires Manufacture**

*(Continued from PM No. 11 (102), 12 (103), 2007*

*A.R. Smyshliayev, B.V. Berdyshev, F. Guberman*

*Systems for polymer film thickness correction in the process of its manufacture are discussed. It is demonstrated that continuous control of the film thickness practically excludes production of substandard products and presents additional economic advantages. It is concluded that competitive equipment of the new generation should be provided with advanced electronic quality control systems.*