

УДК 678

## Динамика уплотнения композиционного материала при горячем прессовании

**Е.В. Беляков, В.А. Тарасов**

*Исследован процесс уплотнения композита на основе углеродной ткани арт. 3692 и связующего марки ЭНФБ. Приведены данные по изменению толщины образцов в процессе холодного и горячего прессования. Представленные результаты уплотнения образцов учитывают температурное расширение основных элементов конструкции лабораторного оборудования. Значения конечной толщины образцов, рассчитываемые по предложенной методике, хорошо согласуются с результатами измерений.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, горячее прессование, углеродные наполнители.

*The article investigates the compaction process of the composite based on carbon cloth Art. 3692 of «Porcher Industries» company and ENFB epoxy resin. The data on variation of specimens thickness in the process of cold and hot pressing are given. The presented results of specimens compaction take into account the temperature expansion of main laboratory equipment structural components. The specimens final lengths calculated based on the offered method have a good agreement with the measurement results.*

**Keywords:** polymeric composite materials, hot pressing, carbon fillers.

**В** производстве аэрокосмической техники с каждым годом возрастает доля изделий из углепластиков. Для максимальной реализации свойств углепластика технологам по производству изделий из полимерных композитных материалов (ПКМ) постоянно приходится совершенствовать процессы формообразования композитов.

В некоторых работах при горячем прессовании исследуется реология [1] процесса отверждения композита. В статье [2] приводятся результаты исследования уплотнения стеклопластика. Уплотнение композита в процессе инфузии представлено в работах [3, 4]. Известные работы не в полной мере раскрывают методику проведения экспериментов, не учитывают влияние относительного удлинения конструкции лабораторного оборудования, а также не отражают прикладные исследования по динамике уплотнения в процессе прессования современных углеродных наполнителей, используемых в изделиях ракетно-космической техники (РКТ).



**БЕЛЯКОВ**  
Евгений Владимирович  
аспирант



**ТАРАСОВ**  
Владимир Алексеевич  
доктор технических наук,  
профессор,  
зав. кафедрой  
«Технологии  
ракетно-космического  
машиностроения»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

В связи с этим актуальным является исследование процесса уплотнения современного материала на основе углеродной ткани при горячем прессовании.

Целью данной работы является исследование динамики уплотнения композита на основе углеродной ткани арт. 3692 фирмы Porcher Industries и связующем марки ЭНФБ ТУ 1-596-36–2005 в процессе горячего прессования.

Исследование процесса уплотнения композита проводилось с использованием экспериментальной лабораторной установки (рис. 1), в состав которой входят: пресс, электронная многофункциональная измерительная головка ABSOLUTE DIGIMATIC ID-C серии 543 фирмы Mitutoyo, регулятор температуры «Термодат-25Е1» и компьютер.

Пресс представляет собой конструкцию, в основу которой входят нижняя и верхняя плиты, насос и манометр. Верхняя плита устанавливается в нужное положение и в процессе прессования остается неподвижной. На нижнюю плиту укладывается образец. Насос позволяет обеспечить перемещение нижней плиты вверх навстречу верхней плите и тем самым создавать удельное давление  $p_{ман}$ , контролируемое по манометру.

Удельное давление прессования рассчитывали по формуле

$$p_{уд} = p_{ман} \frac{S_{ц}}{S_3}, \quad (1)$$

где  $p_{ман}$  — давление на манометре, МПа;  $p_{уд}$  — удельное давление (давление прессования),

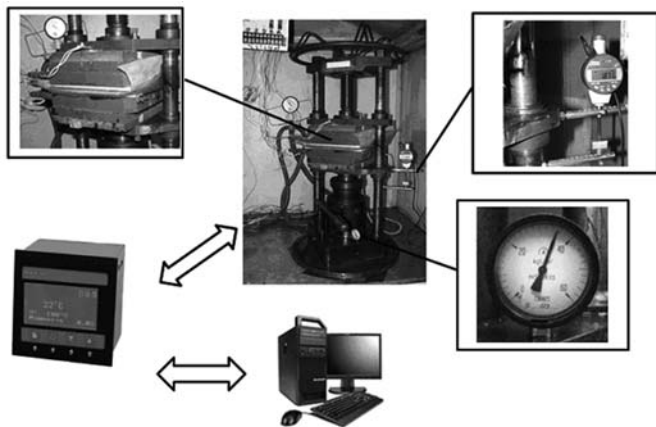


Рис. 1. Схема экспериментальной лабораторной установки

МПа;  $S_3$  — площадь прессуемой заготовки образца,  $см^2$ ;  $S_{ц}$  — площадь сечения рабочего цилиндра пресса,  $S_{ц} = 50,2 \text{ см}^2$ .

Температура плит поддерживалась регулятором температуры по заданному температурно-временному режиму. Для обеспечения требований к допустимым значениям отклонений от заданных значений температуры в настройках регулятора температуры «Термодат-25Е1» устанавливались необходимые коэффициенты. Использовались коэффициент пропорциональности  $K_p$ , коэффициент времени интегрирования  $K_i$  и коэффициент времени дифференцирования  $K_d$ .

Перемещение нижней плиты пресса регистрировалось электронной многофункциональной измерительной головкой ABSOLUTE DIGIMATIC ID-C с точностью до 0,001 мм. Регистрация текущих значений температур и перемещений выполнялось с периодичностью 15 с, и обрабатывались специальным программным обеспечением.

Образцы изготавливали методом ручной выкладки из цельных заготовок препрега размером  $200^{+1} \times 200^{+1}$  мм. Схема армирования  $(0^0)_{30}$ . Перед прессованием каждый образец подвергался вакуумированию в течение 10 ч при температуре окружающей среды. Вакуумирование проводилось в соответствии со схемой упаковки технологического пакета, представленного на рис. 2.

При формировании технологического пакета для прессования на поверхность нижней плиты (рис. 3) последовательно укладывались пленка полиамидная WL-7400 и лакоткань

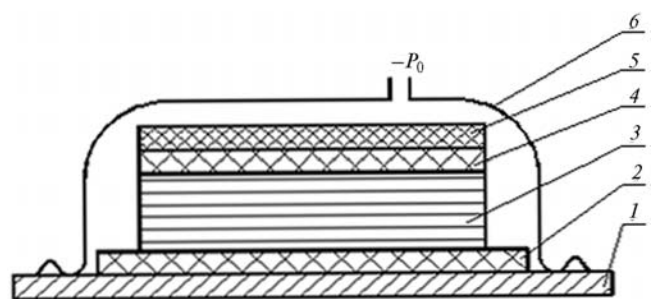


Рис. 2. Технологический пакет для вакуумирования:

- 1 — металлический плоский стол; 2, 4 — лакоткань;
- 3 — образец; 5 — цулага стеклопластиковая;
- 6 — герметизирующий пакет;  $p_0$  — давление вакуумное

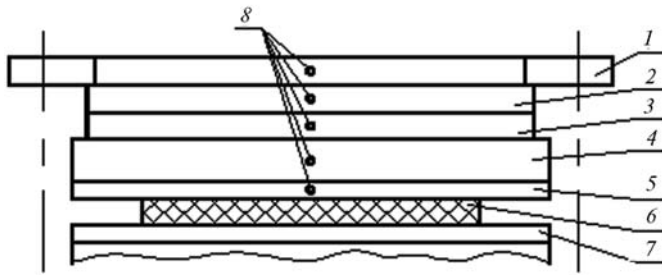


Рис. 3. Схема установки термодпар в конструкции пресса:

1 — основание; 2 — плита; 3 — спираль; 4 — плита с водным охлаждением; 5 — плита верхняя; 6 — образец; 7 — плита нижняя; 8 — отверстия для установки термодпары

Ф-4Д-М1 по ТУ 301-05-422-89. Укладываемый образец располагали так, что центральные оси симметрии образца и нижней плиты совпали. Сверху образца укладывали лакоткань. Размеры пленок выбирали такими, чтобы собрать выдавившееся связующее и исключить наплывы, пригорание вытекающего связующего к элементам конструкции пресса.

Прессование образцов проводили при постоянном удельном давлении в соответствии с табл. 1. После установки образца в пресс проводился режим подпрессовки в холодном состоянии. При этом создавалось давление прессования и поддерживалось до момента, пока показания на электронной многофункциональной измерительной головке не достигнут постоянного значения.

Таблица 1

Номер образца	Давление на манометре пресса, МПа	Удельное давление прессования, МПа
1	1,2	0,15
2	2,0	0,25
3	2,8	0,35
4	3,6	0,45

Результаты проведения подпрессовки образца в холодном состоянии представлены на рис. 4.

Анализ результатов показывает, что значительное уплотнение материала наблюдается в течение 10 мин от начала подачи давления. К 15-й минуте изменение толщины образца

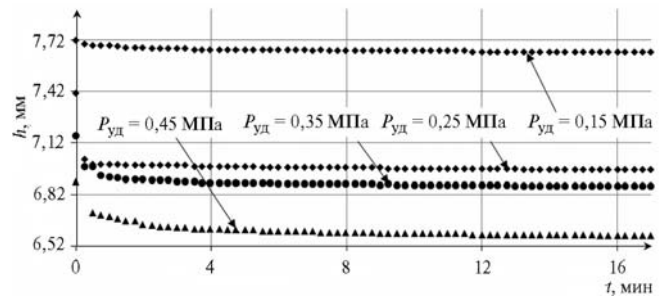


Рис. 4. Зависимость толщины образца  $h$  от времени  $t$  при подпрессовке в холодном состоянии

прекращается полностью. Установлено, что за 15 мин процесса подпрессовки уплотнение образцов составили 1, 6, 4 и 4,5% при удельном давлении прессования 0,15, 0,25, 0,35 и 0,45 МПа соответственно.

Подогрев плит пресса при горячем прессовании выполнялся в соответствии с температурно-временным режимом отверждения. Режим отверждения предполагал нагрев со скоростью  $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  до температуры  $170^{+5}\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выдержку не менее 3 ч. За начальную толщину образца принималось минимальное значение толщины, регистрируемое при проведении подпрессовки в холодном состоянии (см. рис. 4). Начальные толщины образцов составили 7,65; 6,95; 6,87 и 6,58 мм при удельном давлении прессования 0,15; 0,25; 0,35 и 0,45 МПа соответственно.

При горячем прессовании контролировали температуру пяти элементов конструкции пресса с помощью термодпар типа ХК (см. рис. 3).

Регулирование температурно-временного режима выполнялось по термодпарам, установленным в алюминиевых плитах 5, 7 (см. рис. 3). Проведенные исследования на образцах с толщиной до 8 мм показали разброс температуры образца и плит не более чем на  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Установлено, что основной процесс уплотнения происходит на участке подъема температуры. В связи с этим настройки регулятора температуры выбраны так, чтобы обеспечить минимальную амплитуду колебаний температуры алюминиевых плит пресса на участке подъема температуры. Значения коэффициентов составили  $K_p = 5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $K_i = 740\text{ с}$  и  $K_d = 90\text{ с}$  соответственно. При этом величина отклонения температур верхней и нижней плит не превышала  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  на

участке подъема температуры режима отверждения.

Результаты контроля температуры и изменение толщины образцов при проведении горячего прессования с учетом относительного удлинения конструкций пресса представлены на рис. 5, 6.

Относительные удлинения элементов конструкции пресса рассчитывали, используя результаты контроля температуры элементов конструкции пресса при горячем прессовании (см. рис. 3), по формуле

$$\Delta l_i(t) = l_{0i} \alpha_i [T_i(t) - T_i(0)], \quad (2)$$

где  $i$  — номер позиции элемента конструкции (см. рис. 4);  $l_{0i}$  — размер, мм, при  $t = 0$ ;  $\alpha_i$  — коэффициент линейного термического расширения (КЛТР),  $1/K$ ;  $T_i(t)$ ,  $^{\circ}C$  — текущая температура;  $T_i(0)$ ,  $^{\circ}C$  — температура в момент времени  $t = 0$ ;  $\Delta l_i(t)$  — текущее значение относительного удлинения  $i$ -го элемента конструкции пресса.

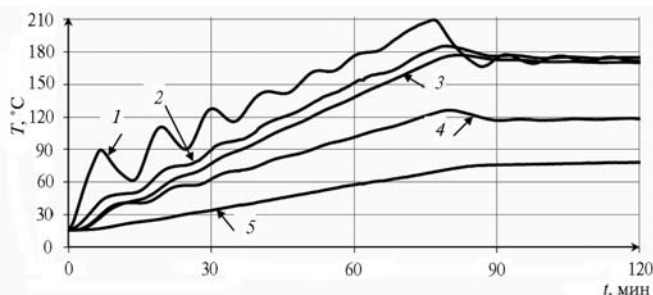


Рис. 5. Экспериментальные зависимости температуры  $T$  элементов конструкции прессового оборудования от времени  $t$  в процессе горячего прессования:

1 — спираль; 2 — плита с водным охлаждением; 3 — плита верхняя; 4 — плита; 5 — основание

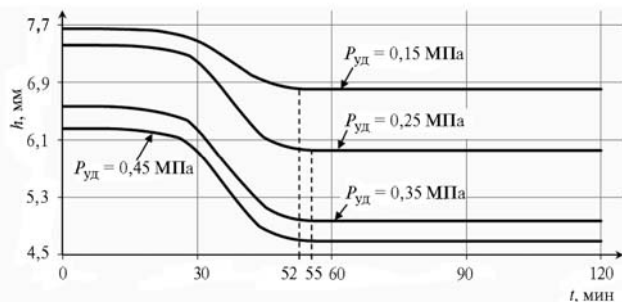


Рис. 6. Экспериментальные зависимости толщины образцов  $h$  от времени  $t$  в процессе горячего прессования

Используемые значения параметров [5] для соответствующих элементов конструкции приведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер позиции	Элемент конструкции пресса	Материал	КЛТР, $1/K$	Начальная толщина, мм	Начальная температура, $^{\circ}C$
1	Основание	Сталь	$13 \cdot 10^{-6}$	25	16,1
2	Плита	Бетон	$1 \cdot 10^{-6}$	20	16
3	Спираль	Сталь	$13 \cdot 10^{-6}$	20	17,1
4	Плита с охлаждением	Сталь	$13 \cdot 10^{-6}$	34	16,4
5	Верхняя плита	Алюминий	$22,2 \cdot 10^{-6}$	9	15,8

Изменение толщины образцов в процессе горячего прессования с учетом КЛТР элементов конструкции пресса определяли по формуле

$$h_8(t) = h(t) + \sum_i \Delta l_i(t), \quad (3)$$

где  $h_8(t)$  — текущая толщина образца с учетом КЛТР элементов конструкции пресса, мм;  $h(t)$  — текущая толщина образца, полученная экспериментальным путем, мм;  $t$  — время, мин;  $i$  — номер позиции элемента конструкции (см. рис. 3).

По окончании горячего прессования образцы контролировали по толщине кронциркулем. По результатам 15 измерений для каждого образца определялось среднее значение толщины.

Сравнительные результаты определения толщины образцов по кривым уплотнения (см. рис. 6) и контроля толщины после горячего прессования представлены в табл. 3.

Таблица 3

Номер образца	Удельное давление прессования, МПа	Минимальное значение толщины, определяемое по кривым уплотнения, мм	Среднее значение толщины образца, определяемое кронциркулем, мм	Отклонение расчетных и экспериментальных значений, %
1	0,15	6,81	6,43	6
2	0,25	5,96	5,74	4
3	0,35	4,97	5,71	13
4	0,45	4,69	5,5	15

Из экспериментальных зависимостей толщины образцов при горячем прессовании следует, что значительное уплотнение материала наблюдается в течение 55 мин от начала процесса. По истечении указанного времени изменение толщины образца прекращается. Это можно объяснить процессом гелеобразования, который начинается в интервале температур 124...130 °С и соответствует диапазону времени 52...55 мин. Результаты расчета координаты точки гелеобразования в соответствии с математической моделью [6] показали, что время гелеобразования соответствует 56 мин, а температура 130 °С.

Практический интерес представляли первые 120 мин, поскольку в указанный период времени температура основных элементов конструкции претерпевает наибольшие изменения.

Установлено, что за 120 мин ведения режима прессования уплотнение образцов составляет 11, 20, 24 и 25 % при удельном давлении прессования 0,15, 0,25, 0,35 и 0,45 МПа соответственно. С ростом удельного давления прессования возрастает относительное уплотнение материала. Тем не менее, в интервале значений удельного давления прессования 0,35...0,45 МПа значительной разницы в значениях относительного уплотнения не наблюдается. Это можно объяснить тем, что в рассматриваемом интервале удельных давлений толщина монослоя материала в основном определяется толщиной углеродного наполнителя, а нанос связующего стремится к предельно низкому зна-

чению. Максимальная величина общего удлинения элементов конструкции пресса составила 0,19 мм.

Таким образом, в данной работе представлена динамика процесса уплотнения композиционного материала при горячем прессовании. Определяемые в исследовании значения конечной толщины образцов хорошо согласуются с результатами контроля толщины. Полученные результаты свидетельствуют о корректном учете относительного удлинения конструкций пресса при горячем прессовании. Результаты работы могут представлять практический интерес для организаций, занимающихся исследованиями в области формования композитов.

### Литература

1. *Дмитриев А.О., Мищенко С.В.* Метод исследования параметров течения связующего при отверждении композитов. Вестник ТГТУ. 2005. Т. 11. № 1А. С. 53—61.
2. *Timothy G. Gutowski.* A Resin Flow/Fiber Deformation Model for Composites // SAMPE Quarterly. Vol. 16. N 4. July 1985. P. 58—64. 1987.
3. *Thompson J.E.* «Compaction and Cure of Resin Film Infusion Prepregs // Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Engineering Mechanics, 2004.
4. *Nuno Andre Curado Mateus Correia.* Analysis of the Vacuum Infusion Moulding Process // Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy, 2004.
5. <http://temperatures.ru/sprav/sprav2.php?page=8>.
6. *Тарасов В.А., Беляков Е.В.* Математическое моделирование процесса неизотермического отверждения полимерных композитных конструкций РКТ // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 2011. № 1. С. 113—120.

Статья поступила в редакцию 24.10.2011