

Секция
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ

МИКРОВОЛНОВЫЙ КОНТРОЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ГАЗОВОГО ПУЗЫРЯ ПРИ ЛИТЬЕ ПЛАСТМАССЫ

А.С. Сурков¹, К. Sklarczyk¹, М. Kröning¹, G. Dobmann¹, К. Langenberg², В.К. Кулешов³

1. Фраунгоферовский институт неразрушающих методов контроля IZFP

Саарбрюкен, Германия

2. Университет г. Кассель, Германия

3. Томский политехнический университет

В работе рассматриваются результаты разработки микроволновой системы технологического контроля распространения газовых пузырей в жидкой пластмассе при литьевом изготовлении деталей в пресс-форме. Данные экспериментальных исследований в реальных условиях и на моделях подтверждены модельными расчётами методом конечных элементов с использованием программы ANSYS.

In the paper results of the development of microwave technological control system of gas bubble distribution at injection moulding of hollow plastics products are described. Experimental data are confirmed by modelling calculations by the finite element method with program ANSYS.

Фраунгоферовский институт IZFP разработал контрольно-измерительную систему, позволяющую наблюдать за распространением газового пузыря при экструзионном литье с газовым впрыскиванием (*GIT*-процесс). При *GIT*-процессе речь идет об экструзионном методе, при котором после впрыскивания жидкой пластмассы в литьевую форму в последующем впрыскивается инертный газ. В то время как пластмасса на стенках формы сразу после впрыскивания застывает, пластмасса во внутренней части формы остается еще жидкой и может вытесняться газом. Таким образом получают полый предмет без дополнительной технической обработки. В самом простом варианте литьевая форма только частично наполняется и жидкая пластмасса посредством газового впрыскивания «надувается». При всех вариантах процесса желательным является постоянный контроль положения и размеров газового пузыря внутри формы.

Разработанная система основывается на облучении объекта контроля электромагнитными волнами миллиметрового диапазона и регистрации обратно рассеянных волн тем же самым датчиком с дальнейшей обработкой сигналов системным блоком. Система контроля регистрирует приближение и проход воздушного пузыря в режиме онлайн. Такой контроль процесса распространения газового пузыря непосредственен и более быстродействующий по сравнению с используемыми до сих пор измерениями температуры и/или давления в прессформе. Контроль прохождения пузыря ультразвуковым методом также возможен [1]. Однако сложности подсоединения датчиков к высокотемпературной жидкой пластмассе, находящейся при давлении до $2 \cdot 10^5$ Па, неоднозначные зависимости параметров измеряемых сигналов и сложная интерпретация результатов усложняют технологический контроль. На рис. 1 схематично представлена конструкция литьевой пресс-формы экструдера с присоединённым микроволновым датчиком (далее датчик), а на рис. 2 приведена фотография экструдера со смонтированной системой контроля. Микроволны с частотой 90–93 ГГц генерируются осциллятором модуля радара *FMCSW* (**F**requency **M**odulated **C**ontinuous **W**aves) и подводятся в полый прямоугольный волновод. Через адаптер микроволны попадают в ци-

линдрическое отверстие-волновод в стенке пресс-формы и через окно из тефлона попадают во внутреннюю часть пресс-формы (рис. 1). Конусообразное окно из высокотемпературного тефлона защищает волновод от расплавленной пластмассы и обеспечивает ввод микроволн в пресс-форму. Размеры внутренней части пресс-формы составляют 200×15×15 мм, выходное отверстие волновода находится примерно в 40 мм от конца пресс-формы. Тип литейной машины-*Ferromatik K110 S/2 F*.

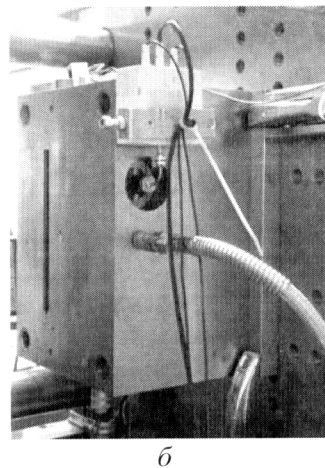
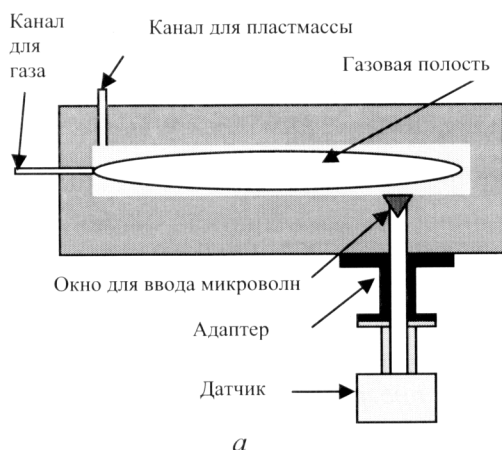


Рис. 1. Схема конструкции литейной пресс-формы экструдера и размещения датчика (а) и вид экструдера со смонтированной системой контроля (б)

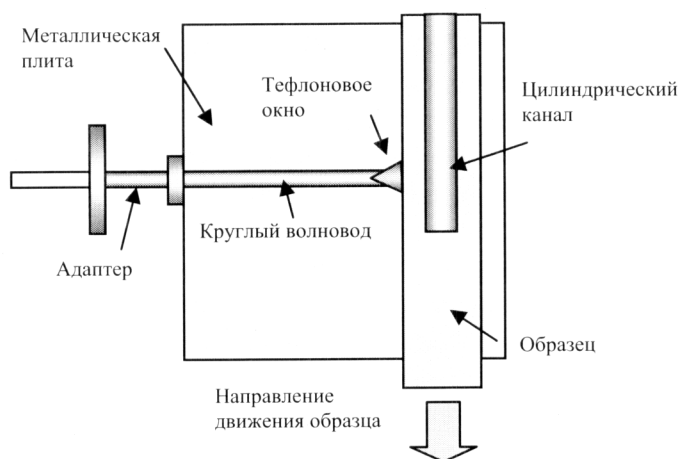


Рис. 2. Схема измерений на рассверленных образцах пластмассы

Высокочастотный датчик системы контроля с возможностью регулировки частоты излучения в диапазоне 90–93 ГГц выполнен на микрочипе *MMIC* (Millimeterwave Monolithic Integrated Circuit) на базе *GaAs* и разработан во Фраунгоферовском институте MFA, Фрайбург. Чип имеет размеры 2×3 мм², недорог и содержит все высокочастотные конструктивные элементы: настраиваемый осциллятор с полосой частот 4–5 ГГц, направленный ответвитель, смеситель и управляемый напряжением усилитель.

Ранее проведенные экспериментальные исследования на экструдере показали высокую эффективность микроволнового метода для контроля процесса литья [2]. В экспериментах с распространяющимся в пластмассе газовым пузырьком были найдены отчетливые скачки сигналов датчика, которые не встречались в отсутствие газа. Изменения сигнала могли обуславливаться прохождением пузыря мимо позиции датчика, однако имелись сомнения, так как изменения величин измеряемых сигналов встречались значительно позже ожидаемого

времени прохождения пузыря мимо позиции датчика. Также в зависимости от материала пластмассы скачки амплитуды сигналов при прохождении газового пузыря мимо позиции датчика вопреки схожим диэлектрическим свойствам пластмасс были разной амплитуды и их полярность могла оказываться положительной или отрицательной.

Также и при распространении только пластмассы не было возможности найти корреляцию между процессами в пресс-форме и сигналами датчика. Поэтому были предприняты дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования для установления корреляции между сигналами микроволнового датчика и стадиями процесса экструзионного литья. С помощью пакета программ *ANSYS* нами были выполнены расчёты коэффициента обратного рассеяния микроволн в модели системы технологического контроля распространения газовых пузырей в жидкой пластмассе. Для синхронизации сигналов с положением газового пузыря и пластмассы в пресс-форме в экспериментах были выполнены прямые оптические наблюдения процесса литья.

Экспериментальные исследования

Перед экспериментом с синхронным проведением микроволновых и оптических измерений были проведены исследования на рассверленных образцах пластмассы, которые помогли также частично объяснить ранее полученные данные. Измерительное устройство показано на рис. 2. Микроволновые измерения проводились с использованием системы, базирующейся на векторном схемном анализаторе HP8150C. От синтезатора в полосе частот от 75 до 100 GHz (*W*-канал) микроволны подводились к модели литьевой формы. В металлической плите было высверлено цилиндрическое отверстие, выполняющее роль волновода. Через тефлоновое защитное окно микроволны поступали в сменные образцы из пластмассы с квадратным поперечным сечением (длина 190 мм, высота 15 мм, ширина 15 мм), рассверленные по длинной оси на глубину 95 мм. Диаметры цилиндрических каналов были 4, 6, 8, 10 и 12 мм). Образец передвигался с помощью компьютеризованной системы перпендикулярно волноводу, при этом рассверленное отверстие образца также перемещалось относительно отверстия волновода, имитируя распространение воздушного пузыря в пластмассе. Выходное окно волновода находилось на высоте оси цилиндрического канала образца. Оценивалось изменение сигнала, которое наблюдалось при проходе конца цилиндрического канала образца мимо окна волновода. Продвигая образец относительно позиции датчика и нанося на график значения модуля коэффициента отражения в зависимости от частоты микроволнового излучения и позиции образца, получим трёхмерную диаграмму, показанную на рис. 3.

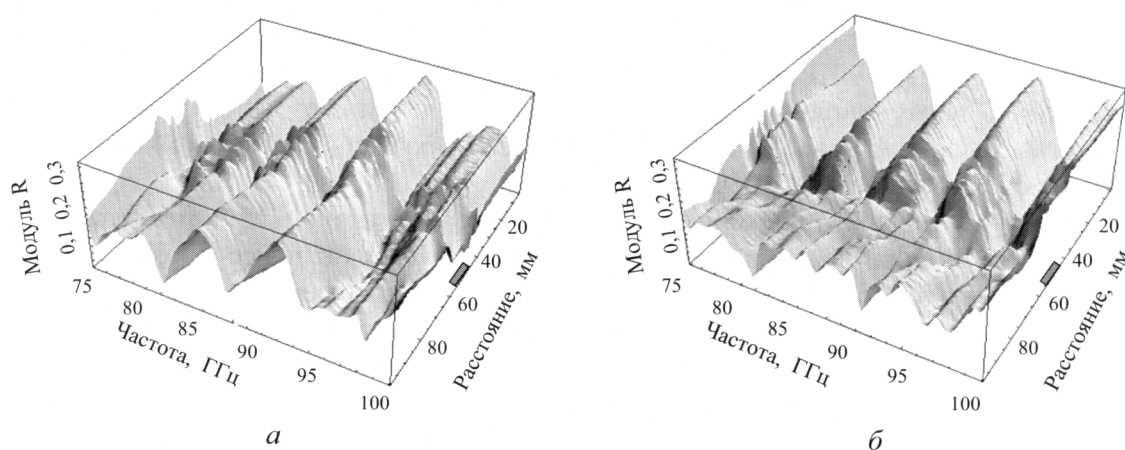


Рис. 3. Модули коэффициента обратного рассеяния микроволн в зависимости от положения канала и частоты микроволн. а-полиоксометилен, диаметр канала 6 мм; б-плексиглас, диаметр канала 12 мм. Прямоугольником показано расположение выходного окна волновода

Для полиоксометилена (*POM*) при диаметре отверстия 6 мм найдены регулярные минимумы и максимумы значений сигнала в зависимости от частоты излучения при любом положении цилиндрического канала относительно волновода. При прохождении цилиндрического канала мимо окна волновода возникают нерегулярности спектра. Для частот микроволнового излучения 81,5–93,7 ГГц значения модуля коэффициента отражения микроволн при исходной и конечной позициях образца имеют подобные значения. Для плексигласа, напротив, наблюдается нерегулярный спектр сигналов при диаметре канала 12 мм в области расверловки (рис. 4). Здесь имеется значительное различие в значениях модуля коэффициента отражения в зависимости от положения цилиндрического канала. После прохождения каналом позиции волновода интенсивность сигнала уменьшается. В переходной области длиной примерно 10 мм имеются нерегулярности амплитуд сигнала.

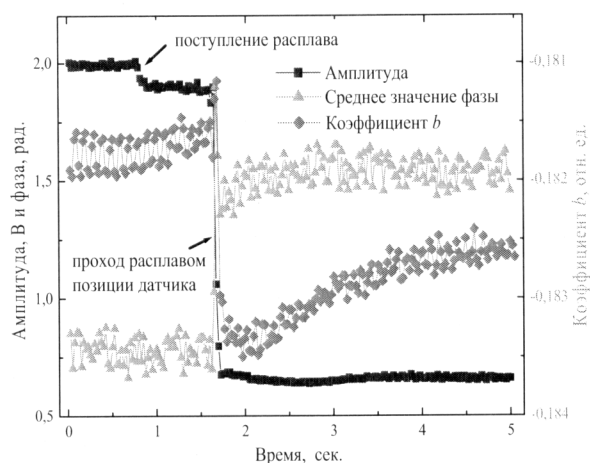


Рис. 4. Максимальная амплитуда, средняя фаза и коэффициент b в зависимости от времени процесса литья для полистирола без газовой инжекции

Экспериментальные результаты показали, что в сплошном материале образуется стоячая волна с выраженными минимумами и максимумами. При наличии в образце цилиндрического канала, стоячая волна в канале образуется при диаметре канала, пропорциональном половине длины волны и при «подходящих» значениях диэлектрической константы материала.

Для синхронизации микроволновых сигналов с положением пластмассы и воздушного пузыря в пресс-форме в процессе литья синхронно с частотно модулированным широкополосным 90 ГГц-радаром *FMCW* стали записываться показания оптической камеры. С противоположной от микроволнового датчика стороны стальная стенка пресс-формы была частично заменена на оптически прозрачное двухслойное окно, состоящее из слоя плексигласа толщиной 45 мм и стеклокерамики толщиной 5 мм. Стеклокерамика предотвращала плексиглас от расплава и помутнения. При этом мы полагали, что факт замены части задней металлической стенки пресс-формы частично прозрачным для микроволн окном качественную картину результатов измерений не ухудшит. Использовались гранулы полистирола (*PS*), полипропилена (*PP*) и олефинового полимера (*COC*), причем проводились попытки без и с газовой (азотной) инжекцией. Каждая картинка оптической черно-белой камеры *PULNiX* имела разрешение 648×484 пикселя. Частота кадров составляла 40 Гц. За эксперимент снималось 200 изображений. Синхронно с оптическими измерениями записывались сигналы радара. Длина принятого дифференциального сигнала составляла 512 точек, частота выборки 40 кГц. Записывалась соответственно только одна восходящая или спадающая части

импульса линейно изменяющегося напряжения сигнала модуляции треугольной формы частотой 40 Гц. Сигналы микроволнового датчика отфильтровывались полосовым активным фильтром Ithaco. При анализе данных происходила дополнительная фильтрация сигналов согласно программному обеспечению. Часть сигнала возбуждения смешивается с регистрируемым сигналом, из чего получается низкочастотный, обрабатываемый обычной электроникой, сигнал (*ZF*-сигнал). Он содержит все сведения об амплитуде, фазе и частоте отраженных и рассеянных в объекте микроволн. Регистрируемыми величинами были максимальная амплитуда и фаза низкочастотного сигнала. Фаза рассчитывалась после определения с помощью преобразования Гилберта принадлежащей к реальной части мнимой части. Фаза могла быть определена в различных местах низкочастотного сигнала (в начале, в середине, в конце а также средняя фаза). Фазовременная зависимость дополнительно аппроксимировалась полиномом 3-го порядка ($y=a+bx+cx^2+dx^3$) и из этого рассчитывался коэффициент b при x^1 , который в основном определяет частоту низкочастотного сигнала (равен временной производной фазы). Для сбора и хранения данных использовалась написанная в IZFP программа LabView, а для анализа данных программа на базе пакета Mathematica. Электрический вектор волнового поля был ориентирован вертикально к длинной оси литьевого объёма.

Результаты

При входе расплава в литьевой объём обнаруживается незначительное уменьшение в амплитуде *ZF*-сигнала, а фаза и коэффициент остаются неизменными. Изменение амплитуды *ZF*-сигнала вследствие проникновения расплава в литьевой объём видно не на всех диаграммах, так как иногда процесс измерения запускался немного позже. При прохождении расплава мимо позиции датчика происходит значительное и резкое уменьшение амплитуды, фазы и частоты *ZF*-сигнала, рис. 4. При этом часто встречались осцилляции *ZF*-сигналов. При прохождении газового пузыря мимо позиции датчика амплитуда *ZF*-сигнала также резко изменяется, но на меньшее значение и увеличивается. Также изменяются фаза и частота *ZF*-сигнала (рис. 5). При этом может быть так, что частота значительно изменяется как при проходе расплава, так и проходе пузыря. После прохода пузыря частота имеет то же самое значение, как перед проходом расплава. Фаза может изменяться очень сильно в моменты прохода расплава и пузыря, прежде чем она устанавливается на относительно постоянном значении. Для контроля всех стадий процесса литья необходимо измерять несколько параметров микроволнового излучения одновременно, а также регистрировать и их временное изменение.

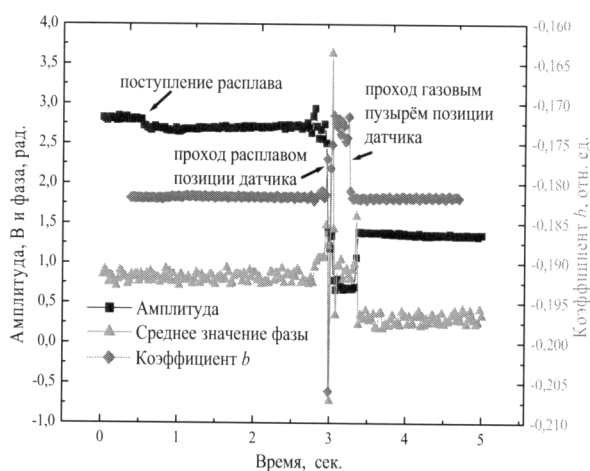


Рис. 5. Максимальная амплитуда, средняя фаза и коэффициент b в зависимости от времени литья для пластмассы СОС с газовой инжекцией

Начальное значение амплитуды ZF -сигнала значительно меньше, чем для полистирола. При прохождении расплава мимо позиции датчика происходит увеличение амплитуды ZF -сигнала, а при прохождении пузыря уменьшение. Частота ZF -сигнала значительно изменяется при проходе пластмассы, и слабо при проходе воздушного пузыря. Коэффициент b уменьшается при проходе пластмассы и значительно увеличивается при проходе пузыря. Как правило, изменения амплитуд параметров ZF -сигнала при проходе пластмассы оказываются более значительными по сравнению с их изменениями при проходе пузыря. Для всех исследованных типов пластмасс проход пластмассы и пузыря мимо позиции датчика регистрируется при многопараметровом анализе ZF -сигнала. Различия при амплитудных скачках как при проходе расплава, так и пузыря обусловлены в значительной степени материалом пластмассы.

Сравнение между экспериментальными и расчётными данными

Экспериментальные исследования на рассверленных образцах пластмассы при комнатной температуре только условно являются содержательными для интерпретации литьевого процесса. В рассверленных образцах образуется сложное волновое поле, которое изменяется уже при малых изменениях параметров материала и геометрических размеров образца. При имитации распространения газового пузыря перемещением рассверленного образца мимо позиции датчика наблюдаются большие колебания сигнала при проходе конца канала позиции датчика (рис. 3), чем при реальном процессе литья (рис. 4–6). Очевидно, более высокие температура и давление при процессе литья влияют на распространение микроволн в значительной степени. Нами были проведены измерения ослабления микроволн на расплавах пластмасс при нормальном давлении. Ослабление микроволн в жидких пластмассах увеличивалось и величина этого эффекта выражалась по-разному в зависимости от типа пластмассы. Таким образом, повышенное ослабление микроволн ведёт к подавлению резонансных эффектов при контроле в реальных условиях, сглаживанию хода кривых ZF -сигналов, исключая область и время прохода расплавом или газовым пузырем позиции датчика. Также и материалы пластмасс, которые при экспериментах на расплавах при нормальном давлении показали незначительную температурную зависимость коэффициента ослабления микроволн, в реальных условиях литья имеют более высокие значения коэффициента ослабления микроволн. Возможно, это связано с влиянием высокого давления на диэлектрическую проницаемость жидкой пластмассы, которое нами неизучено.

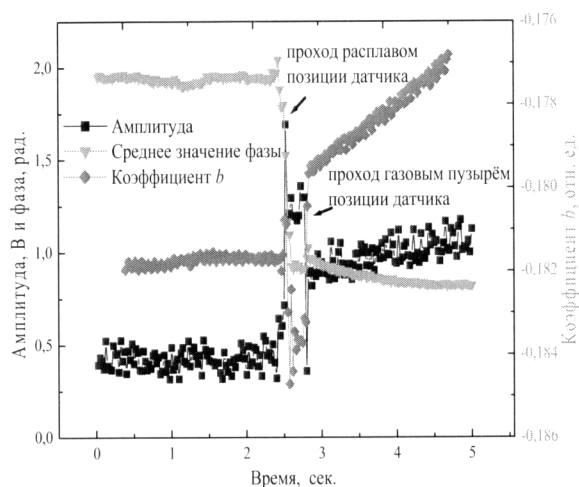


Рис. 6. Максимальная амплитуда, начальная фаза и коэффициент b в зависимости от времени литья для полипропилена с газовой инжекцией

Расчёт распространения микроволн в модели пресс-формы был выполнен методом конечных элементов с использованием пакета программ ANSYS. В связи с лицензионным ограничением ANSYS число расчётных элементов не превышало 128 000. Поэтому размеры расчётной модели были меньше реальных. Газовый пузырь моделировался параллелепипедом разного поперечного сечения, габаритные размеры модели пресс-формы составляли в миллиметрах $6 \times 6 \times 30$. Были проведены расчёты для пластмассы типа полиэтилена ($\epsilon' = 2,592$, $\epsilon'' = 0,01887$ при нормальных условиях) для пяти значений ϵ'' , увеличивающихся в два раза по сравнению с предыдущим значением. Значения фазы и модуля коэффициента обратного рассеяния микроволнового излучения $R(0)$ для частот излучения 73, 75 и 77 ГГц в зависимости от размеров газового пузыря приведены на рис. 7, при этом масштабы осей всех графиков выбраны равными. Позиция и диаметр выходного отверстия круглого волновода показаны прямоугольником красного цвета на оси x графиков. Газовый пузырь распространяется слева направо и сохраняет своё поперечное сечение. Расчитанные сечения газовых пузырей также приведены на рисунках. Как фаза, так и модуль $R(0)$ для приведенных частот микроволнового излучения изменяют свои величины при прохождении газовым пузырём выходного отверстия волновода. Эти изменения зависят и от размеров поперечного сечения газового пузыря и от частоты микроволнового излучения и не являются монотонными. Например, изменения фазы $R(0)$ при сечении газового пузыря 1 мм^2 при 73 ГГц выше, чем для больших значений сечений, в то время как изменения модуля $R(0)$ для этого случая имеет минимальное значение (рис. 4). Уже такой газовый пузырь сравнительно малого поперечного сечения вызывает существенное изменение $R(0)$, что говорит о высоком потенциале данного метода для целей неразрушающего контроля газовых полостей в пластмассах. Скачок фазы и модуля $R(0)$ при прохождении газовым пузырём позиции волновода может быть как положительным, так и отрицательным или не выявляться вообще. Но и в отсутствии скачка фазы, как например для сечения $3 \times 3 \text{ мм}^2$ и $f = 73 \text{ ГГц}$,хождение газовым пузырём позиции волновода вызывает осцилляцию значений фазы $R(0)$ и может служить доказательством прохождения газовым пузырём волновода. Скачок фазы и модуля $R(0)$ начинается на расстоянии 2–3 радиусов волновода r_0 и заканчивается непосредственно после прохождения пузырём выходного отверстия волновода. Для приведенных частот и диаметра волновода область непостоянных значений $R(0)$ составляет $\approx 5\text{--}6 \text{ мм}$ ($\approx 4\text{--}5r_0$ или $\approx 1,2\text{--}1,5\lambda$). Одновременное измерение фазы и модуля $R(0)$ позволяет избежать неоднозначности в измерениях: незначительное изменение модуля $R(0)$ для случая 75 ГГц, $1 \times 1 \text{ мм}^2$ компенсируется отчётливым изменением фазы $R(0)$. Значения фазы и модуля $R(0)$ тем сильнее осциллируют, чем ниже значения ϵ'' и больше сечение газового пузыря.

Если сечение газового пузыря составляет менее четверти длины волны, то осцилляции значений фазы и модуля $R(0)$ практически прекращаются. С ростом диэлектрических потерь зависимости $R(0)$ становятся более гладкими, осцилляции кривых уменьшаются. Модельные расчеты показали качественную непротиворечивость с экспериментами как на рассверленных образцах, так и в условиях реального литья. Выбором частоты микроволнового излучения можно получить однозначную зависимость фазы $R(0)$ от сечения пузыря, см. рис. 7, а, в. Этот факт указывает на возможность контроля объёма газового пузыря. Модуль $R(0)$ имеет неоднозначные зависимости от сечения пузыря при рассчитанных частотах излучения и свойств пластмассы, (см. рис. 7, б и г) однако при проходе газового пузыря мимо датчика наблюдается, как правило, его значительное увеличение.

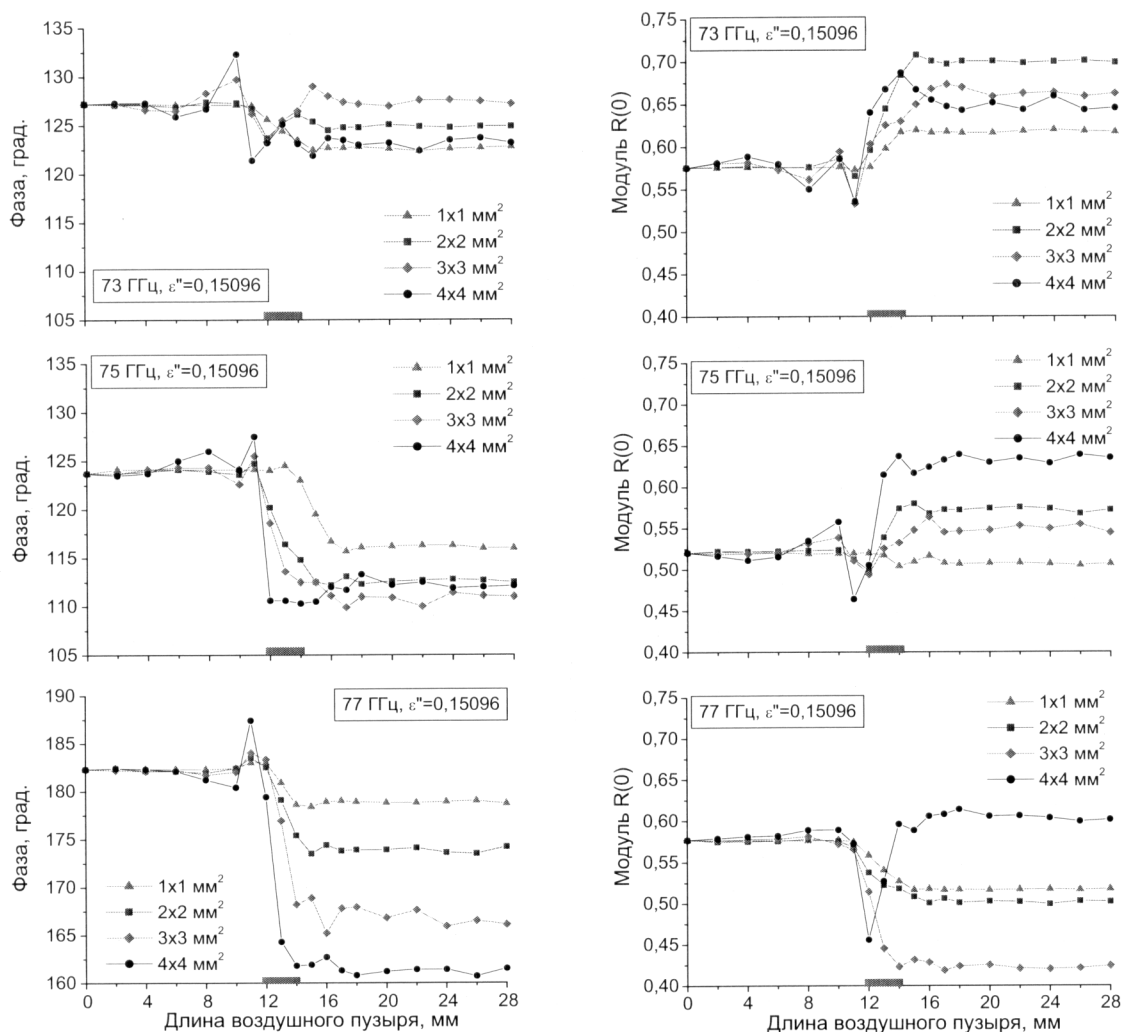


Рис. 7. Фаза и модуль коэффициента обратного рассеяния $R(0)$ микроволнового излучения в зависимости от длины воздушного пузыря для 4-х значений поперечного сечения пузыря и трёх значений частоты излучения. Масштаб осей всех графиков выбран равным. Положение волновода показано прямоугольником на оси x

Выводы

Микроволновые измерения с одновременной оптической записью процесса литья показали, что проход расплава и газового пузыря вызывают отчетливые скачки сигналов (амплитуда, фаза и частота) микроволнового датчика. Амплитуды скачков зависят от типа пластмассы и меньше при проходе фронта газового пузыря мимо позиции датчика, чем при проходе жидкой пластмассы. В некоторых случаях амплитуды скачков незначительны. Уверенный контроль движения фронта жидкой пластмассы и газового пузыря в пресс-форме достигается применением многопараметрового микроволнового контроля. Амплитуда низкочастотного сигнала уменьшается при проходе расплавов и увеличивается при проходе газового пузыря. Фаза и частота изменяются по разному в зависимости от типа пластмассы.

Измерения на рассверленных образцах при комнатной температуре не дают никакой простой зависимости, например, зависимость амплитуды от диаметра канала. Ход кривых неоднозначен, как при реальных процессах литья. При температуре плавления пластмасс и нормальном давлении ослабление микроволн выше по сравнению с комнатной температурой. Повышенное ослабление микроволн при высоких давлениях и температурах пластмасс смягчает резонансы и обеспечивает относительно гладкие зависимости сигналов измерений.

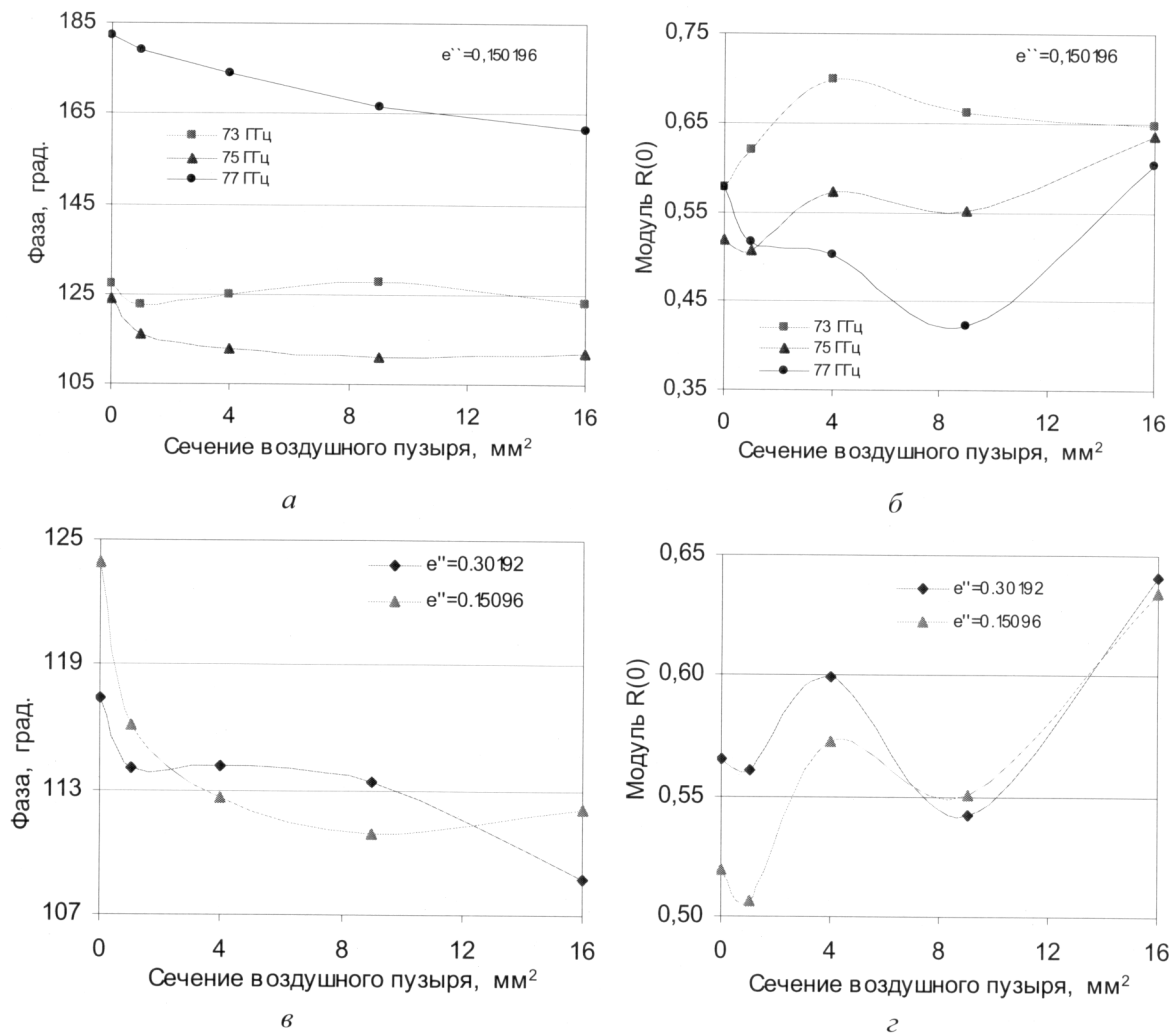


Рис. 8. Фаза (а) и модуль (б) коэффициента обратного рассеяния микроволнового излучения в зависимости от сечения воздушного пузыря для трёх частот микроволнового излучения $f=73-77$ ГГц в пластмассе с $\epsilon'=2,592$ и $\epsilon''=0,15096$ и для двух значений ϵ'' (в – фаза, г – модуль) при частоте $f=75$ ГГц

Расчёты с ANSYS дают качественно правильные результаты. При незначительном коэффициенте ослабления микроволн они показывают в большинстве случаев отсутствие простой закономерности изменения сигналов датчика. С возрастанием ослабления, то есть при увеличении мнимой части диэлектрической проницаемости, кривые изменения сигналов датчика сглаживаются. В нескольких случаях найдены простые монотонные корреляции между величиной газового пузыря и измеряемой величиной микроволнового поля, например, фазы.

Авторы сердечно благодарят Немецкое научное общество (DFG-Deutsche Forschungsgemeinschaft) за поддержку наших исследований.

Список литературы

1. Brunswick, A.: «Ultraschallüberwachung», Seminar Fluidinjektionstechnik, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), 10–11.10.2000, Aachen.
2. Tessmann, A. & Kudzus, S. & Feltgen, T. & Riessle, M. & Sklarczyk, C. & Haydl, W.H. 2002. Compact single-chip W-band FMCW radar modules for commercial high-resolution sensor applications, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 50, No. 12, p. 2995–3001.