

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПЯТИКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ЛЕНТЫ ФЛОАТ-СТЕКЛА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В ГОРЯЧЕЙ ЗОНЕ ПЕЧИ ОТЖИГА

П. В. Волков, А. В. Горюнов, А. Д. Тертышник

НПП "Технологические электронные оптические системы" (г. Нижний Новгород)

В связи с ужесточением требований к качеству выпускаемой продукции необходим точный и непрерывный контроль различных параметров технологических процессов. В частности, для стекольной промышленности одним из ключевых параметров выпускаемой продукции является толщина. В настоящее время основная масса полированного стекла производится наиболее экономически эффективным флоат-методом. Очевидно, что для повышения качества продукции, а также для минимизации потерь стекломассы требуется непрерывный контроль толщины ленты стекла непосредственно в зоне формирования ленты либо сразу за этой зоной.

До недавнего времени на российских стекольных заводах и заводах стран СНГ единственным способом контроля толщины ленты был ручной на холодном конце линии. Недостатки такого метода очевидны. Во-первых, задержка между действиями операторов и измерением составляет 30 – 60 мин (с учетом времени на измерение). Во-вторых, измерения не являются непрерывными, а проводятся в лучшем случае 1 – 2 раза в час. На ряде западных предприятий установлены триангуляционные системы контроля толщины. Однако они имеют ряд серьезных недостатков, дороги и сложны в обслуживании.

В 2000 – 2002 гг. в ИФМ РАН были созданы первые прототипы автоматизированной системы технологического контроля толщины ленты стекла, основанной на принципах тандемной низкокогерентной интерферометрии [1]. Разработанные прототипы прошли промышленные испытания на Борском стекольном заводе, где и продолжают успешно работать по настоящее время. Однако стало очевидно, что необходима существенная переработка данных прототипов для создания промышленных приборов. В конце 2004 – начале 2005 гг. на стекольных заводах в г. Токмок (Киргизия) и г. Гомель (Белоруссия) были установлены приборы нового поколения с существенно улучшенными характеристиками надежности и точности.

Научно-производственное предприятие "Технологические электронные оптические системы" (НПП "ТЭОС"), основное направление деятельности которого заключается в разработке и выпуске систем автоматизированного контроля, было создано группой оптического приборостроения Института физики микроструктур РАН. К настоящему времени проведена полная переработка системы. Современный вариант сис-

темы удовлетворяет требованиям европейских стандартов, по сравнению с ранними вариантами [2] добавлен ряд новых возможностей.

Волоконно-оптическая низкокогерентная тандемная интерферометрия как метод дистанционного измерения толщины. Сначала кратко рассмотрим принцип работы системы, поскольку это неизменно вызывает много вопросов у потребителей. В данной статье мы не ставим перед собой цели описать все тонкости применяемого метода, однако хотелось бы остановиться на ключевых физических принципах, составляющих основу работы системы, так как это позволит лучше понять достоинства системы, ее точностные характеристики, а также широкие возможности по применению системы в различных областях науки и техники.

Метод измерений, который используется в нашей системе, носит название тандемная низкокогерентная интерферометрия. Принципиальная особенность метода — применение широкополосного источника света с малой длиной когерентности (в нашем случае суперлюминесцентного диода с шириной спектра около 40 нм и длиной когерентности примерно 20 мкм).

Остановимся на понятии "длина когерентности" и ее связи с шириной спектра источника. Для строго монохроматического источника длина когерентности равна бесконечности. Это означает, что если в некоторый интерферометр (например, Майкельсона) запустить пучок от такого источника, то интерференционные полосы на его выходе будут наблюдаться при любой разности длин плеч интерферометра. Иначе дело обстоит в случае источника с конечной шириной спектра. В этом случае интерференция может наблюдаться только при условии, если разность оптических путей интерферирующих волн меньше, чем длина когерентности, которую можно оценить как

$$L_{\text{coh}} = \lambda^2 / \Delta\lambda,$$

где λ — центральная длина волны источника;

$\Delta\lambda$ — ширина спектра.

Более подробно интерференция квазимонохроматического света рассмотрена в работах [3, 4].

Интереснее обстоит дело, когда свет от широкополосного источника последовательно проходит через два интерферометра. Такую пару часто называют тандемом интерферометров. В данном случае интерферен-

ция может наблюдаться тогда, когда разности длин плеч интерферометров отличаются друг от друга менее чем на длину когерентности источника, т. е. выполняется условие

$$|L_2 - L_1| < L_{\text{coh}},$$

где L_1 и L_2 — разности длин плеч первого и второго интерферометров.

При этом будет отмечаться интерференция двух волн: первой — прошедшей короткое плечо в первом интерферометре и длинное во втором, и второй — прошедшей длинное плечо в первом интерферометре и короткое во втором. В нашем случае одним из интерферометров выступает непосредственно лента стекла (низкодобротный интерферометр Фабри-Перо), освещаемая с расстояния 1,5 м, а второй измерительный интерферометр имеет возможность контролируемого изменения разности длин плеч. Интерферометры связаны посредством оптического волокна, что позволяет установить прецизионный измерительный интерферометр в благоприятных условиях, вдали от места измерения.

Для объективности картины кратко остановимся еще на одном методе измерения толщины ленты стекла — триангуляционном [5], в котором используется отражение наклонного пучка света от ближней и дальней поверхностей ленты и по измерению расстояния между отраженными пучками определяется толщина образца. Несмотря на простоту приведенной схемы она обладает рядом существенных недостатков. Отраженные от разных поверхностей пучки далее распространяются по различным путям. Следовательно, наличие турбулентности (а при высоких температурах в печи она неизбежна) ведет к появлению неконтролируемой ошибки, которая растет по мере удаления приемника от ленты. Кроме того, дрожание ленты и наличие клина (непараллельности плоскостей) по толщине также будет приводить к ошибке, величина которой будет расти по мере удаления от образца.

Таким образом, для точных измерений необходимо обеспечить малое расстояние между приемником и лентой стекла. Поскольку температура в зоне измерений высока (более 500 °С), существующие триангуляционные системы измерения в горячей зоне оснащены мощной системой водяного охлаждения и системой обдува оптических головок для защиты от атмосферы печи отжига. Необходимость поддержания постоянного расстояния до ленты приводит к достаточно сложной оптомеханической системе позиционирования головки. Кроме того, близкое расположение головки к ленте связано с опасностью поломки оптической головки в аварийных ситуациях на линии, таких как сильное коробление или обрыв ленты. Все это приводит к дороговизне как самой системы, так и ее обслуживания, а чувствительность системы к клину ленты — к заметным ошибкам измерения во время переходов с одной толщины стекла на другую.

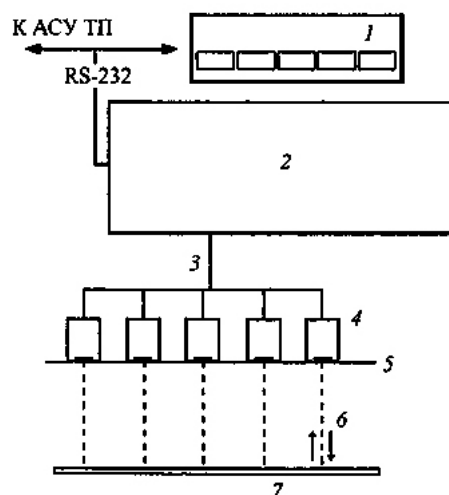


Рис. 1. Общая схема 5-канальной системы контроля
1 — индикатор; 2 — измерительно-управляющий оптико-электронный прибор; 3 — волоконно-оптический кабель; 4 — оптические головки; 5 — свод печи отжига; 6 — зондирующий пучок; 7 — лента стекла

Рассмотрим выпускаемую нами промышленную систему измерения толщины ленты стекла в горячей зоне флот-процесса, основанную на тандемной низкодобротной интерферометрии.

Автоматизированная 5-канальная система технологического контроля толщины ленты флот-стекла в режиме реального времени в горячей зоне печи отжига. Схема системы приведена на рис. 1. Тандем интерферометров, описанный выше, реализован следующим образом. Свет от суперлюминесцентного диода подается на вход прецизионного интерферометра, находящегося внутри оптоэлектронного блока. Интерферометр собран с возможностью прецизионного и контролируемого изменения разности длин плеч. На выходе из интерферометра свет попадает на оптоволоконный светоделитель, в котором он делится по числу измерительных каналов. От делителя свет поступает независимо в каждый канал по своему кабелю на оптические головки, которые представляют собой систему проецирования излучения из оптического волокна на ленту, а также сбора отраженного от ленты света обратно в волокно. Затем свет попадает на фотоприемные устройства, независимые для каждого канала. При сканировании разности длин плеч измерительного интерферометра на выходе каждого фотоприемного устройства появляется сигнал, соответствующий оптической толщине ленты стекла (т. е. произведению геометрической толщины на показатель преломления) в указанном канале. В результате получаем данные одновременных независимых измерений толщины стекла в нескольких каналах. При этом точность измерений по всем каналам одинакова и определяется измерительным интерферометром. В принципе, число каналов измерений может быть любым, однако, как показал опыт эксплуатации систем, оптимально иметь пять каналов, равномерно распределенных по ширине ленты.

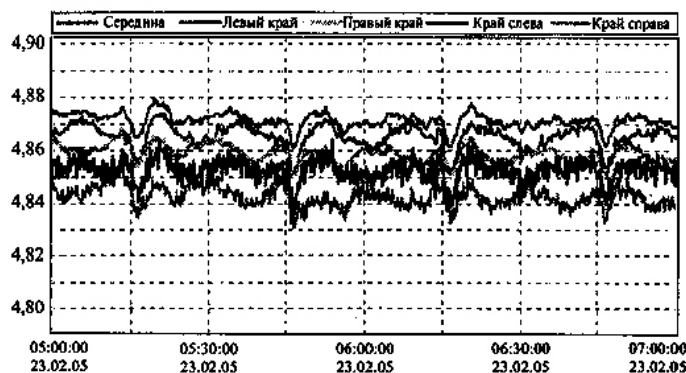


Рис. 2. Поведение толщины ленты стекла во времени. "Провалы" толщины по всем пяти каналам соответствуют переводу пламени в ванне расплава

Очевидные достоинства предложенного метода заключаются в простоте конструкции оптических головок, которые не содержат движущихся и электронных компонентов. Следовательно, оптические головки и вся система в целом не нуждаются в специальном охлаждении и обслуживании. Кроме того, зондирование ленты может осуществляться с достаточно большого расстояния (расстояние до ленты стекла 1,0 – 1,5 м), в результате чего не требуется защиты системы при аварийных ситуациях на линии. Таким образом, наиболее удобным и целесообразным местом крепления оптических головок является свод печи отжига как можно ближе к флоат-ванне, что значительно увеличивает оперативность управления технологическим процессом.

Приведем некоторые результаты работы системы на ряде предприятий (на начало февраля 2006 г. установлено шесть систем на следующих заводах: ОАО "Борский стекольный завод", Россия; ОАО "Гомельстекло", Белоруссия; ОсОО "Интергласс", Киргизия; ОАО "Саратовстройстекло", Россия).

Отметим, что для максимально эффективного использования системы операторам и технологам флоат-линии необходимо (помимо текущего контроля) иметь возможность просмотра поведения толщины ленты за прошедший период. В первых моделях системы ведение базы данных измерений и ее визуализация проводились силами потребителя системы. В настоящее время нами разработано собственное программное обеспечение, предлагаемое как дополнительная опция к системе.

На рис. 2 приведен график поведения ленты при выпуске стекла одной толщины. Видно, что в реальности толщина ленты имеет волнообразную структуру. Вообще, как показывает опыт, практически любая операция на флоат-линии дает отклик в толщине. Например, на рис. 2 видны периодические "провалы" в толщине ленты стекла. Как оказалось после анализа соответствия показаний системы и операций на линии, данные всплески обусловлены переводом пламени в ванне расплава с одной стороны на другую.

Поскольку метод измерения, составляющий основу системы, нечувствителен к клиновости и дрожанию

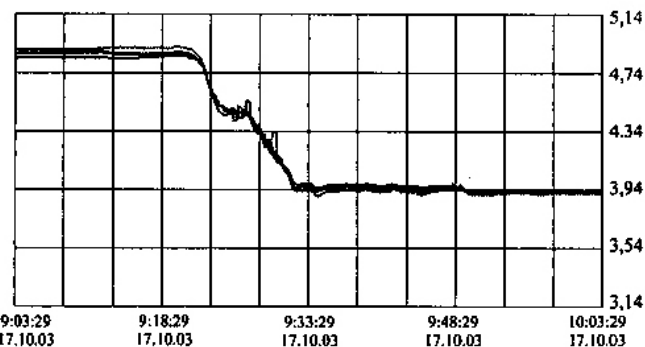


Рис. 3. График перехода с одной толщины стекла на другую на флоат-линии

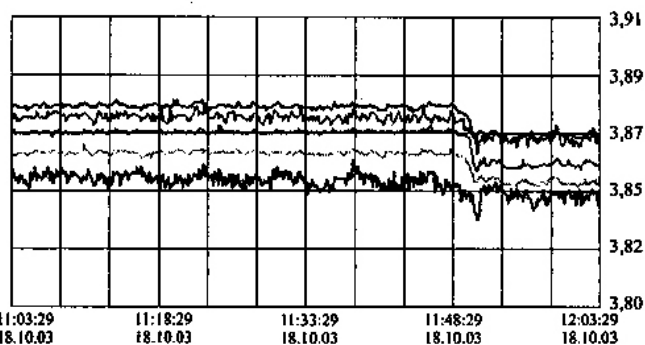


Рис. 4. Уменьшение разнотолщинности ленты стекла

ленты стекла, система позволяет наблюдать за его толщиной, в том числе во время переходов с одной толщины на другую. Такой контроль дает возможность существенно сократить продолжительность перехода. На рис. 3 приведен график перехода с одной толщины на другую на Борском стекольном заводе после двух лет эксплуатации системы. Видно, что переход длится 5 – 7 мин. Такое малое время перехода позволяет гибко управлять производством, выпускать наиболее востребованную на данный момент номенклатуру стекол.

Еще одна важная информация, которую можно получить с помощью системы, — разнотолщинность по ширине ленты. На рис. 4 приведен очень интересный момент, когда операторы уменьшают разнотолщинность за счет бортоформующих машин. Учитывая все более ужесточающиеся требования к разнотолщинности как автомобильных стекол, так и стекол, применяемых в стеклопакетах, непрерывный контроль толщины способен обеспечить дополнительные преимущества в конкурентной борьбе с другими производителями стекла благодаря более высокому качеству выпускаемой продукции.

Калибровка и метрологическая аттестация системы. Измеряемой величиной при работе системы является оптическая толщина ленты стекла. Она определяется как

$$D = nd,$$

где D — оптическая толщина ленты стекла;
 n — эффективный показатель преломления;
 d — геометрическая толщина ленты стекла.

Кроме того, следует учитывать температурное расширение ленты в зоне измерения.

Таким образом, для определения геометрической толщины ленты стекла после охлаждения необходимо измеренную системой оптическую толщину разделить на эффективный показатель преломления, который зависит от различных параметров, таких как температура в зоне измерений, состав шихты. Однако накопленный опыт свидетельствует о том, что при отлаженном технологическом процессе разброс показаний, связанный с нестабильностью температуры и состава шихты, не превышает 5 мкм. Поэтому система не требует непрерывной проверки, а достаточно проделать процедуру калибровки один раз при пусконаладочных работах.

Опыт эксплуатации системы указывает на то, что желательно иметь дополнительный измерительный канал, расположенный не на печи отжига, а рядом с оптоэлектронным блоком системы. Достоинство наличия такой оптической головки заключается в том, что потребитель может контролировать работу системы, помещая калиброванные стекла в данную головку. Очевидно, что поместить калиброванное стекло под головку в горячей зоне не представляется возможным. Кроме того, оптическая головка может быть установлена в службе ОТК, для нее можно провести метрологическую аттестацию и в дальнейшем использовать в качестве измерительного инструмента для контроля выпускаемой продукции. При этом если головку замкнуть на измерительные каналы в горячей зоне, то можно обеспечить автоматическую калибровку системы. Такая доработка системы представляется нам очень важной и даст возможность существенно расширить функциональность системы.

Основное назначение выпускаемой системы — технологический контроль толщины ленты стекла. Как видно из приведенных графиков, непрерывный контроль толщины стекла позволяет сократить продолжительность перехода с одной толщины на другую до 5–10 мин. Имея такой контроль, операторы могут держать толщину ленты вблизи нижней границы допу-

ска, что также ведет к экономии стекломассы. Кроме того, удастся существенно уменьшить разнотолщинность по ширине ленты. Поскольку в современных отраслях строительной и автомобильной промышленности предъявляются все более ужесточающиеся требования к качеству стекла, данный эффект также является немаловажным.

К основным достоинствам системы можно отнести ее простоту и небольшие затраты на обслуживание. Система не требует дополнительного охлаждения и потребляет не более 300 Вт электрической мощности, что сравнимо с потреблением современного персонального компьютера. Кроме того, удачное расположение оптических головок на своде печи отжига позволяет полностью обезопасить систему от повреждения при аварийных ситуациях, таких как обрыв ленты.

В настоящее время установлено шесть таких систем на стекольных заводах России и ближнего зарубежья. Шестилетний опыт эксплуатации свидетельствует об их высокой надежности и стабильности в работе. По оценке специалистов, эксплуатирующих систему, срок ее окупаемости составляет около полугода.

Другое перспективное применение новых измерительных систем состоит в измерении размеров стеклоизделий сложной формы, например толщины стенок и донышек бутылок и толщины тонких стеклянных трубок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптическая интерференционная система технологического контроля толщины ленты флоат-стекла на горячих стадиях производства / М. А. Новиков, А. Д. Тертышник, В. В. Иванов и др. // *Стекло и керамика*. — 2004. — № 2. — С. 5–9.
2. Новые промышленные системы на базе волоконно-оптической низкокогерентной тандемной интерферометрии / П. В. Валков, А. В. Горюнов и др. // *Фотон-экспресс*. — 2004. — № 6. — С. 184–188.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1970.
4. Кульчин Ю. Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. — М.: Физматлит, 2001.
5. Marinelle M. Float and Automotive Glass on-Line Quality Control // *Glass-Technol. Int.* — 1997. — Iss. 3. — P. 7–11.