

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В НЕСПЛОШНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

И.С. Лобанова, В.А. Мещеряков, Н.П. Калиниченко, А.Н. Калиниченко,
М.С. Киселева

В настоящее время полимерные композиционные материалы нашли широкое применение во всех отраслях промышленности, будь то авиа-, ракето-, автомобилестроении, производстве судов и пр. Многие конструктивные элементы, построенные на основе композиционных материалов, нуждаются в постоянном контроле качества. Обеспечение высокого качества и надежности изделий из неметаллических материалов невозможно без применения эффективных методов неразрушающего контроля. Одним из таких методов является капиллярный контроль, основанный на проникновении жидкостей в полости поверхностных дефектов. В работе предложен вариант моделирования движения жидкостей, позволяющий определять скорости заполнения полостей дефектов различными материалами и на основании этого выбирать оптимальные режимы контроля.

Ключевые слова: жидкость, неметалл, металл, моделирование, капилляр.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие техники требует все новых конструктивных материалов, превосходящих по своим прочностным, упругим и прочим свойствам традиционные металлы. К числу наиболее перспективных относятся полимерные материалы, такие как пластики, эластомеры, волокна.

Полимерные материалы разделяют на наполненные и ненаполненные. Ненаполненными полимерными материалами считают те, которые состоят только из полимера и некоторых специальных добавок. К ним относятся полиэтиленовая пленка, полистирольные изделия и др. Наполненными – в которых имеются усиливающие элементы в виде нитей, волокон или хлопьев более прочного материала. Примерами наполненных полимерных материалов можно считать пластики, армированные борными, углеродными, стеклянными волокнами, жгутами или тканями на их основе. Такие материалы называют композитами.

Композиты нашли широкое применение во всех отраслях промышленности и хозяйства. В авиастроении композиты применяют при изготовлении стенок лонжерона, интерцепторов, внутренних и внешних элеронов, законцовок килей, рулей направления и высоты, обтекателей системы выпуска закрылков, обшивки крыла и гондолы, стрингеров, т.к.

значительно облегчают конструкцию судна. В судостроении при строительстве подводных лодок и неметаллических легких судов композиты заменили многие материалы из-за отсутствия гниения и коррозии, агрессивного воздействия морской воды. В железнодорожном транспорте – в основном для отделки салонов сидений, перегородок, головных обтекателей вагонов, а также тары для транспортировки агрессивных жидкостей. Композиты вытесняют металлы при производстве автомобилей, строительных изделий, элементов нефтяной и газовой индустрии и пр. [1, 2].

Обеспечение высокого качества и надежности изделий из неметаллических материалов невозможно без применения эффективных современных методов неразрушающего контроля на всех стадиях производственного цикла: проектирование, изготовление, эксплуатация. Выявление дефектов в конструкциях из неметаллических материалов возможно акустическим, радиационным (рентгеновским), тепловым, радиоволновым, оптическим, электрическим, проникающих веществ и прочими методами неразрушающего контроля. Капиллярные методы контроля качества основаны на способности жидкости проникать в полости дефектов. Эти методы применимы для обнаружения всех типов поверхностных тупиковых и сквозных дефектов, таких как трещины, расслоения, течи, в изделиях из любых непористых материалов, в т.ч. стекла, керамики, пластмасс и

прочих неметаллических материалов. Гидродинамика течения жидкости в капиллярах с достаточной степенью точности подчиняется уравнениям, выведенным для ньютоновской жидкости. Индикаторные жидкости, используемые в капиллярном контроле качества изделий, носят название пенетранты. Их основой, как правило, являются спирты и керосины [3, 4, 5].

Заполнение тупикового капилляра жидкостью отличается от сквозного тем, что паровоздушная смесь, запертая в глубине капилляра, ограничивает глубину проникновения. Таким образом, процесс делится на два принципиально отличающихся по своей физической сущности этапа. В начале, когда жидкость приходит в контакт с поверхностной несплошностью (микроскопический разрыв поверхности), она под действием капиллярных сил начинает быстро проникать вглубь дефекта на определенную глубину h . Однако потом процесс существенно замедляется по мере увеличения давления внутри капилляра. Первый этап заканчивается, когда капиллярное давление жидкости приближается к давлению парогазовой смеси в канале. Затем начинается второй этап. Процесс заполнения переходит из капиллярной стадии в диффузионную, когда сжатый в полости дефекта газ, постепенно растворяется в жидкости и диффундирует к устью дефекта [6].

Поэтому практический интерес представляет выявление закономерностей заполнения различными жидкостями тупиковых и сквозных капилляров, определение предельной глубины заполнения капилляров, а также времени проникновения жидкости в полость на эту глубину [7, 8].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

В работе предложен результат моделирования движения жидкости в сквозных и тупиковых капиллярах с плоскими параллельными стенками. Для этого было получено дифференциальное уравнение движения жидкости в капилляре с учетом его наклона, шероховатости поверхности, наличия участков с различными параметрами смачивания, аналитического изменения размера щели на различных участках в предположении движения жидкости близкого к ламинарному:

$$h_1'' + \frac{1}{h_1} (h_1')^2 + \frac{8\mu(r, r_a)}{r^2(h_1)\rho} h_1' - \frac{2\sigma(h_1)a(h_1)\cos(\Theta_S(h_1))}{r(h_1)\rho h_1} + \frac{P_a}{\rho(h_0 - h_1)} + g \sin(\alpha) = 0,$$

где $h_{0,1}$ – полная и текущая глубина капилляра, θ_s – краевой угол смачивания, a – коэффициент шероховатости, σ – коэффициент поверхностного натяжения, P_a – атмосферное давление, μ – коэффициент динамической сдвиговой вязкости, r_a – радиус макромолекулы пенетранта (если учитывать размерные эффекты), α – угол наклона капилляра, g – ускорение свободного падения, ρ – плотность жидкости. Это уравнение учитывает зависимость коэффициента динамической сдвиговой вязкости пенетранта в процессе сужения или расширения радиуса капилляра (учитывает размерные эффекты путем обращения к процедуре $\mu(r, r_a)$). Уравнение позволяет производить моделирование процессов впитывания с учетом непрерывного изменения всех параметров задачи.

Для моделирования движения жидкости построен программный комплекс, реализующий численное решение полученного нами дифференциального уравнения. Интерфейсная часть комплекса для проведения компьютерного моделирования течения жидкости представлена на рисунке 1.

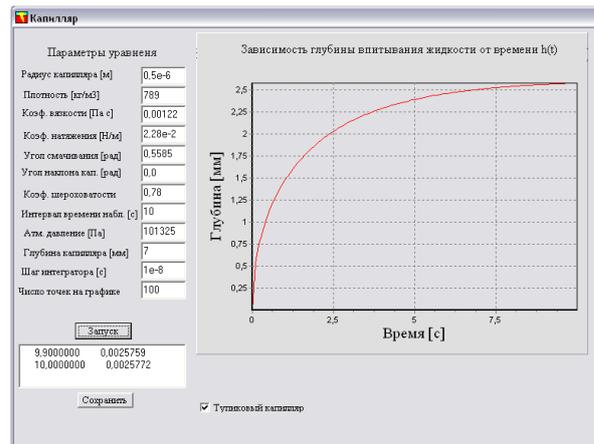


Рисунок 1 – Интерфейсная часть комплекса для проведения компьютерного моделирования процессов течения жидкостей.

С левой стороны расположены окна ввода параметров задачи. Эти параметры разделены на два блока. Первый блок связан с геометрическими и материальными параметрами модели. Второй – с параметрами метода вычислений и графической интерпретацией результатов.

В первом блоке представлены такие параметры как:

- плотность жидкости (единица измерения – кг/м^3);
- коэффициент динамической сдвиговой вязкости (единица измерения – $\text{Па}\cdot\text{с}$);
- коэффициент поверхностного натяжения (единица измерения – Н/м);

- краевой угол смачивания (единица измерения – радиан);
- угол наклона капилляра относительно горизонтали (единица измерения – радиан);
- коэффициент шероховатости поверхности (безразмерная величина определяемая отношением площадей шероховатой и гладкой поверхностей);
- интервал времени наблюдения впитывания (единица измерения – секунда);
- атмосферное давление (единица измерения – Па);
- глубина капилляра (единица измерения – мм). Следует отметить, что этот параметр вступает в силу, если выбран режим - «Тупиковый капилляр», иначе все расчеты программа будет производить как для сквозного.

Во втором блоке программы представлены следующие параметры:

- шаг интегратора (единица измерения – секунда). Несмотря на то, что метод автоматически выбирает шаг интегрирования, на старте желательно задавать его начальное значение. Это связано с тем, что дифференциальное уравнение относится к разряду «жестких» и имеет особенность для точки $h = 0$;

- число точек на графике. Этот параметр необходим для того, чтобы можно было сводить результаты моделирования на общем графике при вариации параметров задачи. В противном случае автоматический выбор шага интегрирования формирует результирующие файлы различной длины.

В нижнем левом углу расположено поле вывода промежуточных результатов. Это поле представляет собой упрощенный текстовый редактор с возможностью просмотра всех промежуточных значений и оперирования ими при необходимости. В этом редакто-

ре располагаются две колонки – текущее значение времени и глубина пропитки.

МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В качестве исследуемых образцов для построения математической модели движения жидкости в капилляре с П-образными параллельными стенками были выбраны образцы, выполненные из стекла и алюминия с размерами капилляра: шириной 10, 7, 5, 3, и 1 мкм, и глубиной – 10.0; 7.0; 5.0; 3.0; 1.0, и 0.3 мм. В качестве проникающих жидкостей - керосин и этиловый спирт, как основные распространенные составляющие дефектоскопических материалов, как описано в патентах авторов [3, 4, 5].

Краевые углы смачивания [9], измеренные методом отрыва капли Осиповым А.О. и Осиповым О.П., Гогониным И.И., были представлены в работах [10].

В таблице 1 показаны значения основных параметров уравнения.

Время наблюдения для всех экспериментов выбиралось одинаковым - 10 сек. За это время жидкость заполняла капилляр на определенную глубину. В таблицах 2 и 3 представлены результаты моделирования.

На рисунках 2, 3 представлены графики зависимостей глубины заполнения жидкостями дефектов, образованных в выбранных материалах, от ширины этих дефектов. Глубина проникновения жидкостей в капилляры из стекла выше, чем в капилляры из алюминия.

На рисунке 4 показаны зависимости глубины заполнения капилляров из стекла и алюминия керосином и спиртом от времени.

Таблица 1 – Значения основных параметров уравнения

Жидкость	Коэф. динам. вязкости, Па*с, 10^{-3}	Коэф. поверхн. натяжения, Н/м, 10^{-3}	Краевой угол смачивания, град.		Плотность жидкости, кг/м ³	Коэф. влияния шероховатости поверхности	
			Алюминий	Стекло		Алюминий	Стекло
Керосин	1,85	24,00	37	25	820	0,78	1,0
Этил. спирт	1,22	22,80	32	17	789		

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В НЕСПЛОШНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Таблица 2 – Глубина проникновения жидкостей в тупиковый капилляр.
Материал - алюминий

Глубина капилляра, мм	Глубина проникновения, мм									
	Керосин					Этиловый спирт				
	Ширина капилляра, мкм									
	10	7	5	3	1	10	7	5	3	1
10	0,56	0,78	1,06	1,60	3,29	0,56	0,78	1,06	1,65	3,60
7	0,39	0,54	0,74	1,15	2,54	0,39	0,55	0,74	1,16	2,58
5	0,28	0,39	0,53	0,82	1,85	0,28	0,39	0,53	0,83	1,86
3	0,17	0,23	0,32	0,49	1,11	0,17	0,24	0,32	0,50	1,12
1	0,06	0,08	0,11	0,16	0,37	0,06	0,08	0,11	0,17	0,43
0,3	0,02	0,02	0,03	0,05	0,11	0,02	0,02	0,03	0,05	0,13

Таблица 3 – Глубина впитывания жидкостей в капилляр. Материал – стекло

Глубина капилляра, мм	Глубина проникновения, мм									
	Керосин					Этиловый спирт				
	Ширина капилляра, мкм									
	10	7	5	3	1	10	7	5	3	1
10	0,79	1,09	1,47	2,19	4,23	0,79	1,10	1,47	2,22	4,25
7	0,55	0,76	1,03	1,56	3,10	0,55	0,77	1,03	1,56	3,16
5	0,40	0,55	0,73	1,11	2,27	0,40	0,55	0,73	1,11	2,30
3	0,24	0,33	0,44	0,67	1,38	0,24	0,33	0,44	0,67	1,39
1	0,08	0,11	0,15	0,22	0,46	0,08	0,11	0,15	0,22	0,46
0,3	0,02	0,03	0,04	0,07	0,14	0,02	0,03	0,04	0,07	0,14

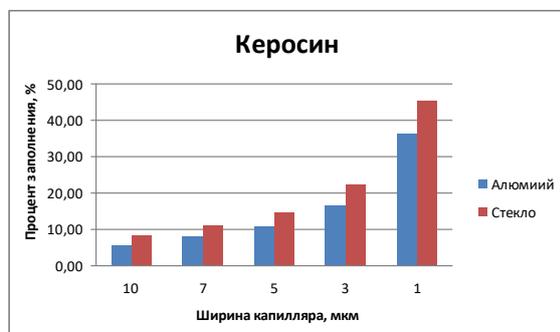


Рисунок 2 – Зависимость глубины заполнения керосином капилляров от их ширины

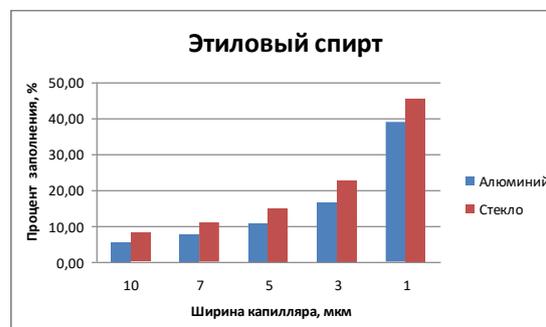


Рисунок 3 – Зависимость глубины заполнения этиловым спиртом капилляров от их ширины

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, из графика видно, что скорость заполнения стеклянных капилляров жидкостями выше, чем капилляров из алюминия. Многочисленные модельные эксперименты на других типах материалов показывают необходимость учета всех параметров модели для построения процедур контроля качества изделий.

Однако можно отметить, что время необходимое для пропитки капилляров в ряде неметаллических материалов несколько меньше, чем для металлических, что приводит к ускорению технологии процесса капиллярного контроля.

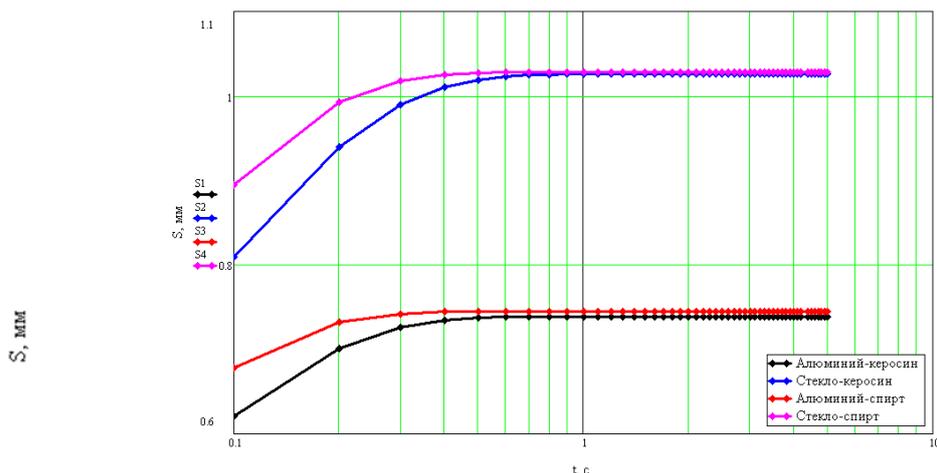


Рисунок 4 – Зависимость глубины заполнения капилляра жидкостью от времени

Предложенная математическая модель и разработанный на её основе программный комплекс, позволяющий наблюдать динамику процесса впитывания и являющийся инструментом оптимизации технологических процессов контроля качества неметаллических материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы. Свойства. Структура. Технологии / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин и др. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
2. Макин Ю.Н. Основы производства ЛА и АД. Конструкции их композиционных материалов / Ю.Н. Макин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://storage.mstuca.ru/bitstream/123456789/4436/1/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 21.11.2016).
3. Пат. №2278372 RU МПК G01N21/91 Пенетрант для цветной капиллярной дефектоскопии / Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Соколова Л.Н., заявл. 13.01.2005; опубл. 20.06.2006. – Режим доступа: <http://bd.patent.su/2278000-2278999/pat/servlet/servletab38.html/> - Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 24.11.2016).
4. Пат. № 2238543 RU МПК G01N21/91 Пенетрант для цветной капиллярной дефектоскопии Денель А.К., Соколова Л.Н., Кондрашов Э.К.; заявл. 12.03.2003; опубл. 20.10.2004. – Режим доступа: <http://bd.patent.su/2238000-2238999/pat/servlet/servletb47b.html/> - Загл. с экрана. – Яз.рус. (дата обращения 24.11.2016).
5. Pat. №3735131 US A Fluorescent penetrant composition and method/ [Sherwin A](#); заявл. 27.01.1972; опубл. 22.05.1973. – Режим доступа: <https://www.google.com/patents/US3735131>. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 24.11.2016).
6. Капиллярный неразрушающий контроль [Электронный ресурс] – загл. с экрана. – Режим доступа: <http://ndt-testing.ru>, дата обращения 03.11.2016.
7. Мигун Н.П. Тепловые воздействия при капиллярном неразрушающем контроле / Н.П. Ми-

гун, А.Б. Гнусин – Минск: Буларус. наука, 2011. – 131 с.

8. Migun N.P. Model of film flow in a dead-end conic capillary/ N.P. Migun, A.I. Shnip // *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*. – 2002. – Vol. 75. – Issue 6. – С.145-150.

9. Жданов К.В. Исследование влияния электростатического заряда поверхности на краевой угол смачивания/ К.В. Жданов, М.С. Ерохин, М.Ю. Степкина, А.А. Жирнов, О.Б. Кудряшова // *Ползуновский вестник*. - 2016. - №2. – С.222-226.

10. Осипов А.О., Осипов О.П. Проблемы фильтрации и сепарации противоводокристаллизационных жидкостей при прокачке топлива через фильтрованные картонные в условиях отрицательных температур // *Научный вестник МГТУ ГА*. – 2011. – №173. – С.134-136

Лобанова Ирина Сергеевна, ст. преподаватель кафедры «Физические методы и приборы контроля качества» Томского политехнического университета, e-mail: konarevai007@tpu.ru, тел.: 8(3822)41-73-07.

Мещеряков Владимир Алексеевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры радиоэлектроники Томского государственного университета, e-mail: konarevai007@tpu.ru, тел.: 8(3822)41-73-07.

Калиниченко Николай Петрович, к.т.н., с.н.с., Заведующий лабораторией капиллярного, визуального и измерительного контроля ООО «АРЦ НК», e-mail: nikol112@mail.ru, тел.: 8(3822)41-73-07

Калиниченко Алексей Николаевич, к.т.н., доцент кафедры «Физические методы и приборы контроля качества» Томского политехнического университета, e-mail: lexk@tpu.ru, тел.: 8(3822)41-73-07.

Киселева Мария Сергеевна, студентка кафедры «Физические методы и приборы контроля качества» Томского политехнического университета, e-mail: konarevai007@tpu.ru, тел.: 8(3822)41-73-07.