

УДК 539:374.002.62

Ю.В. ВАСИЛЕВИЧ, д-р физ.-мат. наук; К.А. ГОРЕЛЫЙ, канд. техн. наук;
С.В. САХОНЕНКО, канд. физ.-мат. наук; А.В. САХОНЕНКО
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ КОМПОЗИТА В ПРОЦЕССЕ «НАГРЕВАНИЕ — ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ — ОХЛАЖДЕНИЕ»

Проведены экспериментальные исследования, посвященные изучению процессов, происходящих при нагревании цилиндрической оболочки в состоянии препрега, ее полимеризации и охлаждении. Указанные процессы необходимо учитывать при расчете остаточных напряжений. Предложен способ нахождения усадки связующего при его отверждении. Разработан прибор для проведения таких исследований.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, препрег, процессы нагревания, полимеризация, охлаждение, усадка

Развитие промышленного производства композитов невозможно без широкого внедрения технологии изготовления изделий из полуфабрикатов, в частности, препрегов. При этом к полимерным связующим предъявляются дополнительные требования технологического характера, основными из которых являются сочетание длительной жизнеспособности при температуре хранения и достаточно высокие реакционные способности при температурах переработки [1–8].

Прежде чем тканый препрег используется для намотки оболочек, он обязан пройти следующие технологические операции. Вначале ткань пропитывается связующим из ванночки. Затем, проходя между валков коландра, лишнее связующее отжимается. Чтобы ткань не слипалась в рулоне при хранении, она просушивается в сушильных шкафах при температуре 100–120 °С. Во всяком случае проходит несколько суток, пока не начнется намотка препрега на оправку.

Проведенные исследования показали, что за этот период при самых неблагоприятных условиях полимеризация связующего происходит не более чем на 0,5 %. Для эпоксидных связующих полимеризация наступает после истечения некоторого времени при температуре более 140 °С. Это обстоятельство обеспечивает более глубокую пропитку ткани во время намотки ткани и в процессе разогрева связующего.

Воспользовавшись этим моментом, можно предположить, что в начальный момент времени после приготовления связующего его полимеризация практически незаметна. Следовательно, химическая усадка в начальный момент времени отсутствует при быстром нагревании связующего до 120 °С. Таким образом, если разогревать связующее до температуры 120 °С, то оно будет только термически расширяться.

Усадку определяют различными методами: непосредственным определением объема отверждающейся системы, определением ее плотности или линейных размеров и др. Наиболее точные данные дают объемные dilatометрические методы, при которых непосредственно измеряют объем системы в течение всего процесса отверждения. Методы, основанные на измерении плотности, не позволяют проводить определенные усадки при повышенных температурах, а методы, основанные на измерении линейных размеров, не позволяют проводить измерения после гелеобразования.

Усадка при отверждении варьируется в довольно больших пределах. Однако полученные данные, приведенные в [9–11], позволяют сделать предположение, что для всех типов отвердителей значение усадки, рассчитанное на моль эпоксидных групп, как в период до гелеобразования, так и после, является постоянным. Это дает возможность легко прогнозировать усадку композита в твердом состоянии, когда полимер не обладает текучестью. Объемная усадка всех композиций эпоксидных связующих до гелеобразования составляет 9 см³/моль, а после гелеобразования 7 см³/моль [10]. Таким образом, если m_1 — усадка связующего до гелеобразования, то общая усадка связующего в результате полимеризации может быть рассчитана по формуле

$$m = m_1 \cdot \frac{7+9}{9}. \quad (1)$$

Такое обстоятельство позволяет использовать методы, основанные на измерении линейных размеров для определения величин усадки связующих при полимеризации, если разделим определение усадки на две фазы: в жидком и твердом состояниях.

Для определения химической и термической усадок связующего разработан прибор, схема которого показана на рисунке 1.

На первом этапе исследований с помощью прибора можно определить коэффициент термического расширения связующего и его изменение при температуре от 20 °С до 120 °С.

Пусть произошло изменение температуры окружающей среды на величину ΔT . Тогда размеры прибора, указанные на рисунке, приобретут величины

$$R + \Delta R; l + \Delta l; l_1 + \Delta l_1; l_2 + \Delta l_2.$$

При этом

$$\Delta R = R\alpha_M \cdot \Delta T;$$

$$\Delta l = l\alpha_M \cdot \Delta T;$$

$$\Delta l_1 = l_1\alpha_M \cdot \Delta T,$$

где α_M — коэффициент линейного расширения металла.

Величину Δl_2 найдем из следующих соображений. Объем связующего, содержащегося в цилиндре радиуса R и высотой l_2 , после воздействия температуры должен быть равным объему внутренности металлического цилиндра размером $R + \Delta R$ и $l_2 + \Delta l_2$. Отсюда найдем, что

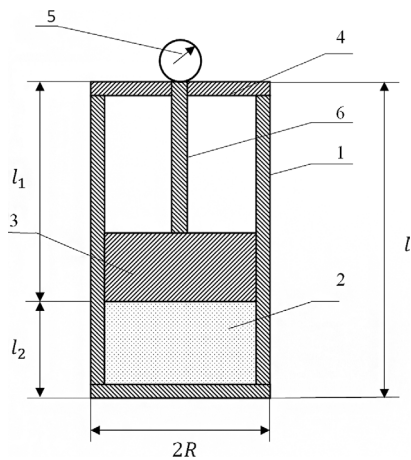


Рисунок 1 — Схема прибора: 1 — колба стальная; 2 — связующее; 3 — поршень стальной; 4 — крышка; 5 — микрометр; 6 — шток

$$\Delta l_2 = l_2 (3\alpha_C - 2\alpha_M) \Delta T, \quad (2)$$

где α_C — коэффициент линейного расширения связующего.

Показания микрометра вычисляются из условия совместности перемещений штока и деформаций корпуса и увеличения высоты цилиндра связующего в корпусе прибора. Таким образом

$$\delta = l_1 + \Delta l_1 + l_2 + \Delta l_2 - l - \Delta l,$$

где δ — показания микрометра.

Подставим в эту зависимость исходные данные и зависимость (2). В результате найдем искомую величину α_C

$$\alpha_C = \frac{\delta}{3l_2} + \alpha_M, \quad (3)$$

здесь δ берется из эксперимента; α_M — известная величина.

В формуле (2) $\Delta T = T_1 - T_0$, где T_0 — значение температуры в исходном состоянии (показания микрометра перед испытанием должны быть обнулены); T_1 — температура при проведении испытаний.

Были проведены экспериментальные исследования, посвященные изучению процессов, происходящих при нагревании цилиндрической оболочки в состоянии препрега, ее полимеризации и охлаждения. Для этого на оправку диаметром 180 мм была намотана пропитанная связующим ЭП-5122 ткань Т13 П(100) толщиной 25 мм. На глубине H , равной 5, 10, 15, 20, 25 мм от оправки, были расположены тензометрические датчики. В дальнейшем производилось измерение их сопротивления

Таблица 1 — Относительные удлинения $\epsilon_0 \cdot 10^{-3}$ при нагревании

T, °C	Глубина H, мм					Время нагрева, мин
	5	10	15	20	25	
20	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	16
40	0,0206	0,0206	0,0170	0,0061	0,0097	26
60	0,1962	0,4335	0,1756	0,1574	0,1223	38
80	0,4384	0,4360	0,4033	0,3778	0,2713	52
100	0,6975	0,7230	0,7145	0,6649	0,4335	70
120	0,8889	0,9688	0,9737	0,9192	0,5510	93
140	0,9410	1,1941	1,0596	0,9749	0,4820	128
160	0,8816	1,1141	0,9749	0,9034	0,3185	170

в зависимости от изменения температуры окружающей среды и времени выдержки в этой среде. Электрическое сопротивление датчиков связано с их относительным удлинением. Таким образом, датчики измеряли относительное удлинение материала оболочки в кольцевом направлении. Такая связь была установлена путем тарирования датчиков.

В виду невозможности проведения измерений деформаций, происходящих в материале в процессе намотки оболочки на оправку, тензометрирование на этом этапе не проводилось. Для выполнения таких исследований необходимо приобрести дополнительное оборудование и произвести его доработку.

Относительные удлинения материала оболочки представлены в таблицах 1–3.

По данным таблиц 1–3 построены графики изменения относительного удлинения ϵ_0 от времени, которые представлены на рисунках 2–4.

В самом начале, когда идет разогрев оболочки, заметно линейное изменение ϵ_0 (см. рисунок 2). Это означает, что изменение ϵ_0 происходит только по причине температурных колебаний. Через 90 минут начинается процесс полимеризации. На графиках 3 и 4 такое изменение показано в виде уменьшения деформации за счет усадки связующего. На графике 4 уменьшение деформации осуществляется только за счет уменьшения температуры.

Обычно при расчете остаточных напряжений учитывают напряжения в виде термоусадки при охлаждении. На основании графика на рисунке 4 она составляет примерно $0,7x \cdot 10^{-3}$. В то же время усадка материала оболочки при усадке связующего равна $1,2x \cdot 10^{-3}$.

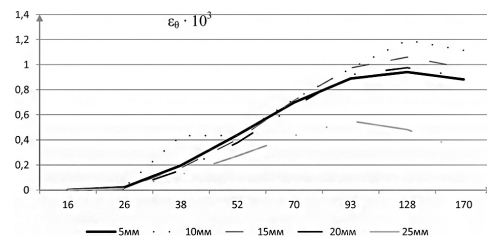


Рисунок 2 — Изменение относительного удлинения ϵ_0 от времени при нагревании

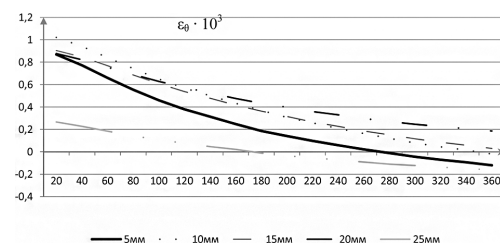


Рисунок 3 — Изменение относительного удлинения ϵ_0 от времени при полимеризации

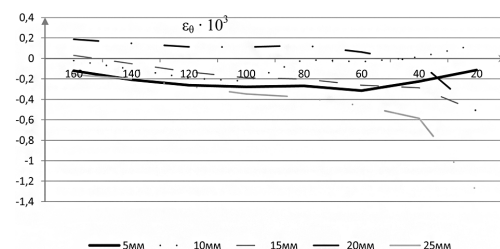


Рисунок 4 — Изменение относительного удлинения ϵ_0 от времени при охлаждении

Таблица 2 — Относительные удлинения ϵ_0 , 10^{-3} при полимеризации

Время выдержки, мин	Глубина H, мм				
	5	10	15	20	25
20	0,8683	1,0209	0,9034	0,8768	0,2664
40	0,7714	0,9398	0,8453	0,8223	0,2265
60	0,6588	0,8404	0,7678	0,7545	0,1829
80	0,5534	0,7436	0,6866	0,6891	0,1429
100	0,4602	0,6491	0,6079	0,6273	0,1054
120	0,3803	0,5692	0,5377	0,5740	0,0775
140	0,3137	0,5014	0,4771	0,5256	0,0460
160	0,2470	0,4335	0,4166	0,4759	0,0206
180	0,1865	0,3682	0,3621	0,4323	-0,0121
200	0,1417	0,3076	0,3161	0,3972	-0,0363
220	0,0969	0,2579	0,2664	0,3597	-0,0533
240	0,0593	0,2083	0,2277	0,3294	-0,0727
260	0,0206	0,1635	0,1865	0,2979	-0,0908
280	-0,0121	0,1199	0,1502	0,2713	-0,1102
300	-0,0436	0,0787	0,1150	0,2458	-0,1235
320	-0,0702	0,0448	0,0860	0,2252	-0,1368
340	-0,0945	0,0145	0,0593	0,2059	-0,1490
360	-0,1211	-0,0206	0,0291	0,1865	-0,1611

Заметные деформации за счет усадки связующего влияют на изменение напряженного состояния в цилиндрической оболочке, увеличивая в ней остаточное напряжение. Отсюда возникает необходимость учитывать усадочные явления при расчете остаточных напряжений, которые влияют на прочность. Однако для проведения расчетов необходимо знать для связующего его усадку как в жидком состоянии, так и в твердом. В результате вытекает необходимость в проведении экспериментальных исследований по определению величины усадочных явлений в связующем при его полимеризации, например, можно воспользоваться методом, изложенном в начале работы. Такие исследования будут проведены в ближайшее время на предприятии ОАО «Авангард».

Вывод. Показано, что роль химической усадки связующего в образовании остаточных напряжений в цилиндрических оболочках из композиционных материалов не менее важна, чем термическая усадка при их охлаждении. При расчете остаточных напряжений

Таблица 3 — Относительные удлинения ϵ_0 , 10^{-3} при охлаждении

T, °C	Глубина H, мм					Время охлаждения, мин
	5	10	15	20	25	
160	-0,1211	-0,0206	0,0291	0,1865	-0,1611	0
140	-0,2083	-0,1054	-0,0521	0,1477	-0,1986	14
120	-0,2628	-0,1926	-0,1332	0,1138	-0,2725	37
100	-0,2773	-0,2228	-0,1901	0,1102	-0,3464	68
80	-0,2688	-0,0121	-0,2022	0,1259	-0,3803	107
60	-0,3149	-0,0327	-0,2616	0,0630	-0,4626	149
40	-0,2252	0,0145	-0,2870	-0,0363	-0,5849	210
20	-0,1138	0,1332	-0,5147	-0,5171	-1,2934	300

необходимо учитывать изменение напряжений и от химической усадки.

Список литературы

1. Розенберг, Б.А. Проблемы технологической монолитности изделий из композиционных материалов / Б.А. Розенберг, Н.С. Ениколопан // Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева. — 1978. — Т. 23, № 3. — С. 298–304.
2. Благонрадов, В.Л. Технологические задачи механики конструкций из композитных материалов / В.Л. Благонрадов, А.Н. Воронцов // Механика композитных материалов. — 1987. — № 5. — С. 859–877.
3. Томашевский, В.Т. О задачах механики в технологии композитных материалов / В.Т. Томашевский // Механика композитных материалов. — 1982. — № 3. — С. 486–503.
4. Болотин, В.В. Влияние технологических факторов на механическую надежность конструкций из композитов / В.В. Болотин // Механика полимеров. — 1972. — № 3. — С. 529–540.
5. Варушкин, Е.М. Исследование температурных остаточных напряжений и деформаций в толстостенных намоточных изделиях из армированных пластиков / Е.М. Варушкин // Механика полимеров. — 1971. — № 6. — С. 1040–1046.
6. Молодцов, Г.А. Структурные остаточные напряжения в ориентированных стеклопластиках / Г.А. Молодцов // Механика полимеров. — 1968. — № 6. — С. 1051–1058.
7. Болотин, В.В. Об усадке эпоксидных связующих в процессе отверждения / В.В. Болотин, К.С. Болотина // Механика полимеров. — 1972. — № 1. — С. 178–181.
8. Благонрадов, А.А. Лаковые эпоксидные смолы / А.А. Благонрадов, А.И. Непомнящий. — М.: Химия, 1970. — 248 с.
9. Калинин, В.А. Намотанные стеклопластики / В.А. Калинин, М.С. Макаров. — М.: Химия, 1996. — 272 с.
10. Чернин, И.З. Эпоксидные полимеры и композиции / И.З. Чернин, Ф.М. Смехов, Ю.В. Жердяев. — М.: Химия, 1982. — 232 с.
11. Ли, Х. Справочное руководство по эпоксидным смолам / Х. Ли, К. Невилл; пер. с англ. Н.В. Александрова. — М.: Энергия, 1973. — 415 с.

Vasilevich Yu.V., Gorely K.A., Sakhonenko S.V., Sakhonenko A.V.

Experimental studies of deformation characteristics of the cylindrical shell of woven composite during the “heating – polymerization – cooling”

Experimental studies devoted to the study of the processes occurring during heating of a cylindrical shell in the state of prepreg, its polymerization and cooling are conducted. These processes should be considered in the calculation of residual stresses. A method for finding the shrinkage of the binder when it hardens is proposed. A device for carrying out of such studies is developed.

Поступил в редакцию 01.08.2016.