

УДК 677.023.2

**РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПОЛНЕНИЯ СТРУКТУР  
КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕКСТИЛЬНЫМ  
АРМИРУЮЩИМ КОМПОНЕНТОМ**

**CALCULATION OF THE COEFFICIENT OF FILLING THE STRUCTURES  
OF COMPOSITE MATERIALS  
WITH A TEXTILE REINFORCING COMPONENT**

*И.Н.ПАНИН, М.И. ПАНИН, С.Д. НИКОЛАЕВ, А.С.НИКОЛАЕВ, И.М.ГАВРИЛОВА*  
*I.N.PANIN, M.I.PANIN, S. D. NIKOLAEV, A.S.NIKOLAYEV, I.M.GAVRILOVA*

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)  
(Moscow State Textile University "A.N. Kosygin")

E-mail: nsd@msta.staff.ac.ru

*Расчет коэффициента заполнения структур композитных материалов армирующим текстильным компонентом позволяет определить не только его максимально возможную величину, но и характеризует структуру композита.*

*Calculation of the coefficient of filling the structures of composite materials with a reinforcing textile component makes it possible not only to define its maximum possible value, but also to characterize a composite structure.*

**Ключевые слова:** перематывание, сомкнутая намотка, заполнение, композит, армирующий материал.

**Keywords:** rewinding, close winding, filling, a composite, a reinforcing material.

Композитные материалы с армирующим компонентом из текстильных структур (волокон, нетканых материалов, нитей, тканей, трикотажа и т. д.) составляют основную долю изделий, применяемых в самых различных областях жизнедеятельности человека.

Особенно широко используются композитные материалы с текстильным армированием (углеродными и арамидными нитями и волокнами) в авиа- и ракетостроении, где кроме высоких прочностных характеристик большое значение уделяется массе формируемых изделий, так как чем тяжелее конструкция летательного аппарата, тем выше энергозатраты на его перемещение. Поиск оптимальной структуры текстильного армирующего компонента, обладающего высокими прочностными характеристиками и максимальным заполнением объема волокнистым материалом, является актуальной задачей. Практика создания и использования композитных материалов [1] показывает, что чем выше доля текстильного армирующего компонента в общем объеме композитного материала по сравнению с долей связующего (смолами), тем он легче. В настоящее время существующие технологии позволяют выпускать композиты с долевым отношением масс армирующего и связующего компонентов, максимум 60 на 40. Данное доленое соотношение обусловлено хаотичной (неупорядоченной) структурой расположения волокон в нетканых материалах, либо высокой пористостью и рельефностью тканей, применяемых в качестве армирующего компонента композитов.

Следует отметить, что структура ткани более упорядочена, по сравнению с неткаными материалами, и обладает значительно превосходящими их прочностными характеристиками. Однако в процессе подготовки нитей основы и утка к ткачеству (перемотка, снование, проборка), а главное в процессе самого тканеформирования, нити подвергаются интенсивному истиранию в ремизках, о бердо и друг о друга, что существенно снижает их прочностные характеристики (это особенно важно для углеродных и арамидных нитей).

С целью повышения коэффициента заполнения объема ткани углеродные нити подвергают плетению (утонению поперечника) и предварительному проклеиванию, однако эти операции и создание препрегов не дают высоких результатов, так как рельефность ткани сохраняется.

В меньшей степени нити подвергаются истиранию при перематывании, а многообразие структур намотки мотальных паковок (сомкнутые, замкнутые, застиленные, дисковые), отличающиеся друг от друга удельной плотностью намотки, пористостью и проницаемостью, позволяют на их основе создавать композитные материалы с заданным долевым соотношением армирующего и связующего компонентов. Очевидно, что данное соотношение может быть получено расчетным путем, на основе определения коэффициента заполнения намотки волокнистым материалом.

В общем случае, поскольку связующий компонент (смолы различного состава) заполняет в армирующем материале поры как в самом материале, так и в межволоконном пространстве, то степень заполнения будет зависеть от его пористости и проницаемости, которая определяется отношением объема пор к единице объема самого композитного материала, то есть:

$$\Pi = \frac{V_n}{V}, \quad (1)$$

где  $V$  – объем композитного материала;  $V_n$  – объем, занимаемый порами в общем объеме армирующего компонента.

Известно, что у нетканых материалов распределение пор в общем объеме носит хаотичный характер, а следовательно, и коэффициент заполнения объема волокнистым материалом, то есть объемное заполнение, невысок и составляет от 0,3 до 0,4.

Упорядоченное расположение нитей основы и утка в структуре ткани позволяет создавать прочные армирующие каркасы композитов. Однако объемный вес ткани  $E_v$ , определяемый как вес единицы объема ткани, и весовое заполнение ткани  $E_G$ , определяемое отношением веса нитей основы и утка в ткани к ее максимальному весу

$G_{\max}$  (определяется при условии полного заполнения всего объема ткани волокнистым материалом), невелики.

Как показали исследования, проведенные в работе [2], максимальное весовое заполнение у самой плотной ткани (льняная парусина) не превышает 0,46. Это обстоятельство обусловлено большой рельефностью поверхности тканей, высокой пористостью и рыхлостью структуры, а также порядком фазы строения ткани. Авторы работы [3] отмечают, что при рассмотрении схемы порядка фаз строения ткани видно, что около восьмого порядка фазы строения плотность по основе ткани полотняного переплетения достигает предельного значения, а около второго порядка фазы строения ткань имеет предельное значение плотности по утку, что, в свою очередь, обуславливает неравномерную структуру ткани как армирующего компонента композитов.

Практика показывает, что на ткацких станках вырабатываются ткани 5-6 фазы строения с более равномерной уработкой нитей и по основе, и по утку, при этом толщина ткани в различных точках поверхности не является постоянной величиной. Под толщиной ткани понимают ее наибольшую величину, определяемую выступами нитей [3], а измерение толщины тканей сопряжено с трудностями из-за смятия нитей. Поэтому заполнение (весовое) ткани волокнистым материалом мож-

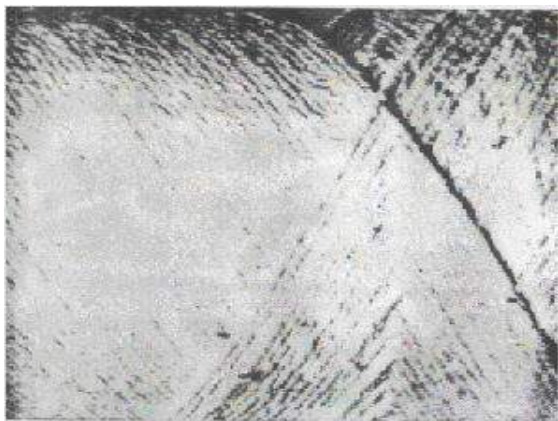


Рис. 1

но точно определить лишь экспериментальным путем (например, по массе воды, вытесненной тканью при ее погружении в мерный стакан с водой), в этом случае будет учитываться пористость не только структуры ткани, но и нитей, а также волокон, из которых они изготовлены.

При использовании в качестве армирующего компонента композитных материалов намоток можно определить максимальное значение коэффициента заполнения объема намотки (композита) волокнистым материалом расчетным путем.

Известно [4], что удельная плотность намотки нити на паковку определяется выражением:

$$\gamma = k_3 \gamma_n, \quad (2)$$

где  $k_3$  – коэффициент заполнения объема паковки волокнистым материалом;  $\gamma_n$  – объемная плотность нити.

Для мотальных паковок различных структур величина этого коэффициента может колебаться от 0,3 до 0,7. Максимальным заполнением объема намотки волокнистым материалом отличаются паковки сомкнутой структуры. Определим значение коэффициента заполнения объема волокнистым материалом для данных намоток.

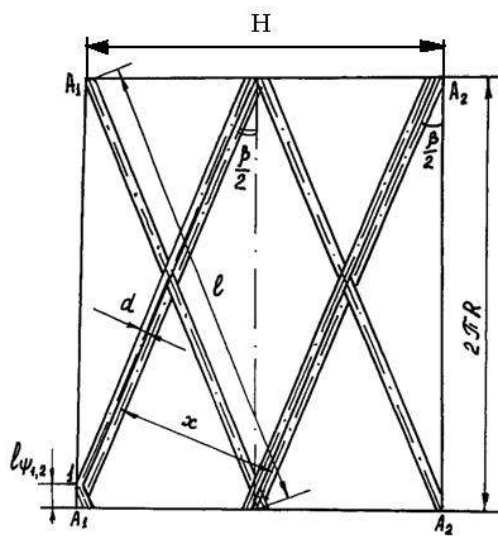


Рис. 2

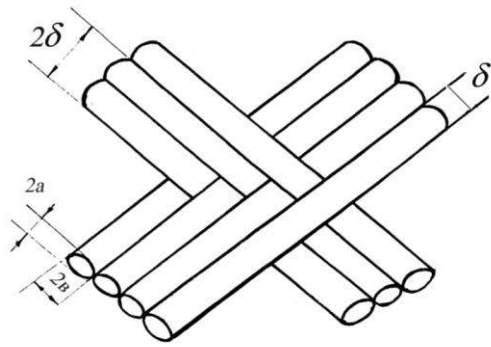


Рис. 3

При формировании сомкнутых намоток на цилиндрических бобинах (рис.1 – фото сомкнутой структуры намотки; рис.2 – развертка односомкнутой опережающей намотки) число витков в объемном слое:

$$W_{oc} = ki_o \frac{x}{2b}, \quad (3)$$

где  $2b$  – большая ось эллипса (рис. 3 – взаимное расположение перекрещивающихся витков в сомкнутой намотке) нити в сомкнутой намотке, находящейся под натяжением и прессующей нагрузкой укатывающего ролика;  $i_o$  – общее передаточное отношение от нитеводителя к веретену;  $k$  – число оборотов пазового кулачка нитераскладчика за цикл движения нити;  $x$  – минимальное расстояние между витками одного слоя намотки;

$$x = h \cos \frac{\beta}{2}, \quad (4)$$

где  $h$  – шаг канавки пазового кулачка нитеводителя;  $H$  – высота намотки бобины.

Следовательно:

$$W_{oc} = \frac{ki_o \frac{2H}{k} \cos \frac{\beta}{2}}{i_o 2b} = \frac{H \cos \frac{\beta}{2}}{b}. \quad (5)$$

Суммарная длина всех витков нити в объемном слое:

$$L = \ell W_{oc} = \frac{\pi D}{\cos \frac{\beta}{2}} W_{oc} = \frac{\pi D H \cos \frac{\beta}{2}}{b \cos \frac{\beta}{2}} = \frac{\pi D H}{b}, \quad (6)$$

где  $\ell$  – длина одного витка намотки нити.

Масса объемного слоя намотки:

$$G = \frac{L}{N} = \frac{\pi D H}{b N}, \quad (7)$$

где  $N$  – номер наматываемой нити.

Объем, занимаемый слоем намотки (рис. 3), составит:

$$V = \pi D H \delta, \quad (8)$$

где  $\delta$  – толщина объемного слоя нитей.

Очевидно, что  $\delta = 4a$ , где  $a$  – малая ось эллипса в сечении нити:

$$V = \pi D H 4a. \quad (9)$$

Следовательно, удельная плотность сомкнутой намотки нити на цилиндрической бобине может быть определена по формуле:

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{\pi D H}{b N \pi D H \cdot 4a} = \frac{1}{4abN}. \quad (10)$$

Предположим, что при наматывании не произошло уплотнения нити, то есть площадь поперечного сечения круглой и эллиптической нити одинаковы, тогда:

$$\frac{\pi d^2}{4} = \pi ab,$$

или

$$ab = \frac{d^2}{4},$$

$$\gamma = \frac{1}{4abN} = \frac{1}{Nd^2}, \quad (11)$$

где  $d = \frac{c}{\sqrt{N}}$  – диаметр наматываемой нити;

$c = \sqrt{\frac{4}{\pi \gamma_n}}$  – коэффициент, характеризующий рыхлость пряжи и ее вид;  $\gamma_n$  – плотность наматываемой нити.

В этом случае:

$$\gamma = \frac{1}{Nd^2} = \frac{1}{c^2}. \quad (12)$$

Подставив значение коэффициента  $c$  в формулу (12), получим:

$$\gamma = \frac{\pi}{4} \gamma_n. \quad (13)$$

Следовательно, в случае формирования сомкнутых намоток, независимо от вида волокнистого состава нитей, коэффициент заполнения объема паковки волокнистым материалом будет равен:

$$k_3 = \frac{\pi}{4} = 0,785. \quad (14)$$

Это максимально возможное заполнение, которое может обеспечить текстильный армирующий компонент в структуре композитных материалов. Все остальные текстильные структуры (ткани, трикотаж, нетканые полотна) могут только приближаться к данному значению ввиду более рыхлой и объемной структуры.

Прессование намотки укатывающим роликом (натяжным барабанчиком) можно охарактеризовать величиной удельного давления (интенсивностью уплотняющей нагрузки):

$$q_c = \frac{N_r}{H} \left[ \frac{H}{\text{см}} \right], \quad (15)$$

где  $N_r$  – нормальная реакция, действующая со стороны мотального барабанчика или укатывающего ролика.

С увеличением степени прессования намотки  $q_c$  происходит смятие нитей (особенно в местах их пересечения), уменьшается толщина намотанного слоя, и несколько возрастают  $k_3$  и  $\gamma$ . На рис. 4 показан характер изменения удельной плотности намотки  $\gamma$  по мере увеличения степени прессования намотки  $q_c$  моталь-

ным барабанчиком при перематывании хлопчатобумажной пряжи на автомате АМК-150-3.

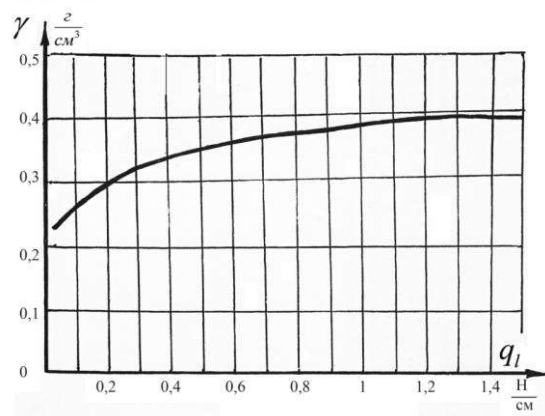


Рис. 4

Из графика на рис.4 видно, что с увеличением степени прессования вначале плотность намотки нити возрастает довольно быстро из-за увеличения коэффициента заполнения  $k_3$  бобины волокнистым материалом (намотка застилистая – не сомкнутая).

В дальнейшем рост плотности намотки замедляется вследствие того, что коэффициент заполнения достигает максимального значения для застилистых намоток, равного 0,5.

Аналогичная зависимость существует между плотностью намотки бобины и натяжением наматываемой нити.

Именно благодаря натяжению создается прессующий эффект вышележащих слоев намотки на нижележащие слои (4).

$$q = \frac{10^5 K \gamma \cos^3 \frac{\beta}{2}}{T} \ln \frac{R1}{R2} \left[ \frac{H}{\text{см}^2} \right], \quad (16)$$

где  $K$  – натяжение наматываемой нити;  $\beta$  – угол скрещивания витков;  $T$  – линейная плотность нити, текс;  $R1$  и  $R2$  – соответственно внутренний и наружный радиусы намотки слоя.

Вследствие чрезмерного натяжения нити и давления наружных слоев на внутренние происходит выдавливание последних на торцы паковки. Происходит нарушение структуры намотки, а повышение коэффи-

циента заполнения объема волокнистым материалом не происходит.

Для расчета исследуемых величин составлена программа расчета на ЭВМ в среде МАТКАД.

## ВЫВОДЫ

1. Максимально возможное заполнение композитов текстильным армирующим компонентом обеспечивает намотка сомкнутой структуры, которая составляет постоянную величину, равную 0,785.

2. Прессующее воздействие на текстильный материал (при сохранении структуры) в незначительной степени влияет на коэффициент заполнения объема армирующего компонента композитов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Андреев А.А.* Возможности практического применения нетканых полотен Viledon для изготовления композиционных материалов // Нетканые материалы, продукция, оборудование технологии. – С-П., 2008.

2. *Кукин Г.Н., Соловьев А.Н.* Текстильное материаловедение. – Ч.3. – М.: Легкая индустрия, 1967.

3. *Николаев С.Д. и др.* Методы и средства исследования технологических процессов в ткачестве. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2003.

4. *Гордеев В.А.* Ткацкие переплетения и анализ тканей. – М.: Легкая индустрия, 1969.

5. *Панин И.Н.* Совершенствование процесса формирования структуры и процесса сматывания мотальных паковок сомкнутой структуры намотки: Дис...канд. техн. наук.- Л.: ЛИТЛП им. С.М. Кирова, 1983.

Рекомендована кафедрой ткачества. Поступила 26.11.12.