

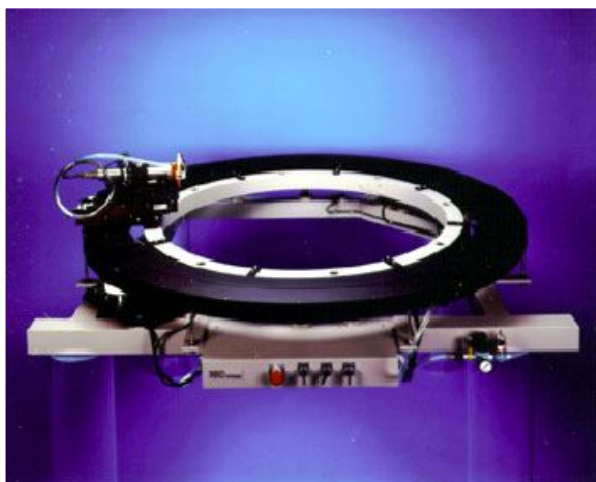
НЕ ДУМАЙ О МИКРОНАХ СВЫСОКА

Смышляев А.Р., ктн. Арсенал Индустрии (Россия), Бердышев Б.В., дтн, проф.,

Dr. F. Guberman, Macro Engineering and Technology Inc. (Canada)

«В США в год устанавливается не менее сотни систем управления толщиной пленки в процессе производства», сообщает Джон Вайз, представитель известной немецкой фирмы Reifenhauer, производящей оборудование для переработки полимеров. Все большее количество фирм, поставляющих, как измерительные датчики, так и комплексные системы коррекции толщины (КТ) появляются на рынке. Причем системы могут быть как частью процесса, так и лабораторным оборудованием. В данной статье речь будет касаться в основном систем КТ, работающих in-line, то есть в процессе производства.

В целом система КТ включает следующие составные части: измерительный датчик (сканер), программное обеспечение и исполнительный узел. Соответственно есть фирмы, специализирующиеся либо на одной или нескольких частях системы КТ, или же поставляющие комплексное решение. В области датчиков для измерения толщины в рукавной пленке из известны такие фирмы как Plast-Control, Kuendig, NDC, Sussex, Octagon и др. Для измерения толщины в плоских пленках известны датчики фирм Micro-Epsilon Messtechnik GmbH, Electronic Systems (Italy), NDC, Thermo-Fischer (USA) и пр. Следует отметить, что и в России компания АРСЕНАЛ ИНЖИНИРИНГ предлагает датчик измерения толщины в плоских пленках.



Ряд из этих компаний поставляют и программное обеспечение для КТ, однако они, за малым исключением, не занимают изготовления исполнительных узлов, корректирующих толщину.

Комплексные системы КТ поставляются либо фирмами-производителями линий, обычно оснащающие свои машины собственной системой, как правило, являющейся неотъемлемой частью линии. (одним из первопроходцев, и по сей день имеющая одну из лучших систем КТ, является немецкая компания W&H), либо компаниями, позиционирующиеся на рынке как поставщики комплексных систем КТ «для всех», то есть могут продавать эти системы как производителям машин, так и дооснащать системами работающие линии у клиента. К ним относятся Octagon Process Technology GmbH, Plast-Control, K-Design, Addex (USA), Macro Engineering (Canada), которая, помимо полных

пленкоизготавливающих линий, поставляет комплексные системы КТ.

Стоимость таких систем достигает десятков тысяч долларов сотни и более тысяч евро. Применение систем КТ продукции позволяет повысить точность производства «всего» на несколько микрон. Возникает закономерный вопрос, насколько оправдано применение столь дорогостоящего оборудования?

КАЧЕСТВО – ЭТО МАТЕРИАЛЬНАЯ СУБСТАНЦИЯ

Хороший уровень лабораторной и технологической проверки качества исходного сырья и выпускаемой продукции сегодня приобретают особое значение для повышения надежности пленочного бизнеса. Полимерные пленки имеют ряд важных для переработчиков и конечных потребителей показателей: механическую прочность, жесткость, способность противостоять проколу и раздиру, прозрачность, свариваемость, плоскостность, блеск, равномерность окраса (или, на профессиональном жаргоне, прокраса). Помимо этого, переработчики оценивают и качество рулонов пленки, оцениваемое геометрией рулона и плотностью намотки. Все это необходимо для того, чтобы при переработке пленки в упаковку иметь возможность использовать высокопроизводительное, имеющее рабочие скорости до 500 м/мин, оборудование для нанесения печати и ламинирования. Высококачественная пленка позволяет также получать прочные и равномерные сварные швы на скоростных пакетосварочных машинах. Нужно высокое качество и при скоростной групповой упаковке в термоусадочную пленку, и при упаковке продукции в термоусадочные и стретч-пленки.

Для оценки качества проводятся лабораторные и технологические испытания. В лаборатории, например, определяются отклонения толщины, светопропускания и прозрачности, коэффициент трения поверхности, блеск, прочность на разрыв и прокол, температура плавления, наличие посторонних

включений, барьерные свойства. Термоусадочную пленку испытывают на коэффициенты усадки и остаточную прочность. На практике технологами для проверки качества пленки также часто используются, в зависимости от назначения материала, различные прикладные методы, позволяющие напрямую оценить ее функциональную пригодность. Пакеты испытывают на механическую прочность, наливая в них воду и выдерживая определенное время. Упаковку сухих смесей в пластиковые мешки проверяют на прочность, сбрасывая их с определенной высоты. Производители также оценивают качество конечной продукции, полученной из пленочных материалов, после нанесения рисунка, сварки и ламинирования. Плоскостность пленки оценивают, положив прямоугольный отрезок пленки на ровную поверхность.

Одним из важнейших факторов, влияющих на большинство основных свойств пленки, является ее толщина. Однако толщина пленки в процессе производства всегда имеет отклонение от номинала, разброс толщин, который технологи называют называемое разнотолщинностью. Согласно действующему поныне ГОСТ 10354-82 допустимой считается разнотолщинность пленки в 20 процентов. Это всегда означает плюс-минус 20 процентов, то есть для пленки с номиналом в 100 микрон абсолютный допустимый минимум по данному ГОСТу составит 80 микрон, а максимум - 120. Сегодня допуски де-факто стали жестче, о чем мы еще поговорим.

Если пленка тоньше нижнего допуска номинала, то возрастают потери сырья при разрывах пленочного полотна в процессе производства. Однако значительно худшие последствия влечет несвоевременное обнаружение отклонения толщины, в результате чего бракованной оказывается вся партия изготовленных из пленки изделий. При этом потери будут тем больше, чем на более поздней стадии обнаружено отклонение – достаточно представить последствия появления в продаже плохо упакованной дорогостоящей продукции. Чтобы избежать худшего, производителям пленки приходится завышать номинальную толщину. Конечно, увеличение толщины пленки позволяет решить некоторые проблемы, но не все так просто. Разнотолщинность играет также ключевую роль. Пленка с повышенной разнотолщинностью становится непригодной для получения качественных сварных швов, для ламинирования и переработки на скоростных машинах. Для переработки пленки на скоростных флексографских машинах допуск по толщине составляет +/- 3-4 процента, обычно это 1-2 микрона. Допуск по толщине термоусадочных пленок для скоростной полуавтоматической упаковки составляет +/- 4-6 процентов, пищевики любят пленку с разнотолщинностью не более +/- 5-6 процентов. Но особенно высокие требования предъявляются к пленкам для ламинирования, у которых разброс толщин должен приближаться к +/- 2 процентам.

Поперечная разнотолщинность сильно влияет на скорость и качество процессов переработки пленки, таких, как нанесение рисунка, сварка и ламинирование. В этом смысле продольная разнотолщинность не столь критична. Однако с точки зрения экономии сырья нет разницы между продольной и поперечной разнотолщинностью. Если рассматривать динамику процесса, то продольная разнотолщинность бывает быстро- и медленно меняющаяся. В первом случае период колебания толщины составляет от нескольких секунд до минут. Причинами «быстрой» продольной разнотолщинности может быть, к примеру, неравномерная во времени подача полимерного расплава из щели фильеры вследствие несовершенства экструзионных прессов или систем дозирования, колебаний температуры горячего модуля, дрейфа охлаждающего воздуха. Относительно скоротечные процессы изменения толщины могут вызывать также нестабильность пленочного рукава, ошибки системы регулирования диаметра рукава или несовершенная конструкция системы внутреннего охлаждения, большие вариации скорости тянущих или охлаждающих валов, повышенная температура зоны загрузки и многое другое. «Медленная» продольная разнотолщинность, при которой изменения занимают промежуток времени от минут до часов и даже дней чаще всего связана с загрязнением фильтров расплава и неоднородностью сырья, а также, например, с неисправностями системы охлаждения.

Возможна корректировка быстрой продольной разнотолщинности, связанной с экструзией. Иногда опытный технолог способен подобрать такие параметры работы экструзионного оборудования, которые позволяют уменьшить «быструю» разнотолщинность, вызванную нестабильностью подачи расплава из прессов или неустойчивостью рукава. Это можно, например, сделать, изменяя скорость вытяжных/охлаждающих валов. Но все же самым правильным решением будет выявление и устранение соответствующей неисправности. Что касается «медленной» продольной разнотолщинности, то ее регулировка достигается путем изменения скорости процесса, например путем регулирования подачи материала за счет управления оборотами главного привода с использованием автоматизированных систем дозирования.

КИЛОГРАММЫ ИЛИ КВАДРАТНЫЕ МЕТРЫ?

Потребитель приобретает пленку, как исходное сырье, для последующего изготовления и продажи конечной продукции. Если при этом известно точное количество квадратных метров пленки определенного качества, можно точно рассчитать, сколько пакетов, этикеток, рулонов покрытия теплиц будет получено из

партии продукции. «Если». Все дело в этом самом «если». Оптовые поставки осуществляются большими партиями. Площадь пленки, содержащейся в рулоне, сложно измерить. В то же время взвесить рулон, наоборот, легко. Отсутствие средств измерения и документирования площади продаваемой пленки приводит к тому, что пленка часто продается только с указанием веса. В некоторых случаях оптовый покупатель проводит контрольное измерение площади в процессе переработки рулонов пленки, например при резке на слиттере или при печати на флексографских машинах.

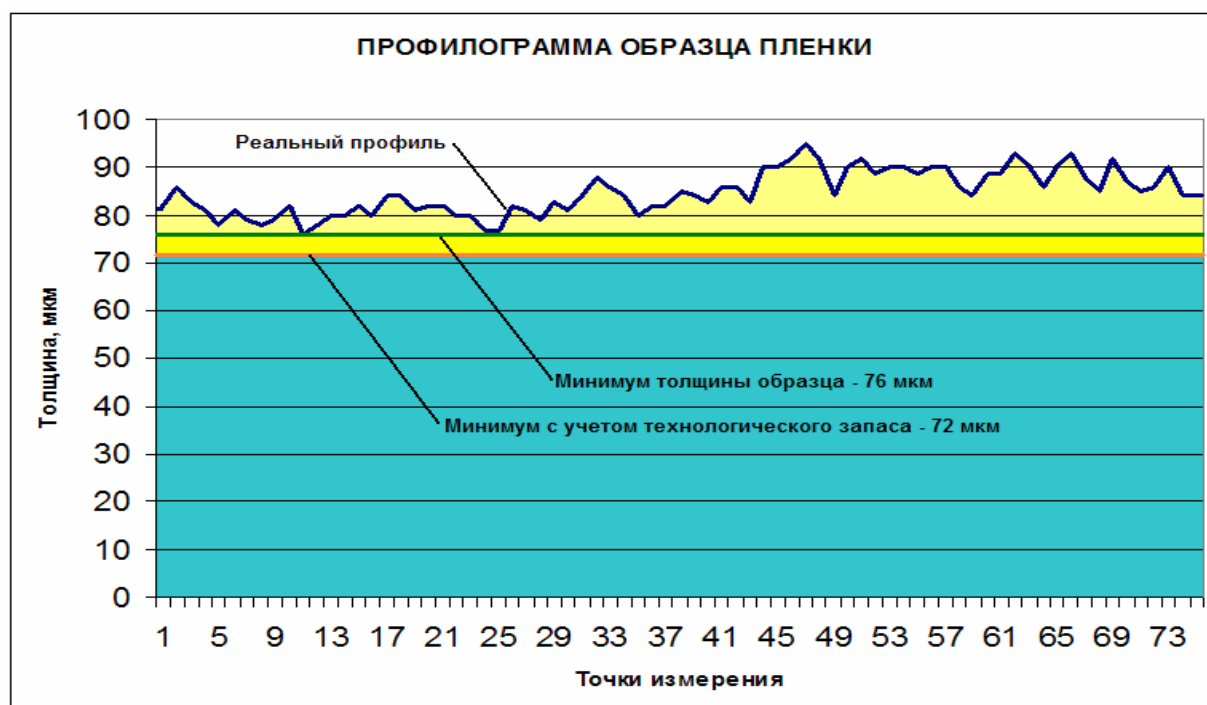
Продажа «на вес» упрощает жизнь производителя пленки. Сырье – гранулированный полимер – приобретаются на вес, что позволяет легко вести экономические расчеты. Но в этом заключается противоречие интересов поставщика рулонной пленки и ее производителя. Технологам и операторам проще держаться на верхнем пределе толщины пленки, да и себестоимость килограмма такой пленки ниже. В то же время потребителю нужна пленка на нижнем пределе толщины, чтобы иметь больше квадратных метров материала.

Позиции сторон позволяет сблизить учет такого показателя, как удельная плотность пленки. В западном полушарии производители используют аналогичный показатель «yield», означающий площадь (этикеток, пакетов и т.п.) на единицу массы пленки. Этот показатель служит мощным маркетинговым инструментом при продаже пленки на рынке с высоким уровнем конкуренции. Конкуренция на рынке производителей пленки в России быстро растет. Счет уже идет даже не на проценты, а на доли процентов цены и выхода полезной продукции, поэтому очевидно, что при одинаковой цене за килограмм покупатель предпочтет пленку с более высоким «yield».

Каким же образом можно повысить «yield»? Достигается это понижением плотности пленки или уменьшением толщины. Возможности для понижения плотности пленки ограничены либо эксплуатационными требованиями, либо стоимостью сырья. Остается толщина. Зачастую номинальная толщина задается с учетом минимальной допустимой толщины. Упомянутый ранее ГОСТ 10354-82 нормирует разнотолщинность в диапазоне +/- 20%. На практике это означает, что пленка с номинальной толщиной 100 мкм может иметь минимальную толщину 80 мкм, а максимальную – 120 мкм. Несложно подсчитать, что если снизить разнотолщинность до +/- 5%, то можно также снизить номинальную толщину до 84,2 мкм. Это позволит существенно, на 15,8%, повысить количество пленки на единицу веса. Выгоду при этом получает и продавец, снижающий производственные затраты, так и покупатель, увеличивающий выход готовой продукции при тех же затратах.

Экономический эффект уменьшения толщины пленки на несколько микрон значительно больше, чем может показаться на первый взгляд. Для этого давайте разберем реальный случай «из жизни».

Вот профилограмма, полученная замером кольцевого среза пленочного рукава периметром 2200 мм по 75 точкам.



Максимальная толщина образца равна 96 микрон, минимальная – 76 микрон, средняя составит 86. Пленка, как показывают результаты промеров, характеризуется разнотолщинностью, в данном случае равной +/- 11,6%. Если допустить, что такие свойства, как прочность, минимальны в самом тонком месте, то

весь запас толщины, в среднем это 10 микрон, находящийся на графике над горизонтальной линией, представляет собой не что иное, как технологические потери, связанные с разнотолщинностью.

В данном случае этот перерасход сырья составляет 11,6%. Предприятие, на котором взят образец, в год на 2 пленочных экструдерах выпускает 2800 тонн пленки, соответствующей рассматриваемому образцу. Это означает 325 тонны сырья, которое теряется на дополнительных микронах.

Заказчик, у которого из-за брака произошел сбой производства, измеряет толщину бракованной пленки в том месте, где произошел разрыв, то есть в одном из самых тонких мест в партии поставленной продукции. Зная это, производители, чтобы избежать обоснованных претензий покупателя по поводу низкой толщины пленки, делают пленку с запасом толщины. Этот запас толщины, называемый «технологическим», зависит от ряда факторов и определяется опытным путем. Чем лучше оборудование, сырье, производственная культура и технологическая дисциплина, тем этот запас меньше. В рассматриваемом случае поставщик с высокой вероятностью гарантирует потребителю, что поставляемая пленка будет не тоньше 72 мкм. При этом поставщик закладывает технологический запас в размере 5 процентов. При этом соответствующий такому запасу перерасход сырья составит 140 тонн в год. Итого дань разнотолщинности составляет 16,6%, то есть 465 тонн.

Однако это еще не все потери. На производство «лишних микронов» тратится не только сырье, но и другие ресурсы предприятия. Экономисты знают, что перерасход сырья, повышенные расходы электроэнергии, заработной платы и амортизации оборудования надо не просто складывать, а перемножать, а потом еще возводить в степень относительную прибыль или убыток с учетом скорости оборота сырья.

В результате получается, что цена «микронов» в описываемом случае потянула на 625 тысяч Евро в годовом выражении, то есть примерно 54 тысячи Евро за каждый микрон. Один микрон «съедает» 19 Евро на каждой тонне продукции.

Данная сумма сопоставима со стоимостью капитала который был накоплен предприятием за 7 лет работы. сильно оттягивает карман производителя запас микронов. Обратим внимание, что для примера взято производство, оснащенное современным оборудованием. У среднего российского производителя показатели разнотолщинности и связанные с этим потери значительно выше. Однако на эту проблему можно посмотреть и с другой стороны. Очевидно, что российские производители имеют существенный ресурс роста, который можно реализовать за счет повышения качества пленки. Сделать это непросто, но, как говорят китайцы, самый длинный путь начинается с первого шага. Первый шаг – измерение толщины пленки.

КАК ИЗМЕРИТЬ ТОЛЩИНУ

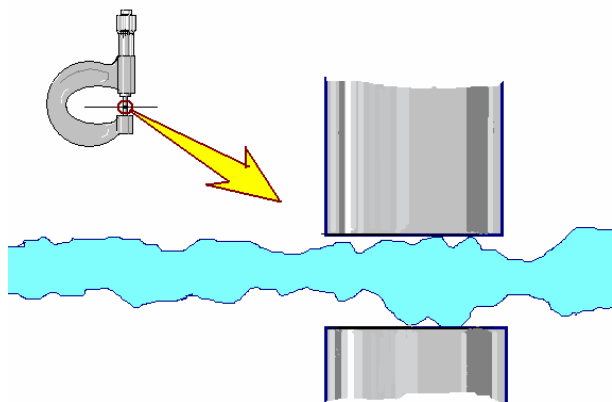
Профилограммы, подобные показанной выше, на практике делаются редко. Гораздо привычнее для российских производителей другая картина. Оператор или технолог отрезает кусочек пленки от готового рулона и замеряет его толщину. Обычно замер производится механическим прибором микрометром, микрометрической стойкой или пассометром. Эти устройства в лучшем случае имеют цену деления в 1 микрон.

На практике такая точность весьма условна. Тарирование приборов у производителя микрометров и в метрологических лабораториях производится с использованием специальных образцов, называемых «концевыми мерами». Самая тонкая концевая мера имеет толщину 50 микрон. Однако все приборы имеют индивидуальную нелинейность измерения, поэтому гарантировать точность реального прибора в диапазоне от 0 до 50 микронов в реальных условиях никто не в состоянии.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что замеры производятся не в точке, а на площади. Государственные стандарты устанавливают размер пятна замера и усилие прижима при замере. Очевидно, что чем меньше будет пятно измерения, тем более точный (и меньший!) результат мы получим.

Предположим, что мы измеряем пленку механическим способом, микрометром или пассометром. Из представленного рисунка видно, что при этом измеряется максимальная толщина пленки в пятне замера. Толщина завышается также при наличии загрязнений на поверхности. С другой стороны, при механическом контакте происходит деформация поверхности пленки. Тот, кому приходилось работать с микрометрами,



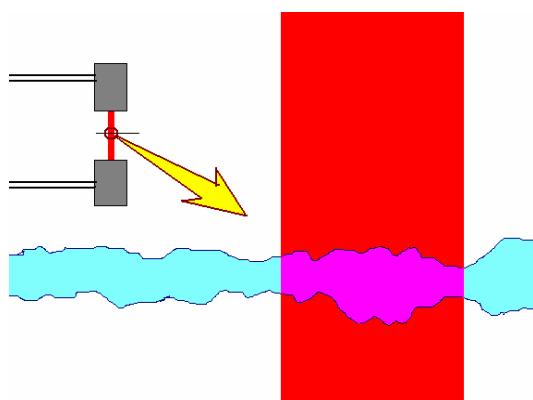


имеющими цену деления около 1 микрона, знают, что повторяемость измерений в одной той и той же точке невысока. Производители механических приборов часто идут дальше требований государственных стандартов и нормируют скорость прижима. Однако на практике точность измерений, произведенных механическим способом, ограничивается 2 -3 микронами. Это, как показывают приведенные выше экономические расчеты, не очень высокая точность. Теоретически для повышения точности механических методов можно провести трехмерный томографический замер толщины образца пленки под микроскопом и сравнить полученные данные, но для практических целей этот способ вряд ли применим, поэтому имеет смысл, обратиться к другим известным методам измерения.

На практике сегодня наиболее широко применяются методы, основанные на измерении уровня сигнала от электронного датчика. Работа датчиков основана на разных физических явлениях, таких, как диэлектрическая проницаемость, отражение потока гамма-частиц, поглощение бета-излучение и светового потока в инфракрасном диапазоне. Для полноты картины необходимо упомянуть такие разновидности механического измерения толщины, как оптическое и лазерное слежение за радиусом поверхности обводных валов с пленкой, а также метод замера аэродинамического сопротивления воздушного зазора между воздушным соплом и пленкой.

Для некоторых методов измерения необходимо, чтобы сенсорные устройства находились с обеих сторон полотна. Для других достаточно расположить датчики только с одной его стороны. Первые могут применяться для измерения плоского полотна, например в каст-процессах (поливные и каландровые линии с плоскощелевой экструзией) или же для измерения толщины сложенного вдвое рукава с последующей расшифровкой толщины одного слоя. «Односторонние» приборы второго типа способны измерять рукавную пленку на более ранней стадии технологического процесса, что, как будет показано ниже, может иметь важное значение в борьбе за микроны.

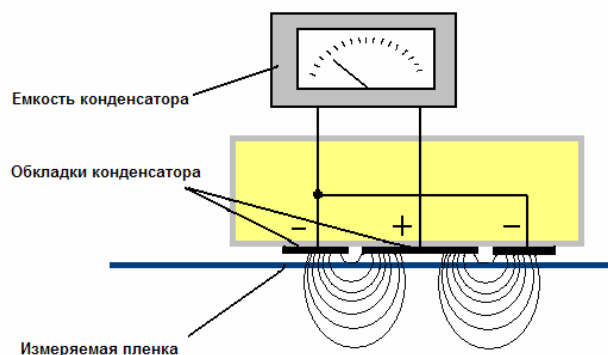
Методы также подразделяются по точности измерения, скорости измерения, надежности результатов и, конечно, по цене практической реализации. Для производителей важно производить замеры с высокой точностью и разрешающей способностью и в реальном времени. Совместить указанные требования непросто.



В отличие от механического измерения, электронные методы измерения толщины дают косвенные показатели. При измерении физических свойств пленок, а в случае применения самых совершенных методов, даже отдельных слоев, необходимо сопоставить уровень измеренного сигнала с реальной толщиной материала.

Так же, как и при механическом измерении толщины, не избежать погрешностей ей, связанных с тем, что замер производится не в точке, а в пятне. Однако при электронных способах часто удается уменьшить размер пятна. Повышению точности способствует и то обстоятельство, что замер производится не «по вершинам», а по среднему значению.

На первый взгляд при одинаковой площади пятна измерения немеханические способы точнее. Однако в большинстве случаев мы имеем дело с сигналами очень слабыми, сопоставимыми по величине с уровнем «электронного шума». Проблема усугубляется тем, что сигнал необходимо сопоставить физическому значению толщины, «откалибровать» датчик. Однако вернемся к методам измерения.



Измеряемая пленка

Механическое измерение толщины контактными методами, хоть они являются прямыми/непосредственными методами, имеет смысл применять в лабораторных условиях. Существуют системы, основанные на измерении зазора между двумя роликами непосредственно в процессе производства пленки, однако практического применения этот способ сегодня не находит.

Оптические и лазерные системы, хотя и позволяют видеть толщину без контакта с поверхностью, очень редко встречаются в практике, поскольку из-за больших погрешностей их невозможно применять в системах управления пленкой.

Наиболее распространенный метод, применяемый сегодня для оценки толщины рукавной пленки в ходе производства, основан на явлении разной диэлектрической проницаемости воздуха и полимеров. Это связано с тем, что данный метод позволяет располагать сенсорные устройства с одной стороны полотна, как показано на рисунке.

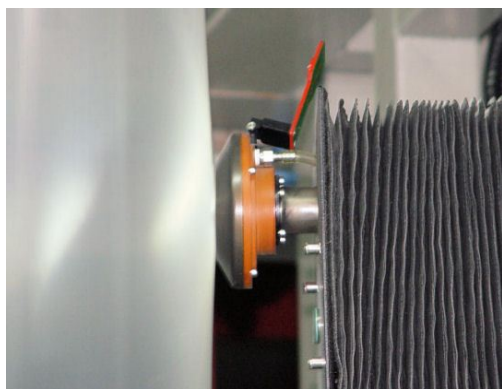
Емкость конденсатора с разомкнутыми пластинами изменяется в зависимости от толщины проходящей мимо пластин пленки, что может быть измерено.

Данный метод имеет серьезные недостатки. Во-первых, изменение расстояния между датчиком и поверхностью пленки резко снижает достоверность измерения. По этой причине необходимо, чтобы датчик скользил по поверхности пленки без зазора, что не всегда приемлемо. Механический контакт оставляет следы на пленке и может привести к повреждению и порывам пленок, содержащих ЭВА, металоценовые полиэтилены низкой плотности и других современных материалы с высоким коэффициентом трения. Правда в настоящее время появились бесконтактные емкостные датчики ряда фирм, в том числе Kuendig и [Octagon Process Technology GmbH](#), а также PlastControl, имеющий роликовый электрод, катящийся по пленке.

В связи с низкой разницей между диэлектрической проницаемостью воздуха и полиолефинов и других неполярных полимеров, точность описываемого метода, особенно для тонких пленок, невысока. Увеличение размеров обкладок конденсатора повышает стабильность показаний датчиков, но снижает его разрешающую способность. На практике регулярные отклонения толщины пленки с размером от менее 3-5 миллиметров для подобных датчиков неразличимы. Будучи косвенным методом, емкостные датчики, реагирующие на диэлектрическую проницаемость, не могут правильно замерять многослойные пленки, имеющие слои полимеров с разной полярностью, например, полиэтилен-полиамид или полиэтилен-ЭВХ или слои полиэтилена с высоким содержанием наполнителя, например, двуокиси титана.

Для получения приемлемых результатов на практике применяется дорогостоящая тепловая стабилизация датчика. Датчики требуют постоянную самокалибровку, практически после каждого прохода вокруг рукава.

Многих этих недостатков лишен датчик, основанный на анализе мощности отраженного от полимерной пленки гамма-излучения. Этот датчик также может целиком располагаться с одной стороны полотна, что позволяет использовать его в производстве рукавной пленки. NDC (США) – единственная фирма изготовитель такого датчика. Процесс отражения гамма-излучения достаточно сложный, причем и толщина, и плотность определяют отражение излучения. Чем толще пленка, тем и чем плотнее материал, тем мощнее поток гамма-частиц.



Этот датчик менее чувствителен к типу материала, так как применяемые на практике полимеры отличаются по плотности всего на 10-30%, в то время как по диэлектрической проницаемости они могут отличаться в 2-8 раз.

Датчики не требуют постоянной recalibration, хотя со временем мощность излучения изотопов, применяемых в датчиках, постепенно падает, в связи с чем необходимо производить его замену каждые 8-10 лет. Применение датчиков, основанных на использовании ионизирующих излучений, ограничено сложностью получения лицензии на их использование в Минатоме, необходимостью введения режима доступа на предприятие и в рабочую зону и психологическими факторами, с которыми приходится считаться предпринимателям.

На этом и исчерпывается список датчиков, способных замерять толщину с одной стороны пленки, поэтому устанавливаемые на рукаве. Для доскональной точности следует все же упомянуть еще тип односторонних датчиков – это ультразвуковые датчики, измеряющие диаметр и толщину стенки в трубном производстве. Они работают только в водной среде и могут вероятно применяться в способе производства пленок при выдуве в воду.

Среди систем с двусторонним размещением сенсорных устройств (как правило – источник и приемник), поэтому применяемые для измерения плоских полотен пленок, высокую точность дают датчики, основанные на применении бета-излучения. Это наиболее часто применяющиеся датчики в каст-пленочных и листовых машинах. Эти же датчики можно и устанавливать на рукавных машинах для измерения двойной толщины сложенной пленки. Если эти машины оборудованы поворотной башней, то используя математические алгоритмы, можно расшифровать толщину одного слоя пленки. Эти датчики с успехом замеряют и полиолефиновые полимеры, и барьерные материалы, являющимися по большей части высокополярными. К сожалению, такие системы работают с радиоактивным источником, со всеми вытекающими последствиями, связанными с их регистрацией.



Для измерения по ширине полотна толстых материалов на листовых машинах и кромки сложенного рукава на выдувной экструзии используется датчик замера толщины по аэродинамическому сопротивлению. Фирма Plast Control (Германия) и Electronic Systems (Италия) являются поставщиками подобных датчиков. Датчик возвращает общую толщину материала и может промерять практически все сплошные полотна: полимерные, фольговые, цветные и зеркальные. К сожалению, точность их недостаточна для измерения традиционных пленочных материалов, если желательно сканировать поперек полотна.

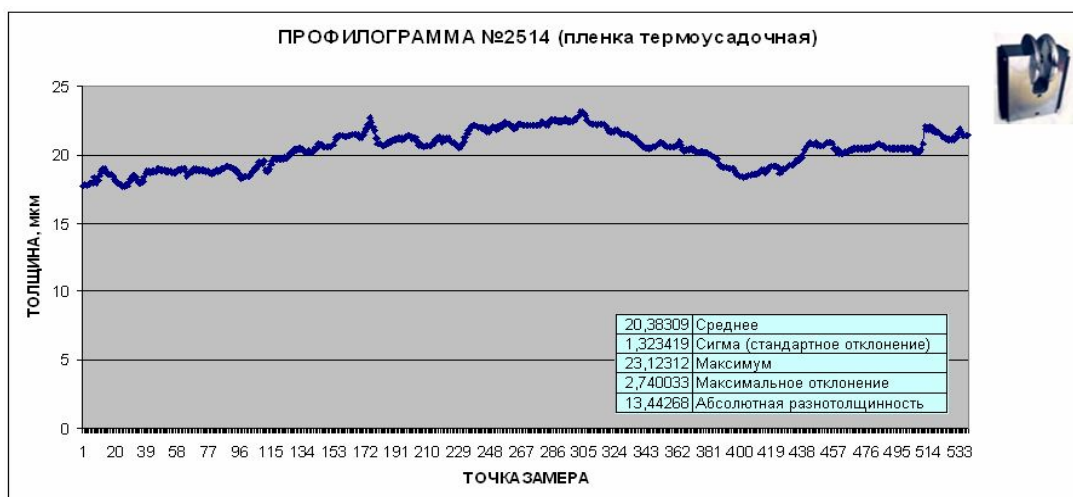
С развитием электронной технологии становятся все более популярными датчики, основанные на поглощении пленками инфракрасного (ИК) излучения. Принцип работы основывается на законе Беер - Ламберта, который эмпирически связывает оптическую плотность (логарифм отношения интенсивности падающего света к интенсивности прошедшего света через среду) с произведением коэффициента экстинкции (поглощения), концентрации и толщины слоя. С учетом того, что коэффициент экстинкции зависит от частоты излучения, метод обладает селективностью а значит, подбирая частоты, при которых тот или иной материал обладает наибольшей экстинкцией, можно определить относительное количество каждого компонента в композиционной структуре, каковой является многослойная пленка. Таким образом, ИК метод в принципе может определить как общую толщину пленки, так и толщину разных по составу слоев. Так, к примеру, полиэтилен имеет спектр поглощения в диапазоне длин световых волн, соответствующих примерно 3 и 4 микронам. Сенсор излучения, настроенный на данную длину волны, будет «видеть» толщину пленки, поскольку более толстая пленка для такого датчика будет пропускать меньше светового потока. Если сенсор будет иметь канал, настроенный, например на 2.6 – 2.8 микрона, то он также сможет дать информацию о толщине слоя ЭВОХ, если таковой имеется в структуре пленки.

ИК датчики промышленно выпускаются фирмами NDC (см. рисунок) и ThermoFischer. Например, датчики FG710 (NDC) оборудованы тремя каналами, показывающими общую толщину пленки, толщину слоя ЭВОХ и толщину слоя ПА.

Современные ИК датчики работают на основе полупроводниковых лазерных источников излучения (такие же примерно излучатели применяются для чтения оптических дисков). За счет этого точность измерения выросла сразу на 2 порядка. Датчики нового поколения позволяют с достаточной точностью и скоростью измерять толщину не только прозрачных, но и окрашенных полимерных материалов широкого ассортимента.



С 2005 года подобные датчики начал поставлять Российским предприятием АРСЕНАЛ ИНЖИНИРИНГ,. На рисунке показаны стационарный и сканирующий варианты исполнения датчиков, а также профилограмма, замеренная по 538 точкам.



Суммируем преимущества и недостатки различных классов приборов для измерения толщины пленки в виде таблицы

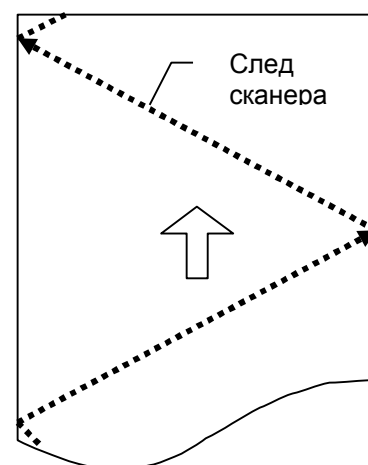
Название класса	Физический принцип	Точность, мкм	Скорость, сек-1	Одностороннее измерение	Предел точности управления, мкм	Цена, Евро
Микрометры	Механический	2-3	0	нет	5	20..800
Емкостные	Замер диэлектрических потерь	4	1	есть	4	50000
	Измерение отраженного гамма-излучения	0,5	0,02	есть	1	100000
Бета	Поглощение потока электронов	0,5	0,02	нет	2	70000
Инфракрасные	Поглощение светового потока	0,5	0,02	нет	1	50000

КАК ИЗМЕРИТЬ РАЗНОТОЛЩИННОСТЬ

Поперечная разнотолщинность – это лакмусовая бумажка качества, свидетельствующая о способности пленки продемонстрировать себя в дальнейшей переработке и далее в эксплуатации. Для определения поперечной разнотолщинности необходимо промерять пленку поперек полотна. Эта процедура проста при лабораторных замерах образца пленки, но становится сложной при определении толщины в процессе изготовления пленки. Для замера потребуется либо перемещать датчик поперек движения полотна, либо установить необходимое количество датчиков в поперечном направлении.

При сканировании следует учесть то обстоятельство, что достаточно высокая скорость полотна при ограниченной скорости замера толщины приводят к тому, что, если бы на пленочном полотне оставались следы измерений, то для большинства систем измерения, «горошек» был бы весьма редким, а точки измерения располагались бы под углом, определяемым отношением скорости полотна к скорости сканирования датчика, как показано на рисунке.

Профилограмма, получаемая при сканировании движущегося полотна, располагается фактически по диагонали, как вытекает из данного рисунка, следовательно она не является исключительно поперечной разнотолщинностью, но включает в себя также и продольную составляющую. Если рассмотреть процесс изготовления плоской пленки, например, каст пленки, то для вычленения поперечной разнотолщинности следует сделать несколько четных проходов и получить среднеарифметический профиль.



Однако картина значительно более усложняется при производстве выдувной пленки. При измерении толщины пленки в процессе раздува рукава траектория замера располагается 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.

Наибольшего изящества в расчетах требует способ замера сложенного рукава, фактически за мер двойной толщины. При наличии вращающихся тянущих валов есть возможность, во-первых рассчитать толщину пленки по всей окружности рукава, а вторых вычленить профиль поперечной разнотолщинности.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

При каждом цикле сканирования датчик поставляет массив из сотен или даже тысяч значений данных, которые нужно как-то интерпретировать. Статистика позволяет обработать такой массив и выдать понятные данные как среднее значение и максимальное и минимальное отклонение. Достаточно ли это для оценки качества пленки? Оказалось, что нет.

Статистика, как говорится в известной шутке, может дать любой нужный заказчику ответ. Однако без статистической обработки больших массивов информации в данном случае все же не обойтись. Такие показатели, как максимум и минимум не говорят о том, что происходит в целом с профилем толщины. Иногда случайный сбой прибора может привести к ошибочным выводам о браке партии пленки.

Более правильным является показатель, учитывающий весь статистический массив. При предположении, что массив подчиняется нормальному закону распределения, что в общем верно, можно рассчитать усредненное (стандартное) отклонение от среднего значения толщины. Стандартное отклонение называется Сигма. Из практики известно, что при установившемся технологическом процессе диапазон шириной в шесть Сигма (доверительный интервал равен $\pm 3 \cdot \text{Сигма}$) обычно перекрывает все реальные значения статистического массива измерений толщины. Если какое-то из значений толщины не укладывается в этот диапазон, то ли слишком большое, то ли маленькое, то оно отбрасывается, в предположении, что причина не связана с разнотолщинностью пленки, а что-то другое привело к выбросу. Таким образом, $3 \cdot \text{Сигма}$ как показатель является объективно показывающим качество пленки.

Широкое распространение получил показатель равный $2 \cdot \text{Сигма}$, который покрывает приблизительно 95% всех результатов, отбрасывая 5% процентов, выбросов в большую или меньшую сторону. В данном случае отбрасываются результаты, которые все же связаны с пленкой. Смысл в том, что отдельные выбросы, связанные, например, со случайными включениями в пленке, все же не свидетельствуют о качестве материала в смысле его дальнейшей переработки. Вторая причина лежит в области коммерции. Дело в том, что, отбрасывая «неудобные результаты», можно повысить, иногда значительно, численную оценку качества пленки. Иногда, с учетом реалий, на оценку по методу 2 сигма сознательно идут и поставщики и покупатели. Так, например, трудно получить высокие показатели разнотолщинности для очень тонких пленок или в случае применения определенных видов сырья или не самого совершенного оборудования. Использование метода 2 сигма в том случае позволяет достаточно точно определить хотя бы перерасход сырья.

Массив из сотен данных содержит в себе гораздо больше информации, чем сухие цифры среднего значения и стандартного отклонения. Анализ всего массива статистических данных позволяет зачастую выявить источники разнотолщинности.



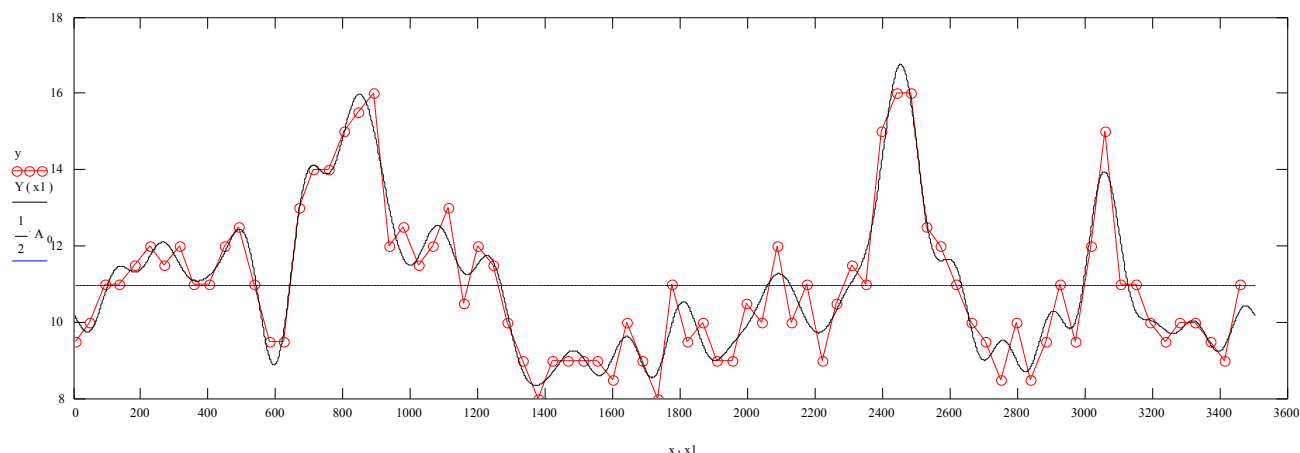
Возникновение разнотолщинности полимерных пленок в процессе их производства обусловлено рядом факторами. Причинами поперечной разнотолщинности могут быть некачественный расплав, подаваемый из экструзионных прессов, несовершенство фильерной головки или неотрегулированность ширины щели по её периметру, 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 расплава, вытекающего из щели фильеры, которая может иметь место при возникновении неисправности в нагревателях фильеры, нестабильность рукава или неравномерность полива в каст процессе, 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. Например, относительно кратковременное искажение формы получаемого пленочного рукава под действием случайно возникшего и совершенно незаметного для человека перепада давления воздуха в рабочей зоне производства, что, естественно, приведет к возникновению разнотолщинности в пленке. Не вдаваясь в подробности, отметим, что для устранения влияния факторов случайной природы необходимо создание системы управления, которая будет иметь скорость срабатывания более высокую, чем продолжительность действия случайных внешних воздействий.

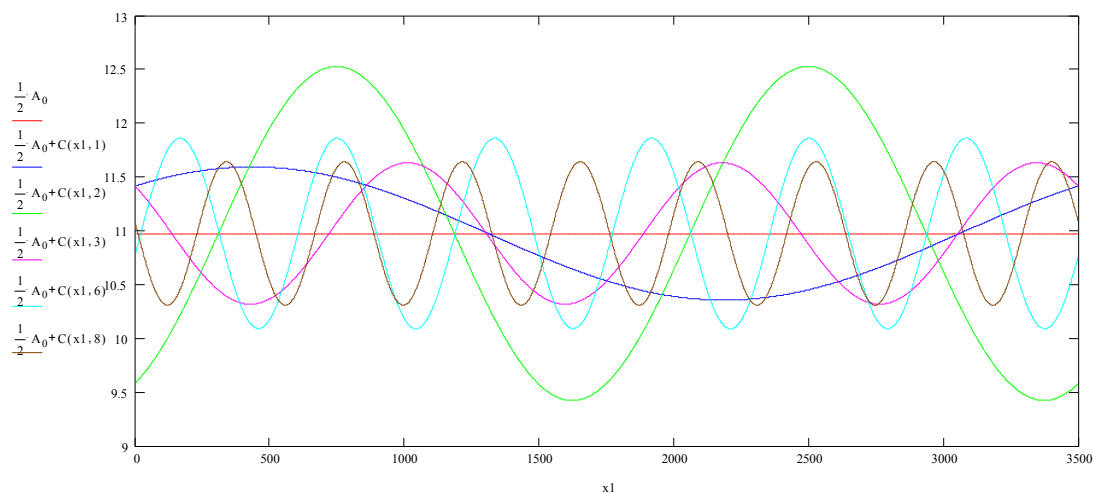
Группа регулярных факторов поддается анализу и воздействию в значительно большей степени. В



качестве иллюстрации того, как это делается, рассмотрим упрощенный пример анализа и устранения причин возникновения разнотолщинности у производителя пленки.

На рисунке непрерывной черной линией показан профиль толщины пленки, снятый по 3600 точкам. Горизонтальная линия посередине показывает среднюю толщину, равную 11 микронам. Среднеквадратичное отклонение толщины составляет 18%. Линия с кружочками представляет собой полиномиальную аппроксимацию профиля толщины пленки.

Гармоническое разложение полинома представлено следующей диаграммой.

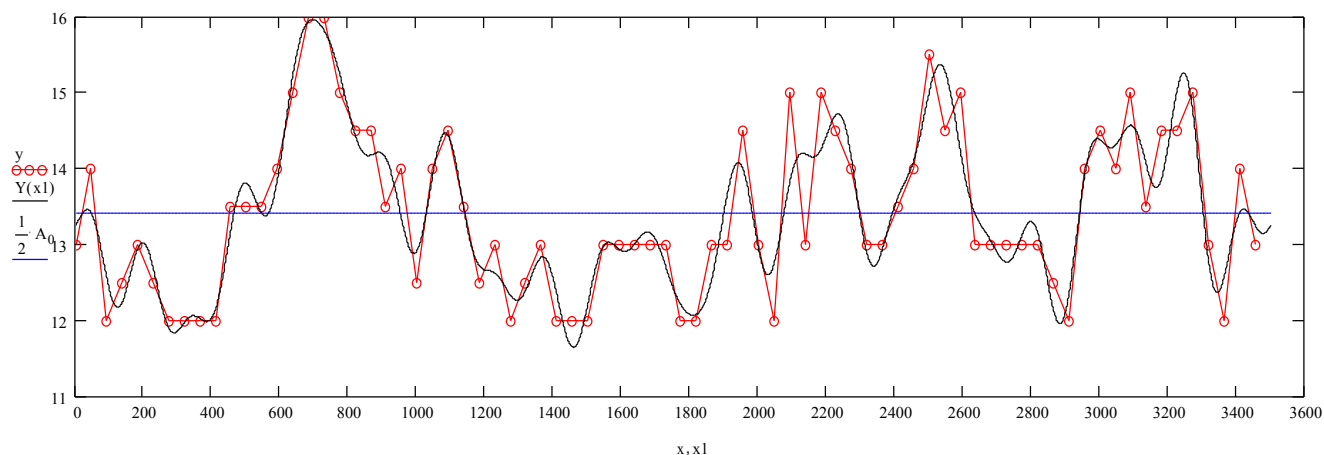


Из диаграммы видно, что среди факторов, вызывающих разнотолщинность, превалирует вторая и шестая гармоника. Наиболее вероятными причинами вариации толщины в данном случае служит несовершенство системы распределения охлаждающего воздуха. После модификации системы были проведены повторные испытания, в результате которых была получена пленка с распределением толщины, показанным на следующей профилограмме.

Среднеквадратичное отклонение толщины пленки уменьшилось до 8 процентов.

КОМПЛЕКСНЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ (КТ)

Комплексные системы КТ состоят, как правило, из трех элементов: сканирующего по ширине полотна или вокруг рукава датчика, исполнительного механизма расположенного в фильере или в



непосредственной близости и программного обеспечения, в функции которой входит обработка результатов измерения толщины, приведение в соответствие профиля толщины и позиции на фильере.

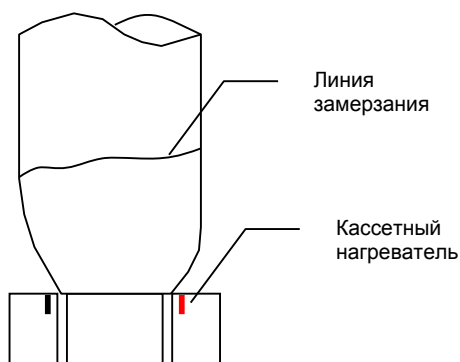
Перечислим основные методы регулирования толщины пленки в реальном масштабе времени технологического процесса. В процессе получения плоского полотна/пленки, например каст линии с плоскощелевой головкой, наиболее эффективным методом является способ регулирования зазора гибкой фильеры. Принцип работает достаточно просто: где датчик толщины измеряет толстую полосу, в этом месте фильера уменьшается и толщина становится меньше.

При изготовлении выдувной пленки в качестве метода КТ используется фактор самого раздува. Этот фактор способен перевернуть картину регулирования. Так увеличение зазора фильеры на плоскощелевой головке приводит к утолщению пленки, в то время как то же действие на кольцевой головке после раздува пленки, приводит к утоньшению.

Фактор раздува позволяет использовать большое разнообразие методов КТ. Это и регулирование температуры секторов фильеры с помощью нагревателей, встраиваемых в зоне формирующей кольцевой щели экструзионной головки; регулирование с помощью нагретого или охлажденного воздуха, скорости и температуры обтекающего рукав воздушного потока, инфракрасный нагрев пленки.

Сегодня в большинстве случаев поперечная толщина регулируется локальным нагревом соответствующих секторов экструзионной головки в зоне формирующей щели. Долгие годы монопольным владельцем патента на данную систему была немецкая фирма Windmoeller & Hoelscher, в связи с чем, применение данного способа сдерживалось.

Несмотря на, казалось бы, разные подходы к решению рассматриваемой проблемы, все методы объединены общим принципом, заключающимся в целенаправленном изменении термомеханического (релаксационного) состояния полимера на конкретных участках формирования пленки и в конкретных локальных зонах.



формирующей щели экструзионной головки, на которых толщина пленки, а, следовательно, и расход полимера больше. Этот принцип регулирования толщины пленки и заложен в соответствующий метод с

Как уже отмечалось выше, основной причиной, обуславливающей возникновение поперечной разнотолщинности пленок, является неравномерность расхода расплава полимера по периметру кольцевой формирующей щели экструзионной головки. Эта неравномерность вызвана не однородным полем перепадов давления и температуры, существующим в зоне спирального раздатчика экструзионной головки, которая не успевает выравниваться и в зоне ее формирующей щели. Учитывая тот факт, что расход является не только функцией перепада давления, температуры, но и реологических параметров полимера (времени релаксации, эластического модуля сдвига), зависящих от температуры, можно попытаться использовать это обстоятельство: локально дополнительно нагревать те зоны

использованием кассетных нагревателей. Как видно из нижеследующего рисунка, нагрев в локальной зоне приводит к «умягчению» материала и соответственно большему раздуву расплава между двумя фиксированными точками – фильеры головки и линии замерзания. Путь прохождения расплава удлинится, следовательно в этом месте пленка станет тоньше.

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, через 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 соответственно 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.



Как показывает практика, любые мероприятия по управлению качеством пленочной продукции окупаются достаточно быстро. Помимо этого, непрерывный контроль практически исключает производство некондиционной продукции, позволяет снизить влияние человеческого фактора, что дает дополнительный эффект, требующий индивидуальной оценки.

Использование систем контроля и управления качеством позволит продлить срок службы быстро морально стареющего оборудования 10 -20-летней давности. Однако впереди нас ждет борьба за доли процента и доли микрона, которые превращаются в десятки процентов рентабельности 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.

В работе использовались материалы интернет-изданий НПО АРСЕНАЛ ИНЖИНИРИНГ (www.engineering.ru), Plastics Technology (www.plasticstechnology.com), Индустрия Полимеров (www.polymerindustry.ru), коммерческие рекламные материалы фирм MACROENGINEERING, INC., GAP ITALY, SRL и других. Первая версия статьи опубликована в *Журнале «Индустрия упаковки», № 4 2005г.*