

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОПИТКИ ТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЛИНЕЙНО-ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ

In article materials on research of processes of impregnation of woven materials on the basis of glass threads by a modelling liquid with viscous properties similar to typical thermojet pitches are presented. The analysis of the mechanism of filling of the porous environment is carried out by the generated woven structure, influencing factors are revealed. The expediency of use of a method of final elements for the description interlaminar currents binding is established, recommendations about the description of settlement model are given. It is offered to use as settlement model the modified theory heat conductivity orthotropic bodies, the substantiation of replacement of physical constants on characteristics of structure and property of a liquid is presented. Results of calculation of duration of impregnation for modelling disk samples of a small thickness depending on viscous properties binding and pressure of injection are resulted. Comparison of experimental and settlement parametres is spent, the conclusion about reliability of settlement model is drawn.

Введение. Процесс течения жидкости при пропитке тканых стекловолоконистых наполнителей трудно поддается математическому анализу. В настоящее время не существует универсальной модели, адекватно описывающей процесс пропитки. Зачастую моделируют требуемую структуру в лабораторных условиях, определяют показатели процесса и с помощью масштабирования переносят их на реальные изделия.

При укладке слоев ткани в пакет возникает структура переменного по объему гидравлического сопротивления. Процесс течения в данном случае можно рассматривать как набор последовательных событий. На начальной стадии течение жидкости наблюдается в межслоевых областях, обладающих наименьшим сопротивлением. С увеличением длины затекания происходит рост градиента давления с максимумом в зоне впрыска, а следовательно, изменяется характер течения в зоне больших давлений – пропитка слоев ткани. И в последнюю очередь происходит заполнение пустот в пучке волокон нити, обладающей наибольшим гидравлическим сопротивлением. Схема течения связующего отображена на рис. 1.

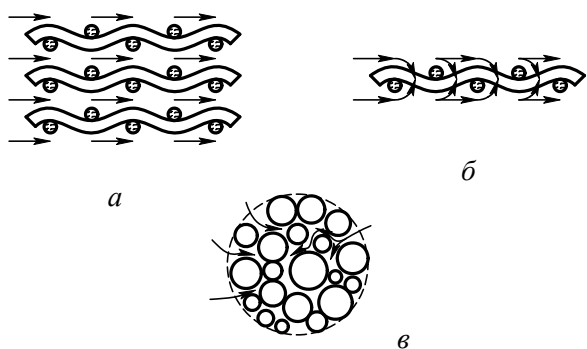


Рис. 1. Схема течения связующего при пропитке тканых наполнителей:

а – межслоевое течение;
б – пропитка слоя ткани; в – пропитка нити

Все стадии процесса пропитки тканого наполнителя взаимосвязаны и осуществляются одновременно, с некоторым запаздыванием из-за различий в проницаемости элементов структуры. Однако процесс межслоевого течения является определяющим возможностью заполнения связующим всего пакета.

Основная часть. Современные средства численного моделирования поведения материалов позволяют с достаточной достоверностью прогнозировать параметры процессов. Для использования существующих программных продуктов, моделирующих течение жидкости, необходимо создание геометрии пустот с учетом их вероятностного распределения по объему пакета. Однако для описания структуры, полученной укладкой в формообразующую полость оснастки тканых наполнителей сложного плетения, необходимо введение очень большого количества конечных элементов при значительном упрощении геометрии модели, что, в свою очередь, значительно снижает достоверность получаемых результатов.

Для упрощения расчетной модели приняты ряд допущений: материал моделируется как однородное по объему тело с анизотропией свойств по трем направлениям: основа, уток и перпендикулярно слою; свойства материала неизменны в процессе течения (структура ткани постоянна).

При проведении анализа литературных источников [1–5] установлено, что течение жидкости при заполнении пористой среды хорошо описывается уравнением теплопроводности (1), которое по структуре соответствует закону течения жидкости (2):

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) =$$

$$= \ddot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_{\varphi}\varphi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x C_{\varphi}\varphi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y C_{\varphi}\varphi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z C_{\varphi}\varphi) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right) + S_{\varphi}, \quad (2)$$

где K_x, K_y, K_z – коэффициенты теплопроводности по направлениям; T – температура; v_x, v_y, v_z – коэффициенты переноса массы по направлению; ρ – плотность материала; C – удельная теплоемкость; C_{φ} – вязкость материала; Γ_{φ} – коэффициент проницаемости среды.

При использовании модели теплопроводности необходимо осуществить адекватную замену коэффициентов.

Как можно предположить из общего вида зависимостей, замена коэффициентов в уравнениях не скажется на точности расчетов.

Однако в связи с различием физического смысла используемых в уравнениях (1) и (2) показателей встает вопрос равнозначной их замены. Вместо плотности вводили коэффициент вязкости, коэффициенты теплопроводности заменяли коэффициентами проницаемости среды по направлениям, а удельную теплоемкость – коэффициентом уплотнения материала (отношение пористости материала к давлению $C = (1 - P_n) / \rho$).

Результаты решения по методу конечных элементов представлены в таблице. Граница потока течения и время пропитки, полученные по экспериментальным данным через определенные интервалы времени, показаны на рис. 2 и 3. При расчете использовали численные показатели свойств компонентов, определенных опытным путем.

Таблица

Коэффициенты проницаемости материала

Объемное содержание наполнителя P_n	Глубина затекания, мм		Время течения, мин	Вязкость μ , Па·с	Давление p , атм	Коэффициент проницаемости K , $\times 10^{-12} \text{ м}^2$	
	Основа	Уток				Основа	Уток
0,6	70 (5%)	50 (4%)	23	1,1	1	12,5	5,6
0,55	73 (9%)	56 (6%)	18	1,1	1	18,4	9,1
0,5	67 (5%)	48 (2%)	12	1,1	1	23,6	9,8
0,55	67 (1,5%)	55 (4%)	10	1,1	1.6	22,2	11,1
0,55	63 (11%)	53 (4%)	6	1,1	2.3	22,3	11,2
0,55	62 (1%)	50 (0,5%)	30 с	0,4	1	135	88

Примечание. В скобках указано отклонение расчетных данных от экспериментальных значений.

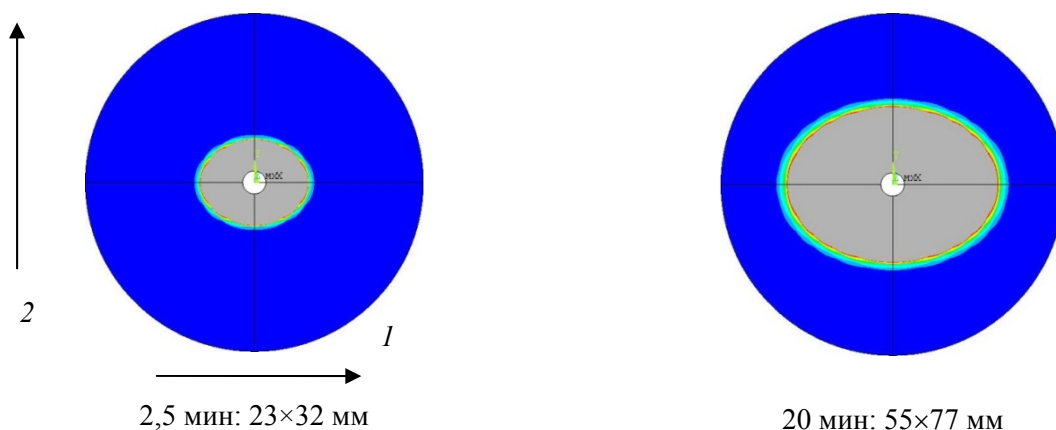


Рис. 2. Расчетный фронт потока жидкости в среде ANSYS в зависимости от времени (вязкость 1,1 Па·с, давление 1 атм, объемное содержание наполнителя 55%):
1 – направление основы; 2 – направление утка

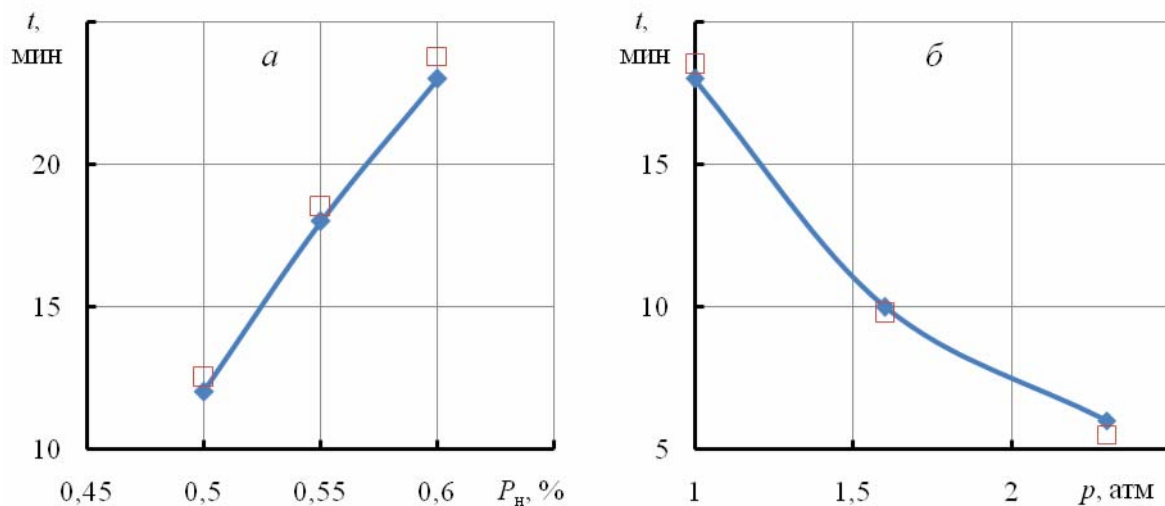


Рис. 3. Длительность пропитки на расстояние 70 мм по основе в зависимости от: *а* – степени наполнения; *б* – давления впрыска; точки – экспериментальные данные, линии – расчет

В качестве граничных условий использовали опытные данные по осредненным коэффициентам проницаемости среды как функцию вязкости, давления и степени наполнения (см. таблицу) при условии переменной пористости волокнистой системы от градиента давления.

Полученные данные для модельного образца указывают на то, что корреляция между расчетом и экспериментом довольно тесная (см. рис. 2), а это свидетельствует о достоверности полученных результатов. Разброс значений не превышает 10%.

Заключение. Использование упрощенных методик расчета и прогнозирования, а также внедрение компьютерных средств моделирования процессов пропитки в настоящее время актуально и позволяет решать ряд проблем:

- упростить экспериментальное оборудование по определению показателей структуры тканых материала и ее проницаемости для связующих смол;

- существенно снизить продолжительность подготовительных работ;

- создать возможность прогнозирования параметров процесса перколяции для изделий сложной пространственной формы.

Литература

1. Delopments in processing long fibre reinforced thermoplastic injection moulding compounds / J. N. Grimwood [et al.]. – P. 1. ICI Advanced Materials Business Group. Gore Vetron Research and Technology, Wilton, Sept. – 1988.

2. Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix. Tagungshandbuch. – Esslingen: Expert-Verlag, 1997. – S. 337.

3. Gutowski, T. G. The consolidation of laminate composites / T. G. Gutowski // J. Composite Materials. – 1987. – Vol. 21, № 2. – P. 172–188.

4. Gibson, A. G. Modification of Darsy's law to model mould interface effects in composites processing / A. G. Gibson // Composite Manufacturing. – 1992. – Vol. 3, № 2. – P. 113–118.