

**АНАЛИЗ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ВОЛОКНАХ,
ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ СВЯЗУЮЩЕГО
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ НЕТКАНЫХ ПОЛОТЕН**

**ANALYSIS OF FIBER INTERNAL STRESS CAUSED IN THE PROCESS
OF POLYMERIZATION OF A CONNECTING LINK
AT MANUFACTURING COMPOSITE NONWOVEN MATERIALS**

Ю.М. ТРЕЩАЛИН
YU.M. TRESHCHALIN

(Московский государственный технологический университет "СТАНКИН")
(Moscow State Technological University "Stankin")
e-mail: <http://www.stankin.ru/>

В статье осуществлен анализ напряженно-деформированного состояния волокнистой основы композиционного материала, обусловленного полимеризацией связующего. В результате получены зависимости, позволяющие определить возникающие в волокнах напряжения и деформации, что дает возможность наиболее рационально использовать различные виды волокон при изготовлении композитов.

The article analyzes the stress-strain state of a fibrous framework of a composite material due to polymerization of a connecting link. As a result, the dependences allowing to determine the stress and strain appearing in fibers have been received, that makes it possible to use different types of fibers in making composites more efficiently.

Ключевые слова: связующее, композиционный материал, процесс полимеризации, напряжения, деформация, волокно.

Keywords: a connecting link, a composite material, a polymerization process, voltage, strain, a fiber.

В настоящее время композиционные материалы, армированные синтетическими волокнами, получили достаточно широкое распространение в различных областях промышленности и строительства. Тем не менее, взаимодействие армирующего компонента и связующего в процессе его полимеризации недостаточно полно изучено. Особенно это касается композитов, созданных на основе волокнистых каркасов, в частности, нетканых полотен.

Композиционный материал, изготовленный на основе иглопробивных нетканых полотен, представляет собой гетерогенную систему, состоящую из хаотически расположенных волокон и связующего,

которое после полимеризации обеспечивает монолитность композита. Свойства изделия из такого материала зависят от характеристик и особенностей армирующих элементов, физико-химического взаимодействия волокон со связующим, восприятия внешних нагрузок в процессе эксплуатации, температурно-влажностного режима и т.д. При этом прочность материалов во многом определяется равномерностью расположения волокон в объеме основы и взаимодействием между волокном и полимерным связующим (адгезией), имеющим первостепенное значение [1]. Чем лучше адгезия связующего к поверхности наполнителя и чем выше

упругие свойства полимерной среды. Следует отметить, что композиты на основе полипропиленовых волокон обладают свойством сохранения пластичности и механической прочности после многократных циклов охлаждения и нагревания от 300 до 4,2 К.

Связующее обеспечивает равномерность функционирования под нагрузкой структурных элементов (волокон) в композиционном материале. Кроме того, связующее склеивает волокна и защищает их от воздействия внешней среды.

Процесс полимеризации связующего всегда сопровождается изменением объема, что может привести к возникновению внутренних напряжений, способствующих появлению неравновесного состояния основы, которое отрицательно сказывается на прочностных свойствах и может привести к искажению формы изделий [2], [3]. При этом волокна основы испытывают поперечное сжатие. Эластичность волокон позволяет пренебречь их сжимаемостью по длине, так как в результате приложения нагрузки единичное волокно может иметь большую или меньшую извитость.

Деформация единичного волокна неизбежно повлечет за собой деформацию нетканого полотна в целом. При поперечном сжатии пленка полимера, прилегающая к волокну, растягивается, что способствует снижению физико-механических свойств композита. Кроме того, процесс полимеризации связующего связан с химической реакцией между его компонентами, в ходе которой наблюдается выделение тепла. В результате происходит разогрев полимеризующейся массы до температуры 50...60°C. При этом процесс полимеризации проходит неравномерно по всему объему основы и наиболее интенсивно реакция осуществляется в приграничном слое [3].

Целью данного исследования является определение напряжений, возникающих в волокне и, как следствие, деформации волокна при полимеризации связующего в порах нетканой основы, что позволит оценить возможность использования тех

или иных видов волокон при изготовлении композиционных материалов на базе нетканых полотен.

Наиболее целесообразно рассмотреть совместные деформации на модели среды, состоящей из отдельных волокон, образующих ортогональную сетку по главным осям и отверждающегося связующего. Возникающие напряжения рассчитываются при следующих условиях и допущениях:

- волокна имеют одинаковый диаметр и рассматриваются как ортотропная, а связующее – изотропная среды;
- напряженно-деформированное состояние произвольного макрообъема композита считается однородным в горизонтальном направлении, то есть продольное расположение волокон совпадает с направлением главных осей;
- ортогонально направленные семейства волокон равноправны по плотности расположения, свойствам, геометрическим размерам:

$$E_1=E_2=E_3=v_{12}=v_{13}=v_{21}=v_{23}=v_{31}=v_{32}=v.$$

Вследствие того что волокна, в том числе принадлежащие различным семействам, не взаимодействуют между собой, коэффициент Пуассона волокон можно считать $\nu = 0$. В случае одноосного сжатия $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = 0$. Связь напряжений и деформаций, обусловленных полимеризацией связующего, имеет вид:

- для волокнистой структуры

$$\varepsilon_1 = \sigma_1/E_B + \alpha t;$$

- для связующего

$$\varepsilon_{1C} = \frac{\sigma_{1C} - 2\nu_{1C}\sigma_{2C}}{E_C} + \alpha_{1C}t,$$

где E_B , E_C – соответственно модули упругости волокна и связующего; α , α_{1C} – температурные коэффициенты линейного расширения волокна и связующего; $t=t_1 - t_0$ – интервал температур, в котором проходит процесс полимеризации; ν_{1C} – коэффициент Пуассона связующего.

Без учета массовых сил:

$$\sigma_1 S_B + \sigma_{1c} S_c = P_0 (S_B + S_c) = P_0 S_{\text{общ}},$$

где S_B, S_c – соответственно площади волокон и связующего в рассматриваемом

$$\sigma_1 S_B + \sigma_{1c} S_c = [\sigma_1 S_B / (S_B + S_c)] + \sigma_{1c} S_c / (S_B + S_c) = \sigma_1 \gamma_1 + \sigma_{1c} (1 - \gamma_1) = 0, \quad (1)$$

где $\lambda_1 = S_B / S_{\text{общ}} = \ell S_B / \ell S_{\text{общ}} = V_1 / V_{\text{общ}}$ – доля волокон в рассматриваемой площади сечения композита.

Используя модель трехмерного ортогонального расположения волокон, можно предположить, что $V_1 = V_B / 3$, то есть в произвольно взятом сечении всегда имеется не менее трети от общего числа волокон, находящихся в соответствующем макрообъеме среды.

Тогда:

$$\lambda_1 = V_B / 3 V_{\text{общ}} = \gamma / 3,$$

$$\sigma_{2c} (1 - v_{1c}) = v_{1c} \sigma_{1c} - A E_c = v_{1c} \sigma_{1c} / (1 - \gamma_{1c}) - A E_c / (1 - v_{1c}),$$

где A – деформация связующего, обусловленная его полимеризацией в порах основы.

$$(\zeta \sigma_{1c} / E_B) + \alpha t = (1 / E_c) \left[\frac{\sigma_{1c} - 2 v_{1c} v_{1c} \sigma_{1c}}{1 - v'} - A E_c / (1 - v_{1c}) \right] + A.$$

Тогда:

$$\sigma_{1c} = \frac{[2 v_{1c} A / (1 - v_{1c})] + A - \alpha t}{-[(3 - \gamma) / \gamma E_B] - (1 / E_c) + [2 v_{1c}^2 / E_c (1 - v_{1c})]}, \quad (2)$$

$$\sigma_1 = \frac{-[(3 - \gamma) / \gamma] - \{ [2 v_{1c} A / (1 - v_{1c})] + A - \alpha t \}}{-[(3 - \gamma) / \gamma E_B] - (1 / E_c) + [2 v_{1c}^2 / E_c (1 - v_{1c})]}. \quad (3)$$

Зависимости (2) и (3) позволяют определить напряжения, возникающие в связующем в процессе полимеризации σ_{1c} и волокнах σ_1 для случая $P = 0$. Однако представляется целесообразным проанализировать вариант, когда $P_0 = P \neq 0$, что даст возможность получить достоверные результаты расчета σ_1 и σ_{1c} .

Если $P_0 = P$, то:

$$\sigma_1 S_B + \sigma_{1c} S_c = P (S_B + S_c)$$

сечении; P_0 – некоторое осредненное давление в выбранном сечении среды.

Первоначально, пренебрегая давлением, условие равновесия запишется:

где $\lambda = V_B / V_{\text{общ}}$ – коэффициент объемного содержания волокон.

Преобразуя (1), получаем:

$$\sigma_{1c} = -\sigma_1 \gamma_1 / (1 - \gamma_1) = -\sigma_1 \gamma / [3(1 - \gamma/3)].$$

Тогда:

$$\varepsilon_1 = (\zeta \sigma_{1c} / E) + \alpha t.$$

Выражая σ_{2c} через σ_{1c} :

Используя $\sigma_1 = \zeta \sigma_{1c} /$ и приравнявая ε_1 для волокна и связующего:

или

$$\sigma_1 \gamma_1 + \sigma_{1c} (1 - \gamma_1) = P.$$

Тогда:

$$\sigma_1 = (P / \gamma_1) - [\sigma_{1c} (1 - \gamma_1) / \gamma_1] = \psi P + \zeta \sigma_{1c},$$

где $\psi = 1 / \gamma_1$.

Выражения для σ_2 и σ_{2c} одинаковы как при $P = 0$, так и при $P_0 = P \neq 0$:

$$\sigma_{2c} = [v_{1c} \sigma_{1c} / (1 - v_{1c})] - [A E_c / (1 - v_{1c})],$$

$$\sigma_2 = -\alpha t E_B.$$

При этом характеристики ψ и ζ целесообразно выразить через пористость материала ξ :

$$\psi = 1 / \gamma_1 = 3 / \gamma = 3 (V_B / V_{\text{общ}}) = 3 / (1 - \xi),$$

$$\zeta = -[(3 - \gamma) / \gamma] = 1 - [3 / (1 - \xi)].$$

ВЫВОДЫ

В результате проведенного анализа получены зависимости, описывающие напряженно-деформированное состояние волокнистой основы композиционного материала в процессе полимеризации связующего.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рабинер М.Е.* Новые композиционные нетканые материалы. // Нетканые материалы

Продукция, оборудование, технологии. – 2011, №1(14). С. 10, 11.

2. *Болотина К.С., Мурашов Б.А., Тарасов В.Г.* О кинетике отверждения полимерных связующих // Механика композитных материалов. – 1980, № 4. С.749...752.

3. *Болотин В.В., Болотина К.С.* Об усадке эпоксидных связующих в процессе отверждения // Механика полимеров. – 1972, № 1. С. 178...181.

Рекомендована ученым советом . Поступила 01.06.12.
