

УДК 539.3:621.002.3 (035)

**ДЕФОРМАЦИЯ ОДИНОЧНОГО ВОЛОКНА  
ПРИ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ СВЯЗУЮЩЕГО  
В ПОРАХ НЕТКАНОЙ ОСНОВЫ**

**DEFORMATION OF SINGLE FIBER  
AT POLYMERIZATION BINDER IN THE PORES  
OF A NON-WOVEN BASIS**

*М.В. КИСЕЛЕВ, Ю.М. ТРЕЩАЛИН*  
*M.V. KISELEV, Y.M. TRESCHALIN*

(Костромской государственной технологической университет)  
(Kostroma State Technological University)  
E-mail: info@kstu.edu.ru

*В статье дается анализ напряженно-деформированного состояния волокон, возникающего при полимеризации связующего в порах нетканой основы в процессе изготовления композита. В результате исследований построена математическая модель и получены математические зависимости, позволяющие определить напряжения и деформации одиночного волокна.*

*The article gives the analysis of the stress-strain state of fibers, resulting polymerization binder in the pores of a nonwoven basis in the process of manufacturing composite. In result of research of mathematical model and mathematical dependences enable one to determine stress and deformation of single fiber.*

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, полимеризация, производство композитов, компьютерное моделирование.

**Keywords:** stress-strain state, polymerization, manufacturing composite, computer modeling.

В процессе изготовления композиционного материала происходит существенное изменение напряженно-деформированного состояния как основы в целом, так и отдельных волокон, обусловленное термическим расширением связующего при его полимеризации в поровом пространстве нетканого полотна [1], [2]. Не углубляясь в сущность происходящих хи-

мических изменений, обратим внимание на повышение температуры затвердевающего связующего, что является весьма важным фактором, влияющим на деформацию волокон и, как следствие, обеспечение прочности и несущей способности изделия из композита при действии нагрузок в течение всего срока эксплуатации [3].

Возрастание температуры вследствие полимеризации способствует протеканию сложных процессов вокруг одиночного волокна, в результате которых происходит:

- расширение одиночных волокон по осям координат  $X, Y, Z$  с возникновением деформаций расширения самого волокна;
- расширение связующего внутри одиночного волокна, если оно полое, и, как следствие, деформация растяжения волокна;
- деформация расширения связующего, находящегося в замкнутом объеме и воздействующего на одиночное волокно с наружной стороны, приводящая к деформации сжатия волокна.

Таким образом, задача сводится к разработке объемной модели напряженно-деформированного состояния волокон, обусловленного полимеризацией связующего, что позволит оценить степень их повреждаемости и возможность использования различных видов волокон, в том числе и синтетических, для изготовления основы композиционных материалов. Следует отметить, что решение такой задачи экспериментальным путем представляет значительные сложности ввиду отсутствия возможности проведения измерений деформации единичного волокна (мононити) вследствие его малых поперечных размеров, составляющих величину порядка 0,1 мм и менее, во время полимеризации связующего внутри композита.

Построение модели напряженно-деформированного состояния волокна в композите произведем при следующих условиях и допущениях:

- материал волокна изотропен;
- при сложном напряженно-деформированном состоянии поведение материала волокна эквивалентно поведению при простых видах нагружения растяжения-сжатия;
- одиночное волокно в композите представляется в виде полого или сплошного цилиндра заданной длины  $\ell$ ;
- из внешних силовых факторов, действующих на волокно, учитываются только растягивающие нагрузки;
- учитываются температурные деформации волокна;
- изгибающие и крутящие силовые факторы, приходящиеся в основном на полимерную матрицу, в обобщенной модели не учитываются вследствие малой жесткости одиночного волокна при данного вида нагружениях;
- нетканая основа полностью пропитана связующим;
- длина волокна  $\ell$  существенно больше его поперечных размеров;
- изготовление композита происходит в герметично закрытом замкнутом объеме, вследствие чего возможность свободного растекания связующего отсутствует.
- при решении задачи принимается гипотеза плоских сечений.

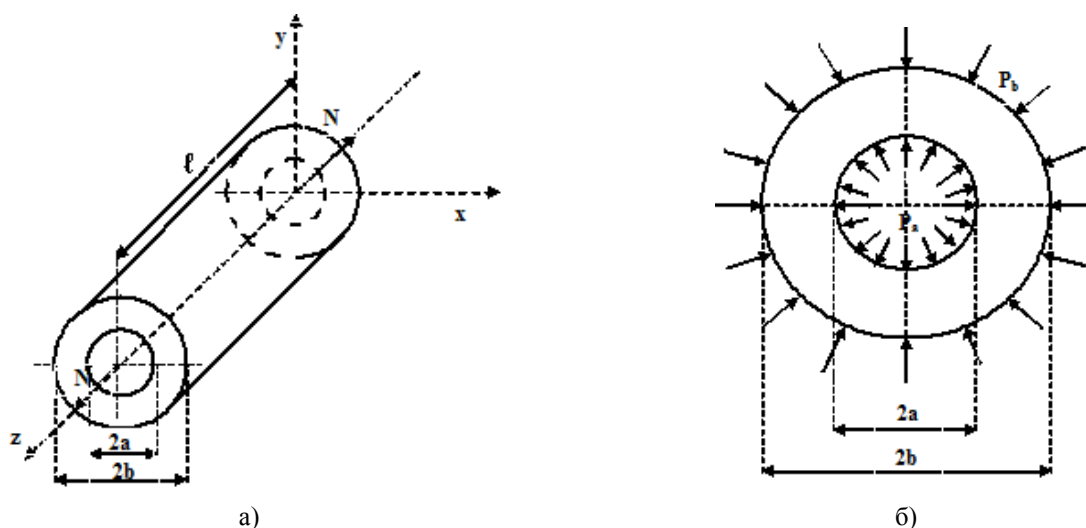


Рис. 1

С учетом принятых условий и допущений обобщенная модель напряженно-деформированного состояния одиночного волокна может быть рассмотрена на примере кругового цилиндра, имеющего радиус  $b$ , с внутренним отверстием, диаметр которого равен  $2a$ , несущим нагрузку вдоль своей оси под действием внутреннего  $P_a$  и внешнего давления  $P_b$  в поперечном сечении (рис. 1 – графическое представление одиночного волокна в композите и силовые факторы, действующие на него в продольном и поперечном направлениях) [4...6].

Используя формулы Ламе [4] и производя необходимые преобразования, можно получить расчетные формулы для определения напряжений и деформаций в волокне:

$$\sigma_r = \frac{a^2 P_a - b^2 P_b}{b^2 - a^2} - \frac{1}{r^2} \frac{a^2 b^2 (P_a - P_b)}{b^2 - a^2} - \frac{E \alpha t}{1 - \nu},$$

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 P_a - b^2 P_b}{b^2 - a^2} + \frac{1}{r^2} \frac{a^2 b^2 (P_a - P_b)}{b^2 - a^2} - \frac{E \alpha t}{1 - \nu},$$

$$\varepsilon_{i\text{вол}} = \frac{2(1+\nu)\sigma_{i\text{вол}}}{3E_{\text{вол}}}.$$

Текущее значение радиуса волокна  $r$  находится в диапазоне от  $a$  до  $b$ . При решении задачи в общем виде для любых видов волокон эти формулы позволяют построить график изменения напряженно-деформированного состояния по толщине волокна.

Таким образом, исходными данными для проведения расчетов являются:

- $\ell = 2\pi r$  – внутренний или наружный периметр волокна;
- $a, b$  – внутренний и внешний радиусы волокна соответственно, м;
- $E_{\text{СВ}}, \alpha_{\text{СВ}}$  – модуль упругости и коэффициент линейного расширения связующего соответственно;
- $E = E_{\text{вол}}, \alpha = \alpha_{\text{вол}}, \nu$  – модуль упругости, коэффициент линейного расширения и коэффициент Пуассона волокна соответственно;
- $t$  – интервал температур при полимеризации связующего.

Численные значения необходимых физико-механических характеристик волокон, наиболее часто используемых при производстве нетканых полотен, а также полиэфирной и эпоксидной смол, приведены в табл. 1

Т а б л и ц а 1

Материал	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа	Деформация до разрушения, %	Коэффициент Пуассона	Температурный коэффициент линейного расширения, $1 / ^\circ\text{C}$	Диаметр волокна, $2 \cdot b$ , мкм
Полипропиленовое волокно	360...450	3...4	9...15	0,35...0,4	$16,0 \cdot 10^{-5}$	18...20
Полиэфирное волокно	550...690	5...8	6,9...13,8	0,35...0,4	$37,0 \cdot 10^{-5}$	20...25
Полиамидное волокно	450...570	2,1...4,0	11,25...27,2	0,35...0,4	$8,5 \cdot 10^{-5}$	15...27
Полиакрилонитрильное волокно	460...560	4,5...6,0	7,7...12,4	0,35...0,42	$7,38 \cdot 10^{-5}$	20...30
Полиэфирная смола в отвержденном состоянии	50...250	1,9...5,0	1,0...13,2	0,35...0,42	$(6,0-9,0) \cdot 10^{-5}$	-
Эпоксидная смола в отвержденном состоянии	85...274	1,5...4,5	1,9...18,3	0,34...0,40	$(4,8-8,0) \cdot 10^{-5}$	-

Учитывая, что полимеры имеют вариацию физико-механических свойств (табл. 1), к решению задачи определения

их прочности следует подходить с точки зрения вероятностного подхода. В результате получено поле разброса значений с

серединной кривой, которая, в данном случае, является математическим ожиданием.

Результаты расчетов изменения напряжений и деформации полипропиленового волокна в зависимости от времени полимеризации связующего, полученные на основании расчета для минимальных, средних и максимальных значений исходных данных, приведены на рис. 2 (график

зависимости напряжений, возникающих в ПП волокне от времени полимеризации связующего для минимальных, средних и максимальных значений исходных данных) и 3 (график зависимости деформации ПП волокна от времени полимеризации связующего для минимальных, средних и максимальных значений исходных данных).



Рис. 2

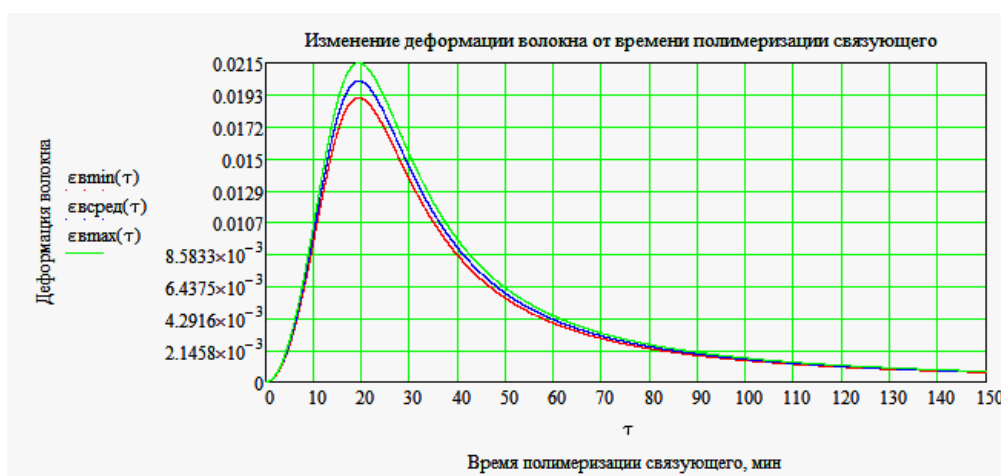


Рис. 3

Как следует из результатов расчета, в процессе изготовления композита его структура не испытывает существенных напряжений, которые составляют 14...31% по отношению к предельным величинам (табл. 1). Наибольшие напряжения и деформации имеют волокна большего диаметра. Однако значения деформации сжатия не превышают 2,1%. Таким образом, можно утверждать, что структурные эле-

менты практически не теряют своих прочностных свойств в процессе полимеризации связующего. Следовательно, нетканые полотна, изготовленные из полиэфирных и полипропиленовых волокон (мононитей), по возможности меньшего диаметра, могут успешно применяться в качестве основы при изготовлении композиционных материалов.

## ВЫВОДЫ

1. Построена математическая модель, описывающая напряженно-деформированное состояние одиночного волокна нетканого полотна при изготовлении на его основе композиционного материала.

2. Получены математические зависимости, позволяющие определить напряжения и деформации волокна в процессе полимеризации связующего.

3. Установлено, что максимальные напряжения в волокне композиционного материала в процессе полимеризации связующего от температурных деформаций составляют 14...31% по отношению к предельным величинам.

## ЛИТЕРАТУРА

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

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

3. Бобович Б.Б. Полимерные композиционные материалы. Электронный ресурс. – Режим доступа: [ics2.ru>articles/index.php...](http://ics2.ru/articles/index.php...)

4. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопrotивление материалов: Учебное пособие. – М. Наука, 1986.

5. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. – Т.1. – М.: Наука, 1975.

6. Коларов Д., Балтов А., Бончева Н. Механика пластических сред. – М.: Изд-во Мир, 1979.

7. Александров А.В., Потанов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Высшая школа, 1990.

8. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/HeatexpansionCoefficient/NECforPlastics/>

9. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://allchem.ru/pages/encyclopedia/4247>

10. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/3618.html>

11. Петухов Б.В. Полиэфирные волокна. Электронный ресурс. – Режим доступа: [newlibrary.ru>...petuhov\\_b...poliyefirnye\\_volokna.html](http://newlibrary.ru...petuhov_b...poliyefirnye_volokna.html)

12. Перепелкин К.Е. Структура и свойства волокон. – М.: Химия, 1985.

13. Кричевский Г.Е. Химическая технология текстильных материалов. – М.: Изд. РосЗИТЛП, 2000, т.1, 2001, т.2, т.3.

Рекомендована кафедрой механической технологии волокнистых материалов. Поступила 07.06.13.