

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСАДКИ ВЛИЯНИЯ
ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО НА НАПРЯЖЕНИЯ
В НАМОТОЧНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ИЗДЕЛИЯХ**

Ю.В. ВАСИЛЕВИЧ

*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь*

Д.А. ФЕДОТОВ

ОАО «Авангард» Сафоново, Российская Федерация

Е.Ю. НЕУМЕРЖИЦКАЯ

*Академия последипломного образования,
г. Минск, Республика Беларусь*

Разработана методика расчета усадки влияния эпоксидного связующего на напряжения в намоточных композитных изделиях.

Высокоэластическая деформация является объемной деформацией и характеризуется низким объемным модулем упругости. Она может существовать совместно с упругой деформацией при этом высокоэластичная деформация, может быть больше упругой во много раз. Это означает, что при расчетах деформации жидких полимеров упругой деформацией можно пренебречь. Таким образом, объемная деформация полимера ε может быть вычислена по формуле

$$\varepsilon = \frac{p}{3E_c}, \quad (1)$$

где p – давление сжатия полимера; E_c – линейный модуль упругости полимера при сжатии.

В связи с изложенным рассмотрим влияние процесса усадки эпоксидного связующего, обладающего свойствами жидкости при его отверждении, на напряжения в намоточных изделиях.

Поставленную задачу будем решать на основании уравнений, полученных из условий равновесия и совместности деформаций наполнителя и связующего, когда связующее обладает свойствами жидкости.

В результате с учетом принятых гипотез имеем

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= m(\varepsilon_{rc} + \varepsilon_c) + \varepsilon_{rH}(1 - m), \\ \varepsilon_\theta &= \varepsilon_{\theta H}, \\ \sigma_{rH} &= \sigma_r = \sigma_{rc} = \sigma_{\theta c} = p, \\ \sigma_\theta &= mp + (1 - m)\sigma_{\theta H}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$ – осредненные деформации препрега в радиальном и кольцевом направлениях;

m – относительное содержание связующего в препреге;

ε_{rc} и ε_{rH} – деформации связующего и наполнителя в радиальном направлении;

ε_c – химическая деформация связующего;

$\varepsilon_{\theta H}$ – деформация нитей в кольцевом направлении;

σ_{rH} и $\sigma_{\theta H}$ – напряжения в наполнителе в радиальном и кольцевом направлениях;

σ_r и σ_θ – осредненные напряжения препрега в радиальном и кольцевом направлениях соответственно;

σ_{rc} и $\sigma_{\theta c}$ – напряжения в связующем в радиальном и кольцевом направлениях;

p – давление сжатия связующего.

Предполагается, что материал наполнителя (нити) является изотропным и подчиняется закону Гука

$$\begin{aligned}\varepsilon_{rH} &= \frac{1}{E_H} (\sigma_{rH} - \nu_H \sigma_{\theta H}) = \frac{1}{E_H} (\sigma_r - \nu_H \sigma_{\theta H}), \\ \varepsilon_{\theta H} &= \frac{1}{E_H} (\sigma_{\theta H} - \nu_H \sigma_{rH}) = \frac{1}{E_H} (\sigma_{\theta H} - \nu_H \sigma_r)\end{aligned}\quad (3)$$

где E_H и ν_H – модуль упругости и коэффициент Пуассона наполнителя.

Для связующего, представляющего собой неотверждённую систему из полимерной массы справедлив вывод, сделанный в (1), и поэтому закон Гука в условиях сжатия можно записать в виде

$$\varepsilon_{rc} = \varepsilon_{\theta c} = \frac{P}{E_c} = \frac{\sigma_r}{E_c}\quad (4)$$

где E_c – линейный модуль упругости связующего, находящегося в условиях сжатия;

$\varepsilon_{\theta c}$ – деформация связующего в кольцевом направлении.

Связь между осредненными напряжениями и деформациями композита имеет вид, характерный для ортотропного тела

$$\begin{aligned}\varepsilon_\theta &= \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} - \nu_{\theta r} \frac{\sigma_r}{E_r} \\ \varepsilon_r &= \frac{\sigma_r}{E_r} - \nu_{r\theta} \frac{\sigma_\theta}{E_\theta}\end{aligned}\quad (5)$$

где E_θ и E_r – осредненный модуль упругости препрега в кольцевом и радиальном направлениях;

$\nu_{\theta r}$ и $\nu_{r\theta}$ – коэффициенты Пуассона в кольцевом и радиальном направлениях соответственно.

Справедливость формулы (4) подтверждена экспериментальными исследованиями при определении модуля E_r в цилиндрической оболочке из препрега. Проанализировав результаты испытаний убеждаемся, что радиальные перемещения практически пропорциональны действующему кольцевому натяжению T_0 .

К уравнениям (2) – (5) следует добавить уравнение равновесия

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} - \frac{1}{r}(\sigma_r - \sigma_\theta) = 0$$

где r – текущий радиус оболочки композита.

На основании приведенных формул разработана методика расчета напряжений в намоточных изделиях [1,2].

В качестве примера выполнен расчет радиального напряжения для цилиндрической оболочки при: $E_H = 8 \cdot 10^4$ МПа; $\nu_c = \nu_H = 0,3$; $m = 0,3$; $\varepsilon_c = -0,006$; $E_r = 0,39$ МПа. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Напряжения σ_r в результате химической усадки связующего на стадии полимеризации в жидком состоянии

r , м	$\sigma_r \cdot 10^3$, МПа	r , м	$\sigma_r \cdot 10^3$, МПа	r , м	$\sigma_r \cdot 10^3$, МПа
1	-7,02	1	-7,02	1	-7,02
1,005	-6,98	1,01	-6,95	1,015	-6,92
1,011	-6,94	1,02	-6,88	1,03	-6,81
1,016	-6,91	1,03	-6,81	1,045	-6,72
1,021	-6,88	1,04	-6,75	1,06	-6,62
1,026	-6,84	1,049	-6,69	1,075	-6,53
1,032	-6,80	1,059	-6,63	1,09	-6,44
1,037	-6,77	1,069	-6,57	1,105	-6,35
1,042	-6,74	1,079	-6,51	1,12	-6,27
1,047	-6,70	1,089	-6,45	1,134	-6,19
1,053	-6,67	1,099	-6,39	1,149	-6,11

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелый, К.А. Расчет напряжений в препреге, возникающих в результате химической усадки связующего / К.А. Горелый, Е.В. Малютин, С.В. Сахоненко, К.Г. Скворцов, Д.А. Федотов, А.В. Сахоненко // Новые технологии: материалы XIII Всероссийской конференции, посвященной памяти референта МСНТ Н.Н. Ершовой / Российская академия наук. – Москва, 2016. – С. 25–35.

2. Василевич, Ю.В. Расчетное обоснование использования свойств препрегов в условиях производства изделий из композиционных материалов / Ю.В. Василевич, Э.Б. Епишин, Е.В. Малютин, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, К.Г. Скворцов, Д.А. Федотов // Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. – М.: РАН, 2019. – 299 с.