

Введение Существующие методы неразрушающего контроля для определения качества соединения пластмассовых изделий часто неудовлетворительны или экономически не выгодны [1-3]. Поэтому, детальная оценка качества сварки и склеивания часто возможна только деструктивными механическими и оптическими методами тестирования. Так, например, неразрушающий контроль качества в сварочной технике ограничен сегодня профилактическим мониторингом параметров сварочных аппаратов. Прочность клеевых соединений, на основе большого разнообразия возможных комбинаций пластмасс и клеев часто характеризуются, кроме того, различными методами смачивания поверхности тестовыми жидкостями. Из результатов смачивания определяются возможности их адгезионного потенциала. С этой целью, может быть использован способ для характеристики кислотно-основных свойств и взаимодействий между полимерным субстратом и клеем [4,5]. После склеивания всё же проводится разрушаемое механическое тестирование. Основные методы неразрушающего контроля специфичны каждому конкретному случаю [6]. Они зависят от области применения, соединительного метода, используемого дизайна, внешних воздействий и т.д.. Целенаправленные механические испытания обеспечивают хорошие и надежные результаты, но в то же время они ограничены конструкцией образцов, их геометрией и условиями нагружения. Механические тесты требуют так же определенных усилий подготовки образцов определённого количества для исключения статистических факторов. Кроме того, испытываемые образцы разрушаются во время теста. Поэтому надежный неразрушающий контроль качества пластиковых соединений имеет огромный потенциал для всей индустрии пластмасс. Из экономических соображений это особенно интересно для дорогих и сложных конструкций. Теоретические аспекты Терагерц (ТГц)-излучение используется в настоящее время в различных областях применения: в медицине для визуализации различных жидкостей, для контроля безопасности, в сверхбыстрых системах связи, а так же для контроля производства [7]. Эти приложения приводят, соответственно, к быстро прогрессирующему развитию различных ТГц-систем [8]. Особенно интересны новые ТГц-технологии для неразрушающего контроля соединения пластмасс, потому что все неполярные, а так же некоторые полярные полимеры почти прозрачны для ТГц-волн [9,10]. Как раз это и позволяет использовать неразрушающий контроль и бесконтактное обнаружение дефектов и пустот, которые обладают, в общем, иными свойствами в ТГц-диапазоне (например: оптическая толщина, коэффициенты преломления, поглощения и т.д.) и открывает в различных отраслях промышленности пластмасс огромный, частично уже продемонстрированный, потенциал для технологического контроля качества клеевого или сварного шва [11]. Хотя терагерцовый диапазон (от 0,1 ТГц до 10 ТГц) почти целое столетие находился в поле зрения интересов исследователей, он же оказался одним из самых сложно реализуемых в области

электромагнитного спектра. Долгое время раздел между микроволновыми волнами и дальним инфракрасным (ИК) излучением также называли "ТГц разрыв". Ни оптические, ни сверхвысокочастотные устройства и компоненты не могли полностью открыть эту теневую область с ее многими скрытыми научными и техническими ресурсами. Однако в недавнем прошлом, исследователи сумели решить эту задачу с помощью более эффективных передатчиков и приемников. В настоящее время прикладные и фундаментальные исследовательские институты постепенно подходят к использованию техники с более эффективными излучателями и детекторами из соседних частотных диапазонов и новых оптоэлектронных компонентов для исследования ТГц-разрыва [12]. Одна из возможностей генерации и обнаружения ТГц излучения основанна на коротких оптических импульсах с помощью светочувствительных антенн. Исходной точкой является использование коротких световых импульсов, что представляет собой новейшие разработки в области фемтосекундных (фс) лазеров. Последние применяющиеся фс-лазеры, основанные на стекло-волокне, работают на длине волны 1.550 нм и доставляют оптические импульсы длительностью от 100 фс с частотой повторения около 100 МГц. Оптические лазерные импульсы, попадая на полупроводниковые структуры (для 1.550 нм например InGaAs / InAlAs), генерируют свободные носители заряда. На полупроводниковом материале размещена металлизированная структура, к которой подключен электрический потенциал. Генерируемые в полупроводнике оптическим импульсом лазера свободные носители заряда ускоряются под влиянием внешнего электрического поля. Ускорение свободных заряженных частиц в соответствии с формулами Максвелла производят излучение, которое в настоящем случае может иметь вид ТГц импульса (рис. 1). Рис. 1 - Схематическое изображение антенны для генерации терагерцового излучения [3] ТГц-импульс формируется с помощью использования кремниевой линзы и фокусируется на исследуемый образец. ТГц-импульсы отражаются на границах пластикового образца и обнаруживаются с помощью специального приемника. Последующее техническое обеспечение оценивает обнаруженные сигналы и передает их оператору в виде графиков или изображений. Широкий обзор, а так же внедрение ТГц технологий (теоретическая основа, эксплуатация, технические данные и т.д.), методика визуализирования импульсов ТГц, описываются в работах [11-15]. Подробности анализа полимеров с помощью ТГц-излучения (метрология, спектроскопия и т.д.) описывает диссертация Витцке [7]. Экспериментальная часть В научно-исследовательском проекте «Развитие портативной измерительной системы на основе терагерцовой спектроскопии во временной области для неразрушающего контроля сварных и клеевых соединений» был разработан и испытан демонстратор для неразрушающего контроля сварных и склеенных пластмассовых изделий. Чтобы оценить возможности и пределы разработанного ТГц-спектроскопа, были

изготовлены различные пластиковые образцы с различной геометрией и использованием разных соединительных процессов (сварка нагревательным элементом, ИК-сварка, экструзионная сварка, а так же склеивание). Образцы с определенными заданными дефектами были подготовлены таким образом, что бы применение нового спектрометра, особенно в режиме отражения, могло быть тщательно оценено. Кроме того, были произведены бездефектные образцы для контрольных измерений. Параллельно с подготовкой образцов был разработан новый спектрометр, который работает как в режиме пропускания, так и в режиме отражения. Спектрометр был так же адаптирован для использования в проверке качества сварных и клеевых пластиковых соединений [3]. Система была разработана для исследования образцов со сложной геометрией. Для этого применялись новые, мощные антенны и была повышена устойчивость системы путем интеграции новых компонентов, а так же разработана новая концепция измерений в режиме отражения. Эти шаги сопровождалось разработкой программного обеспечения для измерений, моделирования и управления программой для первых результатов проверки и снижение барьера для промышленного использования и оценки результатов. Измерения ТГц-системой впоследствии подлежало сравнению с результатами других систем неразрушающего контроля (в том числе промышленной компьютерной томографии, ПКТ) и деструктивных, механических и оптических методов испытаний для тщательной оценки системы и её параметров. Результаты Для измерений в режиме отражения была использована система ТГц с измерениями во временной области, основанная на стекловолоконно-связанных антеннах и квази-линз из полиэтилена (ПЭ). Подробное описание использованной системы и её отдельных компонентов (включая измерительную насадку) представлены в [3]. Для правильной установки измерительной системы во временной области берутся два импульса отражения ТГц волн (на входящей поверхности воздух-пластик и выходящей пластик-воздух). Если сварное или клеевое соединение является бездефектным, то отчетливо видны только два пика. Если в сварном или клеевом шве имеются пустоты или расслоение (например деламинация), то (как в многослойной системе между входящими поверхностями воздух-пластик, и выходящими пластик-воздух) появляется дополнительный слой воздуха. На границах многослойной системы происходит дополнительное отражение импульсов ТГц в связи с разными индексами преломления на переходах. Так, помимо главного отражения импульса, на переходах с разными коэффициентами преломления происходит отражение дополнительных эхо-импульсов, которые так же могут быть обнаружены, даже в режиме отражения. На рисунке 2 показан пример исходных данных временной области ТГц. Измерения были проведены в режиме отражения в области неповрежденного сварного шва (сплошная линия) и в районе деламинации (пунктирная линия) сварного образца из полиэтилена высокой плотности (HD-PE) толщиной 15 мм (размеры 65 x 65 x

15 мм). Рис. 2 - Сигналы системы ТГц в режиме отражения. неповрежденного образца (сверху, сплошная линия) и неисправного соединения с расслоением шва (внизу, пунктирная линия) На первой межфазной границе ПЭ-воздух и соответственно воздух-ПЭ при нормальном падении, амплитуда импульса эха составляет 4 % от начальной амплитуды основного излучаемого импульса. Тем не менее, даже с таким соотношением сигнала к шуму, как показано в приведенном выше примере, амплитуды импульсов могут быть однозначно идентифицированы во временной области. Такое эхо импульсов может быть ещё более чувствительно обнаружено с помощью анализа колебаний Фабри-Перо. Так же для автоматизированного и надежного определения таких маленьких амплитуд может применяться так называемое квази-пространство (QS) [7,18]. Возможность выбора определяющих порогов для пиковой амплитуды в квази-пространстве позволяют также однозначное определение и различие соединений на бездефектные и расслоённые (рис. 3). Верхний и левый график рисунка 3 показывает значение QS в зависимости от глубины интерфейса в направлении толщины (в расчете от оптической толщины с известным показателем преломления образца в ТГц диапазоне). Первый пик в квази-пространстве обнаруживается примерно после 15 мм. Это указывает на интактный сварной шов без расслаивания. Первой обнаруженной поверхностью является таким образом внешняя поверхность второго пластикового листа в направлении распространения ТГц импульса. Это указывает на образец с хорошей сварной площадью. Нижний график на рисунке 3, показывает в отличие от верхнего два пика: описанный выше, который образуется на задней поверхности компонента, и другой, более выраженный после 7,5 мм. Это расстояние в точности соответствует толщине сварных полимерных листов. Таким образом, в районе сварного шва (или клеевого соединения) имеется отслоение, и новый интерфейс в компоненте приводит к дополнительному отражению ТГц сигнала и соответственно - к образованию импульса. Не отражённый на внутренней границе часть ТГц импульса продолжает распространяться сквозь материал и отражается на поверхности компонента (незначительный сигнал около 15 мм). Рис. 3 - Эскиз сварного образца (справа) и распространения ТГц импульса (слева). У интактного соединения первый интерфейс обнаруживается около 15 мм (сверху), это задняя сторона образца. При измерении расслоенного соединения обнаруживается еще один пик (внизу). Измеренные отражения показаны справа на картинке Из времени распространения ТГц импульса и знания индекса преломления в диапазоне ТГц может быть получена информация о глубине ошибки. Так с помощью представленной системой вполне возможно быстро и воспроизводимо идентифицировать ошибки образцов до толщины образцов около 15 мм [3]. При известной информации глубины возможной ошибки (как это часто бывает в сварных и склеенных пластиковых соединениях) измерения могут быть также

выполнены в реальном времени с помощью представленной ТГц системы. Для качественной оценки и проверки системы в проведённом исследовательском проекте измерения ТГц были сравнены с другими системами неразрушающего контроля (как например индустриальная компьютерная томография (ИКТ)). Системы ИКТ проявились в ранее исследовательских проектах [2,19] как очень эффективный метод обнаружения ошибок с довольно высоким разрешением. Результаты методов измерения ТГц были поэтому тщательно сравнены с результатами измерений в области ИКТ [3]. Рисунок 4 показывает прямое сравнение результатов оптически непрозрачного склеенного полиэфирэфиркетона (РЕЕК) с размерами 24 x 100 x 8 мм полученными с помощью ИКТ и представленной ТГц системой. ТГц система работала во временной области, в соответственном режиме отражения. Визуализированное измерение ТГц системы показывает только клеевой слой образца. При прямом сравнении двух систем отмечается меньшее разрешение ТГц системы. Но, несмотря на низкое разрешение, расслаивания в клеевой области могут быть обнаружены очень четко с обеими системами. Воздушный зазор (дефект) в данном образце составляет примерно 100 мкм. Рис. 4 - Прямое сравнение и оценка ИКТ (слева) и измерения ТГц (справа) склеенного образца РЕЕК с определенными в шов специально внесёнными дефектами (воздух) На рисунке 5 представлены возможности обнаружения дефектов с помощью двух измерительных систем в оптически непрозрачных образцах полипропилена (ПП) с размером 65 x 50 x 6 мм. Образец был сварен в процессе экструзионной сварки (WE). Сразу после сварки сварной шов был принудительно охлаждён сжатым воздухом для получения полостей (пустот). Так, по сравнению с другими образцами, поверхность этого образца имеет дополнительную сложность на основании трехмерной поверхности. Рис. 5 - Сравнение и оценка измерения ИКТ (слева) и наложенного оптического и ТГц изображений (справа) сваренного PP образца с определенными ошибками (здесь вакуоли) Узнаваемым является сильное затухание сигнала ТГц вследствие неровной поверхности сварного компонента ПП. Тем не менее, полости могут быть обнаружены обоими методами. Для измерения ТГц системой, диаметр некоторых полостей был ниже максимально возможного разрешения системы. Эти дефекты не были обнаружены ТГц-системой при измерении в режиме отражения. Обсуждение результатов Если сравнивать возможности изображения двух представленных методов неразрушаемого контроля, то можно легко заметить значительно более высокое разрешение компьютерного томографа (разрешение приведённого устройства было около 40 микрон) с более низким разрешением ТГц системы. Максимально возможное разрешение измерительных ТГц систем в настоящее время, часто ограничивается дифракцией и составляет в приведённом примере около 300 микрон. Тем не менее, значительно лучшие результаты и с более высоким разрешением возможны в случае продольного распространения ТГц волн. Опыт

показывает, что решения в диапазоне от около 50 мкм и менее возможны в таких случаях. ИКТ позволяет трехмерное представление сканируемого объекта, настоящая и представленная методика измерения ТГц системами, может представить оператору только информацию о глубине дефектов. Сравнивая воздействие на человека и окружающую среду, можно предположить, что ТГц излучение не несет эффекта ионизации (при использовании интенсивностей, которые используются для контроля пластика). Тем не менее, использование ионизирующего рентгеновского излучения в области неразрушающего контроля с помощью ИКТ требуется очень высокий уровень безопасности. Поэтому, не существует мобильных ИКТ или аппаратов на основе рентгеновского излучения которые позволяют использование этой технологии на месте. Если сравнивать экономические стороны двух представленных систем или давать оценку стоимости тестирования, следующие факторы играют решающую роль. Цена ИКТ превышает цену ТГц систем с огромным отрывом. Стоимость системы ИКТ порядка 400.000 евро, что значительно превышает стоимость адаптированного к конкретным требованиям ТГц-спектрометра, которая, вероятно, в ближайшее время будет находиться на уровне цен обычного испытательного оборудования (около 40.000 евро). Сегодня, цена оптических ТГц систем, основанных на технике во временной области, находится на уровне 50.000 евро. В связи с высокой мобильностью ТГц систем по сравнению с ИКТ, спекроскоп может быть использован в режиме реального времени для испытаний сваренных и склеенных компонентов, а так же интегрирован в различные существующие процессы переработки пластмасс. Системы ИКТ имеют ограниченную портативность и тем самым могут только частично интегрироваться в процессы, или же с большими экономическими усилиями и огромными мерами безопасности. Тем не менее, решающим фактором в использовании новых методов неразрушающих испытаний в соединяющих сварочных и клеевых технологиях является восприятие этих новых методов тестирования промышленностью. По сравнению с традиционными методами (включая ИКТ) новые методы измерения, такие как ТГц, ждёт еще долгий путь промышленного испытательного срока. Однако шансы, что эти новые ТГц технологии, особенно работающие в режиме отражения, найдут постоянное место применения в области неразрушающего контроля соединений, довольно велики. Это подтверждает представленный и продемонстрированный потенциал.

Заключение и перспективы В заключение представленной исследовательской работы можно резюмировать, что технология ТГц измерения не революционизирует мир неразрушающего контроля пластиковых соединений немедленно. Тем не менее, в ближайшее время ТГц системы могут быть доступны в качестве дополнительного инструмента для контроля качества, удовлетворяя так же огромный спрос в области неразрушающего контроля и анализа соединений в различных промышленных процессах.