

Армированные пластики и их классификация по структурному принципу и перерабатываемости

И.Д. СИМОНОВ-ЕМЕЛЬЯНОВ

Московский технологический университет (институт тонких химических технологий) г. Москва
Simonov@mitht.ru

Впервые предлагается классификация армированных пластиков в одном направлении (1D - структура) по обобщенному параметру структуры aav/d , которая описывает структурообразование системы при введении армирующего волокна с учетом его размеров, упаковки и содержания. Классификация по структурному принципу полностью подтверждается экспериментальными данными и методами их переработки в изделия.

Ключевые слова: армированные пластики, структура, обобщенные параметры структуры, свойства

Classification of the reinforced plastics in one direction (1D - structure) in the generalized parameter of structure aav/d which describes structurization of system at introduction of the reinforcing fiber taking into account its sizes, packaging and contents is for the first time offered. Classification by the structural principle is completely confirmed by experimental data and methods of their processing in products.

Keywords: the reinforced plastics, structure, the generalized parameters of structure, property

Армированные пластики в одном направлении (1D-структура) являются самыми высокопрочными и модульными материалами [1–3]. Исходные компоненты (волокно, полимерная матрица), граница раздела фаз, структура и ее параметры определяют комплекс технологических и эксплуатационных свойств полимерных композитов [4].

Несмотря на огромное количество работ в области армированных пластиков в настоящее время отсутствует их деление на группы по значению обобщенных параметров структуры и классификация по структурному принципу, что сдерживает развитие этого направления материаловедения.

Для композитов были предложены различные принципы классификации: по природе и форме наполнителя, по макроструктуре, по степени ориентации наполнителя, методам получения, по количеству компонентов, по объемному содержанию наполнителя, по функциональности [1, стр. 12–13].

В работах [1, 2] представлены данные по делению армированных пластиков (1D – структура) с разных позиций: по содержанию волокна в армированных полимерных композиционных материалах (АрПКМ) и степени нагруженности деталей.

В работе [1, стр.271–275] деление АрПКМ на группы проведено по содержанию волокна (ϕ_f), опираясь на огромный массив данных по комплексу их свойств: низкоармированные (до $\phi_f \leq 0,40$ об.д.), армированные (до $0,40 \leq \phi_f \leq 0,75$ об. д.), высокоармированные ($0,75 \leq \phi_f \leq \phi_{m,f}$ об.д.) и предельно армированные (до $\phi_f = 0,96–0,98$ об.д., на практике до $\sim 0,9$ об.д.).

По значению прочности, содержанию волокна и методам формования предложено условное деление [1, стр.522–523] для деталей из АрПКМ: неответственные ($\phi_f = 0,35–0,45$ об.д., контактное формование), слабонагруженные ($\phi_f = 0,45–0,55$ об.д., контактное формование с вакуумированием), ответственные ($\phi_f = 0,55–0,65$ об.д., формование в автоклавах) и высоконагруженные ($\phi_f = 0,65–0,75$ об.д., прессование, формование в гидроклавах и пресс-камерах).

Однако предлагаемые классификации отражают только общие представления об армированных системах, их свойствах и технологии формования и не учитывают изменение параметров структуры на количественном уровне с введением волокна в полимерную матрицу.

По классификации, предложенной в работе [1, рис. 6.22, стр. 271], по зависимости прочности АрПКМ от содержания армирующего волокна показано, что при введении небольшого количества волокна (до $\sim 50\%$ %) в полимерную мат-

рицу происходит снижение прочности АрПКМ (рис. 1, прямая 1) согласно уравнению:

$$\sigma_{km} = \sigma_m (1 - \phi_f)$$

Снижение прочности наблюдается в результате наличия дефектов в виде волокон, остаточных напряжений на границе волокно – матрица и неравенства деформаций волокна и матрицы $\epsilon_f < \epsilon_m$, а также небольшой доли нагрузки, которую воспринимают на себя собственно волокна через матрицу по сдвиговому механизму.

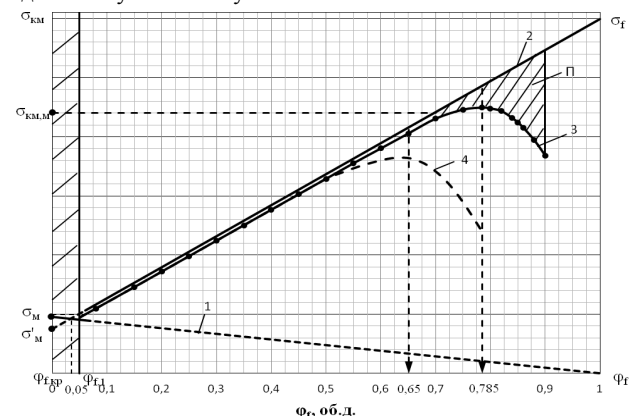


Рис. 1. Зависимость прочности при растяжении АрПКМ от объемного содержания волокон и при разном параметре $\phi_{f,1}$ (кривые 3, 4) [2, рис.6.22, с. 272]. Пояснения в тексте.

При определенном содержании волокна ($\phi_{f,1}$) напряжение воспринимаемое волокном полностью компенсирует снижение прочности и с этого момента прочность АрПКМ с введением волокна начинает возрастать относительно полимерной матрицы (рис. 1, прямая 2):

$$\sigma_{km} = \sigma_v \phi_f + \sigma'_m (1 - \phi_f)$$

Значение напряжения (σ'_m) в матрице при разрушении волокон в АрПКМ предлагается определять по диаграмме $\sigma - \epsilon$ для волокон и полимерной матрицы [1, рис. 6.23].

Таким образом, получена характерная точка при $\phi_f = \phi_{f,1}$, с которой собственно и начинается укрепление (армирование) полимерной матрицы при введении волокон. Можно считать, что армирование полимерных матриц начинается с содержания волокон более – $\phi_{f,1}$. Для большинства армированных пластиков значение $\phi_{f,1}$ не превышает $\sim 50\%$ и такие системы практически не используются в качестве армированных – не армированные пластики ($\phi_f \leq \phi_{f,1}$).

Далее прочность армированных жесткими волокнами ПКМ возрастает по линейному закону от $\varphi_{f,1}$ до их максимального содержания равного $\varphi_{m,f}$, а затем снижается вследствие образования пор (объемная доля пор – φ_n) согласно выражению (рис. 1, кривые 3 и 4):

$$\sigma_{\text{км,п}} = \sigma_{\text{км,о}} (1 - \varphi_n^{2/3})$$

где прочность непористых ($\sigma_{\text{км,о}}$) и пористых ($\sigma_{\text{км,п}}$) АрПКМ.

Положение и значение максимума прочности АрПКМ зависит от параметра упаковки $\varphi_{m,f}$ для волокна (кривая 3 – $\varphi_{m,f} = 0,785$ об.д. и кривая 4 – $\varphi_{m,f} < 0,785$ об.д.) и содержания пор. Причем чем больше значение $\varphi_{m,f}$, тем выше прочность АрПКМ и максимум достигается при более высоком содержании армирующего волокна.

Монолитность АрПКМ обеспечивается отсутствием пор, разрыва сплошности и запишется как: $\varphi_f + \varphi_{\text{св}} = 1$. Общее содержание полимерного связующего ($\varphi_{\text{св}}$) при создании монолитного непористого АрПКМ рассчитывается как – $\varphi_{\text{св}} = (1 - \varphi_f) = (1 - \varphi_{m,f}) + (\varphi_{m,f} - \varphi_f)$, где $\varphi_{m,f}$ – максимальная доля волокна в ПКМ (плотность упаковки). Разность $(\varphi_{m,f} - \varphi_f)$ обеспечивает подвижность и формуемость армированных пластиков.

Пористость (П, %) АрПКМ можно рассчитать по значениям аддитивной ($\rho_{\text{адд}}$) и экспериментальной плотности ($\rho_{\text{экс}}$) по формуле:

$$П = [1 - (\rho_{\text{экс}}/\rho_{\text{адд}})] \times 100\%$$

По представленным данным (рис. 1, прямая 2) практически провести деление АрПКМ на группы по содержанию волокна в пределах от $\varphi_{f,1}$ до $\varphi_{m,f}$ не представляется возможным (линейная зависимость).

В основу построения АрПКМ однонаправленной структуры положены закономерности упаковки непрерывных волокон в объеме при воздействии различных технологических факторов: натяжение при намотке, уплотнение при прессовании, вакуумировании и т.д., что приводит к изменению параметра $\varphi_{m,f}$.

Для проведения классификации АрПКМ по структурному принципу воспользуемся теорией решеток и упаковки для непрерывных волокон в плоскости перпендикулярной оси их ориентации (1D-структура) и определим, координационные числа и так называемые, характерные (перколяционные) точки системы при разном содержании волокон, по аналогии с дисперсно-наполненными ПКМ [4].

Предлагаемая нами классификация армированных пластиков (1D-структура) по структурному принципу, основана на построении структуры, упаковки непрерывных волокон, изменении геометрических и обобщенных параметров [$a_{\text{ср,ф}}(a_{\text{ср,1,ф}})$; $a_{\text{ср,ф}}(a_{\text{ср,1,ф}})/d$] системы во всем интервале содержаний армирующего волокна.

Для описания АрПКМ используем модель 1D – структуры и в качестве обобщенного параметра – среднестатистическое расстояние ($a_{\text{ср,ф}}$) между элементарными волокнами и его отношение к диаметру волокна – $a_{\text{ср,ф}}/d$ по аналогии с дисперсно-наполненными системами [4].

Обобщенный параметр $a_{\text{ср,ф}}$ одновременно учитывает диаметр (d), упаковку ($\varphi_{m,f}$) и содержание волокна (φ_f) в АрПКМ и для кубической упаковки ($\varphi_{m,f} = 0,785$ об.д.) его можно рассчитать по формуле:

$$a_{\text{ср,ф}} = d[(\varphi_{m,f}/\varphi_f)^{1/2} - 1] = d[(0,785/\varphi_f)^{1/2} - 1] = d/2 [(\pi/\varphi_f)^{1/2} - 1]$$

Гексагональная упаковка жестких волокон ($\varphi_{m,f} = 0,905$ об.д.) в реальных системах практически не достигается. В некоторых инженерных расчетах используют среднее значение параметра $\varphi_{m,f} = (0,785 + 0,905)/2 = 0,845$ об.д. Для реальных волокнистых систем значение $\varphi_{m,f}$ определяется эксперимен-

тально для каждого конкретного волокнистого наполнителя с учетом уплотнения под давлением или натяжения при намотке [5, 6].

Второй обобщенный параметр системы – расстояние между волокнами в сечении по диагонали ($a_{\text{ср,1,ф}}$), можно рассчитать по формуле:

$$\begin{aligned} a_{\text{ср,1,ф}} &= d[(\varphi_{m,f}/\varphi_f)^{1/2} - 1] + d(\sqrt{2}-1) = \\ &= d[(\varphi_{m,f}/\varphi_f)^{1/2} - 1] + d(1,4 - 1) = d[(\varphi_{m,f}/\varphi_f)^{1/2} - 0,6]. \end{aligned}$$

Минимальное значение параметра $a_{\text{ср,1,ф}}$ при $\varphi_{m,f}$ в армированной системе возрастает с увеличением диаметра волокна и его можно рассчитать как:

$$a_{\text{ср,1,ф}} = kd = 0,4d$$

На рис. 2 представлены зависимости $a_{\text{ср,ф}}$ и $a_{\text{ср,1,ф}}$ для разных диаметров и кубической упаковки ($\varphi_{m,f} = 0,785$ об.д.) волокон от их содержания в АрПКМ.

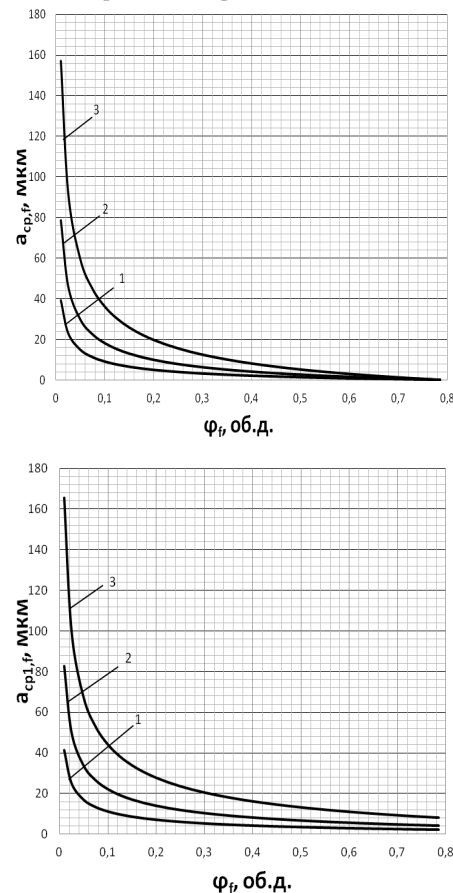


Рис. 2. Зависимость $a_{\text{ср,ф}}$ и $a_{\text{ср,1,ф}}$ в АрПКМ от содержания волокна ($\varphi_{m,f} = 0,785$ об.д.) с разными диаметрами (d_f): 5 мкм (1), 10 мкм (2) и 20 мкм (3).

Как видно, зависимости $a_{\text{ср,ф}}$ и $a_{\text{ср,1,ф}}$ от φ_f практически имеют одинаковый ход кривых от φ_f .

Для исключения влияния диаметра волокон вводится обобщенный параметр структуры – $a_{\text{ср,ф}}/d$ [7], который был предложен ранее для описания дисперсно-наполненных систем [8, 9].

На рис. 3 приведены обобщенные зависимости $a_{\text{ср,ф}}/d$ для АрПКМ с разными диаметрами волокон от их содержания.

Нелинейность функции $a_{\text{ср,ф}}/d = f(\varphi_f)$ позволяет рассматривать изменяющуюся систему на разных этапах формирования ее структуры, что можно с учетом значения координационного числа и упаковки от содержания волокна использовать для структурной классификации армированных пластиков.

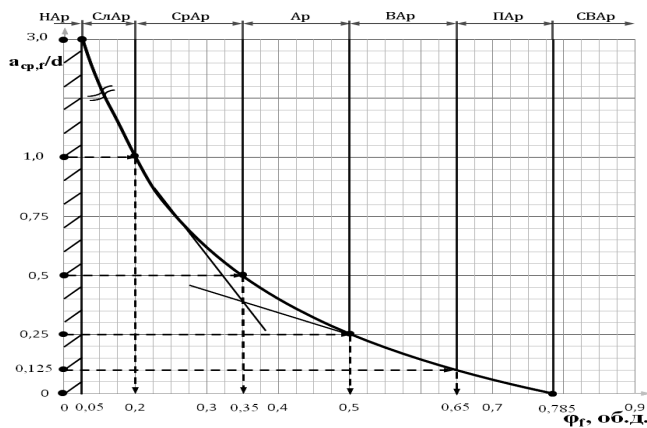


Рис.3. Зависимость обобщенного параметра $a_{cp,f}/d$ для АрПКМот содержания волокна ($\phi_{m,f}=0,785$ об.д.).

Предлагается все АрПКМ (1D-структура) разделить на группы по значению обобщенного параметра $a_{cp,f}/d$, которое определяется по характерным точкам, структурной организации системы (в плоскости перпендикулярной ориентации волокна) и зависимости $a_{cp,f}/d = f(\phi_f)$: 1,0; 0,5; 0,25; 0,125 и 0,0 (рис.3).

Ниже впервые приводится полная классификация АрПКМ (1D-структура) по структурному принципу и обобщенному параметру ($a_{cp,f}/d$) при кубической упаковке однонаправленных волокон ($\phi_{m,f} = 0,785$ об.д.) и деление армированных материалов по группам:

- не армированные (НАр) – $a_{cp,f}/d \geq 3,0$ ($\phi_f \leq 5$ об. %);
- слабо армированные (Слар) – $3,0 \geq a_{cp,f}/d \geq 1,0$ ($5 \leq \phi_f \leq 20$ об. %);
- средне армированные (СрАр) – $1,0 \geq a_{cp,f}/d \geq 0,5$ ($20 \leq \phi_f \leq 35$ об. %);
- армированные (Ар) – $0,5 \geq a_{cp,f}/d \geq 0,25$ ($35 < \phi_f \leq 50$ об. %);
- высоко армированные (ВАр) – $0,25 \geq a_{cp,f}/d \geq 0,125$ ($50 \leq \phi_f \leq 65$ об. %);
- предельно армированные (ПАр) – $0,125 \geq a_{cp,f}/d \geq 0,0$ ($65 \leq \phi_f \leq \phi_{m,f}$ об. %);
- сверхвысоко армированные (СВАр) – $a_{cp,f}/d < 0,0$ ($\phi_f > \phi_{m,f}$, об. %).

Следует учитывать, что изменение значения $\phi_{m,f}$ (0,785 об.д.) для реальных волокон приведет к соответствующему изменению содержания волокон при заданном (постоянном) обобщенном параметре $a_{cp,f}/d$. Поэтому нельзя проводить классификацию по содержанию волокна в АрПКМ, так как параметр изменяется от значения $\phi_{m,f}$ [1].

Разные группы АрПКМ будут иметь соответствующие значения прочности и модуля упругости от максимального значения: не армированные – $\sigma_{км} \approx \sigma_m$, $E_{км} \approx E_m$; слабо армированные – $\sigma_{км} \approx 0,25\sigma_{max}$, $E_{км} \approx 0,25E_{max}$; средне армированные – $\sigma_{км} \approx 0,45\sigma_{max}$, $E_{км} \approx 0,45E_{max}$; армированные – $\sigma_{км} \approx 0,65\sigma_{max}$, $E_{км} \approx 0,65E_{max}$; высоко армированные – $\sigma_{км} \approx 0,80\sigma_{max}$, $E_{км} \approx 0,80E_{max}$; предельно армированные – $\sigma_{км} \approx \sigma_{max}$, $E_{км} \approx E_{max}$; сверхвысоко армированные – $\sigma_{км} \approx \sigma_{км,п}$, $E_{км} \approx E_{км,п}$. Однако значения прочности и модуля при постоянном значении $a_{cp,f}/d$ также будут зависеть от параметра $\phi_{m,f}$ и содержания волокна, поэтому невозможна классификация по $\sigma_{км}$ и $E_{км}$ [1].

В таблице 1 приведены составы и значения обобщенных параметров структуры АрПКМ, рассчитанные, например, для стеклопластиков со стекловолокном марки ВМП (диаметр волокна – 10 мкм, $\phi_{m,f} = 0,785$ об.д.) и эпоксидного связующего, а также представлена их классификация по структурному принципу.

Содержание армирующего наполнителя при заданном параметре $a_{cp,f}/d$ будет изменяться в зависимости от реального

значения $\phi_{m,f}$ для волокна.

Таким образом, в основу проектирования составов АрПКМ с заданными технологическими, прочностными и деформационными свойствами заложено значение обобщенного параметра $a_{cp,f}/d$ и согласно классификации соответствующая группа армированного пластика. Для каждого волокна необходимо предварительно экспериментально определить значение диаметра и параметр $\phi_{m,f}$, а затем задать значение обобщенного параметра $a_{cp,f}/d$ и провести расчеты и определить требуемое содержание волокна в армированном пластике, а также комплекс физико-механических характеристик.

Структура и ее обобщенные параметры определяют свойства АрПКМ и в характерных (перколяционных) точках (параметр – $a_{cp,f}/d$) должны происходить изменение свойств, как это было показано ранее для дисперсно-наполненных систем [4].

Ниже приведены экспериментальные данные по основным свойствам армированных пластиков (1D – структура) в зависимости от содержания волокна, которые взяты из опубликованных ранее работ [2, 3, 10], а также представлены нами в терминах обобщенного параметра $a_{cp,f}/d$, по которому и предлагается их деление на разные группы и классификация по структурному принципу.

Слабо армированные 1D-пластики практически не используются при получении нагруженных изделий (параметр структуры – $3,0 \geq a_{cp,f}/d \geq 1,0$ и $5 \text{ об. \%} \leq \phi_f \leq 20 \text{ об. \%}$).

Предлагаемый переход от слабо армированных к средне армированным пластиком по зависимости $a_{cp,f}/d = f(\phi_f)$ при $a_{cp,f}/d = 1,0$ хорошо коррелирует с данными по демпфирующим свойствам армированных стеклопластиков (рис. 4) [10]. На зависимости наблюдается четкий перегиб на кривой при содержании армирующих волокон ~ 20 об.%, что соответствует обобщенному параметру структуры $a_{cp,f}/d = 1,0$.

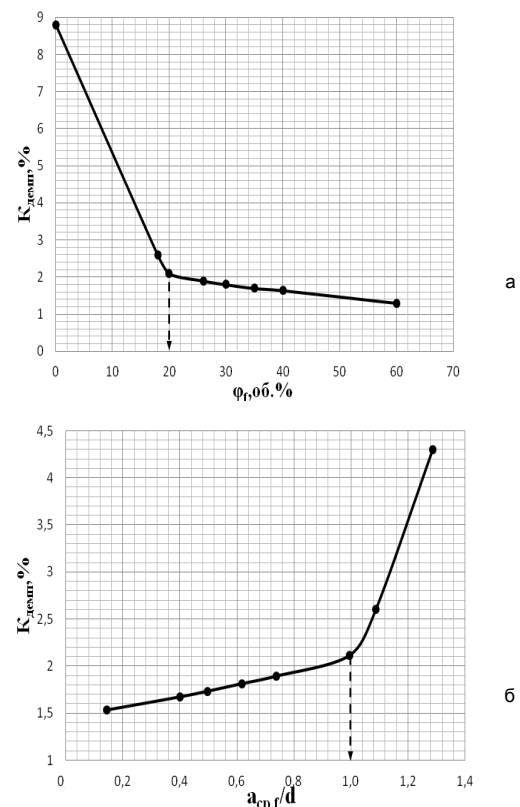


Рис. 4. Зависимость демпфирующей способности полиэфирного стеклопластика (волокно из стекла марки Е) при изгибе от содержания волокна (а) [2, рис.3.1.9, стр.187] и от $a_{cp,f}/d$ (б)

Таблица 1. Составы и классификация армированных стеклопластиков (1D-структура) по обобщенным параметрам структуры.

Содержание		Обобщенные параметры структуры АРПКМ			
Ф _г об.д	Ф _б масс.д.	a _{ср,б} мкм	a _{ср,г} / d	Примечание	
				структура*	свойства
Не армированные пластики					
0,01	-	78,60	7,86	Гипотетическая решетка	$\sigma_{км} \approx \sigma_m$ $E_{км} \approx E_m$
0,03	-	41,0	4,10		
Слабо армированные пластики					
0,05	-	29,80	3,0	Одномерная решетка	$\sigma_{км} \approx 0,25\sigma_{max}$ $E_{км} \approx 0,25E_{max}$
0,10	-	18,0	1,80		
0,15	-	13,0	1,30		
Средне армированные пластики					
0,20	-	9,80	1,0	Переход от одномерной к двумерной решетке	$\sigma_{км} \approx 0,45 \sigma_{max}$ $E_{км} \approx 0,45E_{max}$
0,25	-	7,70	0,77		
0,30	-	6,0	0,60		
Армированные пластики					
0,35	-	4,98	0,50	Двумерная решетка	$\sigma_{км} \approx 0,65\sigma_{max}$ $E_{км} \approx 0,65E_{max}$
0,40	-	4,00	0,40		
0,45	-	3,20	0,32		
Высоко армированные пластики					
0,50	-	2,50	0,25	Двумерная решетка	$\sigma_{км} \approx 0,8\sigma_{max}$ $E_{км} \approx 0,8E_{max}$
0,55	-	1,90	0,19		
0,60	-	1,44	0,14		
Предельно армированные пластики					
0,65	-	1,0	0,10	Двумерная решетка	$\sigma_{км} \approx \sigma_{max}$ $E_{км} \approx E_{max}$
0,70	-	0,6	0,06		
0,75	-	0,20	0,02		
0,785	-	0,00	0,00		
Сверхвысоко армированные пластики					
0,80	-	0,00	0,00	Пористость	$\sigma_{км} \approx \sigma_{км, п}$ $E_{км} \approx E_{км, п}$

Примечание: $\varphi_{m,г} = 0,785$ об. д.; $d_f = 10$ мкм;

* - структура в плоскости y-z, перпендикулярной ориентации волокон по оси x.

Прочность и модуль упругости АРПКМ возрастают с увеличением содержания волокон. В экспериментах, как правило, не приводят данных по содержанию пор и дефектов, поэтому максимальная прочность может изменяться в широких пределах в зависимости от значения $\varphi_{m,г}$ для волокна и пористости материала. Метод получения АРПКМ и технологические параметры процесса также влияют на пористость, которая может изменяться от 1,0 до 35%. Армированные пластики с пористостью 1–2% являются высококачественными и до содержания ~5% пор они сохраняют хорошее качество. При содержании пор более ~5% следует изменять технологию и режимы получения АРПКМ и изделий.

Переход от средне армированных пластиков к армированным происходит при обобщенном параметре $a_{ср,г}/d = 0,5$ и при $\varphi_f \approx 35$ об. %.

На рис. 5 приведена зависимость разных модулей упругости АРПКМ (модуль упругости при нагружении по-перек волокон – E_{xy} и модуль при сдвиге – G_{xx}) от содержания волокна, которые отражают влияние упаковки и содержания волокна в структуре системы [2].

На зависимости имеются три характерные области: первая – до 35 об.%, вторая – переходная область от 35 до 50 об.% и третья – более 50 об. %, что соответствует характерным точкам, определенным по обобщенному параметру $a_{ср,г}/d = 0,5$ и $0,25$.

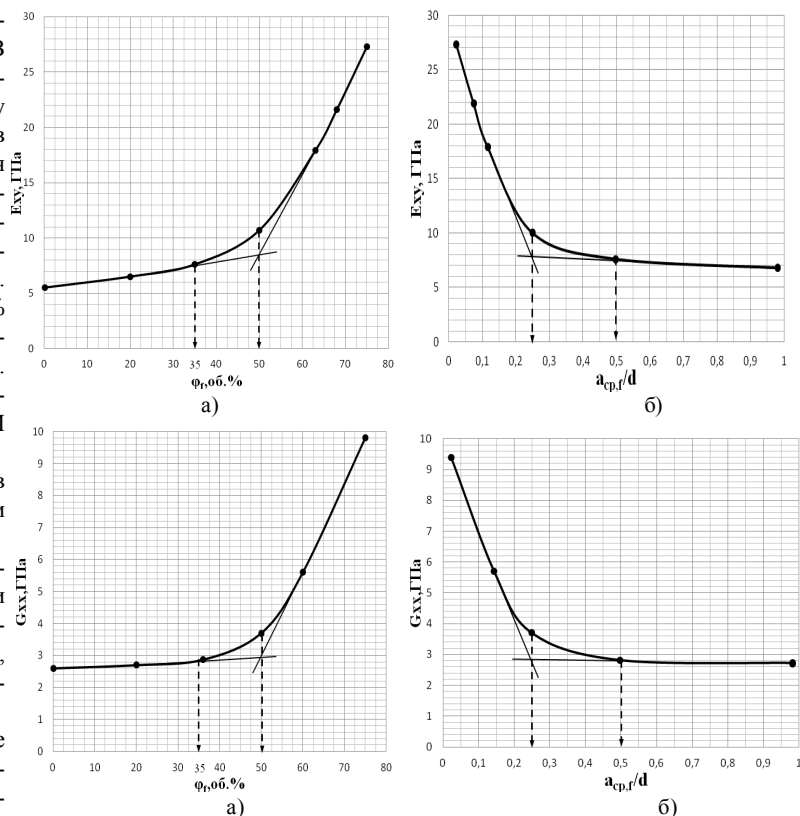


Рис. 5. Зависимость модуля упругости (E_{xy}) при нагружении по-перек волокон и модуля сдвига (G_{xx}) для однонаправленного стеклопластика от объемного содержания волокон (а) [2, рис.3.1.7, стр.183] и от $a_{ср,г}/d$ (б).

Таким образом, переход от средне армированных к армированным ($a_{ср,г}/d = 0,5$) и от армированных к высоко армированным ($a_{ср,г}/d = 0,25$) АрПКМ подтверждается экспериментальными данными (рис. 5), приведенными ранее в работе [2].

При высоком содержании волокна в АрПКМ (более 50 об.%) совместная работа полимерной матрицы и волокна в основном определяется соотношением их деформационных характеристик.

На рис. 6 приставлены зависимости концентрации деформации в полимерной матрице, вызванной растяжением вдоль оси у [10], и отношения деформации при разрыве полимерной матрицы к деформации армированного композита [10] от объемного содержания стекловолокна (а) и от параметра $a_{ср}/d$ (б).

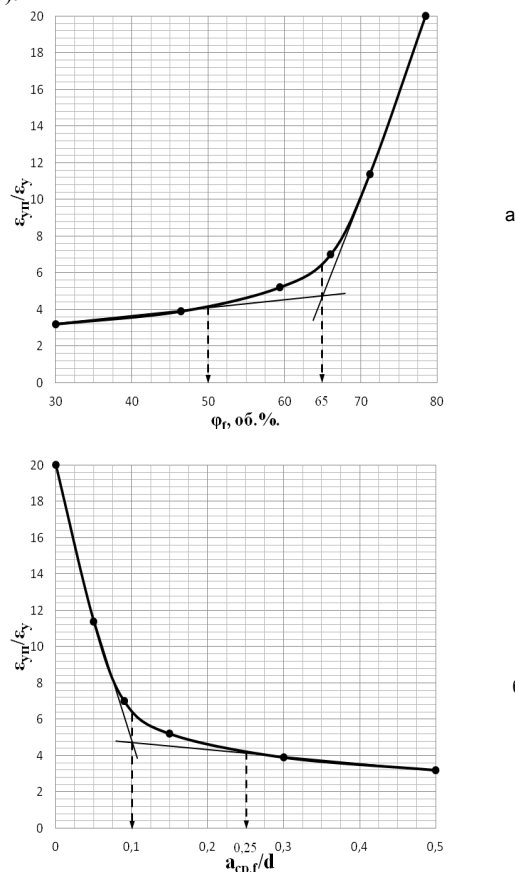


Рис. 6 Зависимость концентрации деформации в полимерной матрице, вызванной растяжением вдоль оси у (ϵ_m/ϵ_c) от содержания волокна (а) и от $a_{ср}/d$ (б) [10, рис.45, стр.93].

Как видно из приведенных данных, достаточно четкие перегибы наблюдаются при обобщенном параметре $a_{ср}/d = 0,25$ ($\phi_r = 50\text{об.}\%$) и $\approx 0,125$ ($\phi_r = 65\text{об.}\%$), что соответствует переходу АрПКМ от высоко армированных к предельно армированным.

При увеличении содержания волокна более 65 об. % возникают существенные трудности по выбору полимерной матрицы с заданными деформационными характеристиками.

Для предельно армированных пластиков характерны наибольшие значения прочности и модуля упругости. Оптимум прочности АрПКМ достигается при содержании армирующих волокон $\sim 65-75$ об. % ($a_{ср,г}/d \approx 0,1-0,125$) при минимальном содержании пор (не более 1-2%) и зависит от значения $\phi_{м,г}$ для конкретного волокна (рис. 8) [2]. При увеличении пористости значение максимальной прочности АрПКМ снижается и достигается при меньших значениях ϕ_r и соответственно при больших $a_{ср}/d$.

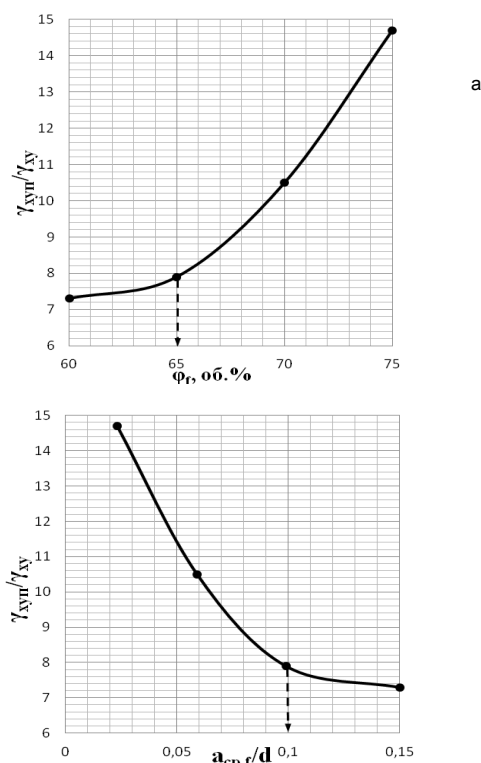


Рис. 7. Зависимость отношения деформации при разрыве полимерного связующего к деформации композиции ($\gamma_{мп}/\gamma_{сх}$) от объемного содержания стекловолокна (а) [10, рис.47, стр.95] и от $a_{ср}/d$ (б).

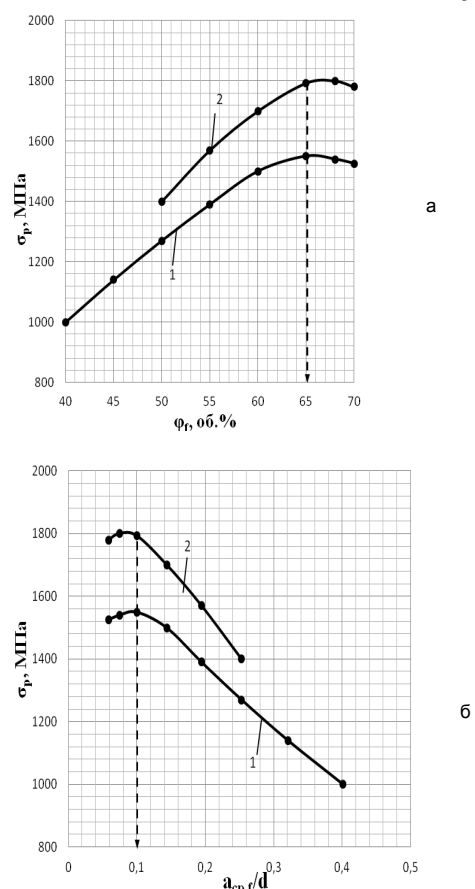


Рис. 8. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении (σ_p) однонаправленного эпоксидного стеклопластика от объемного содержания волокна (а) [2, рис.3.1.6, стр.182] и от параметра $a_{ср}/d$ (б): 1 – пластик на основе жгута ЖС - 24/4; 2 – на основе первичной нити

Полученные данные по максимальной прочности хорошо коррелируют с оптимальной толщиной ($\delta_{\text{опт}}$) полимерной прослойки между волокнами, которая по экспериментальным данным для стеклопластиков, углепластиков, базальтопластиков составляет от $\sim 1,2$ до $1,5 \mu\text{м}$ [11], а обобщенный параметр $a_{\text{ср},f}/d \approx 0,1-0,125$ (диаметр волокна $\sim 10 \mu\text{м}$).

С увеличением значения параметра $\phi_{\text{м},f}$ (более $0,785$ об. д.) можно повысить предельное содержание волокна без образования пор и соответственно прочность армированного пластика. Экспериментально были получены армированные пластики с содержанием стеклянных волокон вплоть до ~ 82 об. % (пористость – 2%), что связано с увеличением параметра $\phi_{\text{м},f}$ в результате натяжения нити и повышения давления при раздвижке формирующей оснастки для намотанных изделий.

При увеличении ϕ_f в пластике среднее расстояние между волокнами уменьшается и полимерное связующее с толщиной граничного слоя равным $\delta_{\text{грс}}$ может полностью перейти в новое состояние. Это будет происходить при $a_{\text{ср}} \approx 2\delta_{\text{грс}}$. Для эпоскитесклопластиков с $\delta_{\text{грс}} \approx 0,3 \mu\text{м}$ [11] переход полимерного связующего в состояние граничного слоя наблюдается при $a_{\text{ср}} \approx 0,6 \mu\text{м}$ и ($a_{\text{ср},f}/d \approx 0,06$), т.е. для высоко армированных систем.

Для жестких волокон (стеклянные, углеродные, базальтовые, кварцевые и др.) теоретического содержания волокон – $90,5$ об. %, характерного для гексагональной упаковки, на практике достичь не удастся.

Органические волокна (например, арамидные, полимерные) способны деформироваться под давлением при повышенных температурах с изменением формы и профиля сечения волокна (перепрофилирование). При этом значение $\phi_{\text{м},f}$ может приближаться к единице и тогда максимальная прочность АрПКМ достигается при содержании волокон до 90 об. % включительно. На этом явлении профессором Головкиным Г.С. была разработана, так называемая, волоконная технология получения монолитных высокопрочных армированных органопластиков [2]. Развитие эта технология получила при создании АрПКМ с гибридными волокнами, в которой использовали как жесткие, так и деформирующиеся полимерные волокна.

Нельзя исключать возможности получения для специальных целей высокопористых АрПКМ с содержанием волокна превышающих $\phi_{\text{м},f}$. В этом случае двухфазный АрПКМ (волокно – полимерная матрица) превращается в трехфазный с образованием воздушных включений (газообразная фаза).

С технологической точки зрения увеличение содержания волокон, уменьшение параметров $a_{\text{ср}}$ и $a_{\text{ср},f}/d$ в армированном пластике сопровождается ухудшением пропитки системы элементарных волокон в нитях, лентах, жгутах и, соответственно, снижением физико-механических характеристик [12].

В связи с этим для формования армированных пластиков используются различные методы переработки с повышением давления при увеличении содержания волокон.

Согласно классификации по структурному принципу (по параметру $a_{\text{ср},f}/d$) для изготовления изделий из армированных пластиков следует использовать различные методы формования:

- для средне армированных с $a_{\text{ср},f}/d \geq 1,0-0,5$ – метод контактного формования;

- для армированных с $a_{\text{ср},f}/d = 0,5-0,25$ – контактное формование с вакуумированием, пултрузия, намотка;

- для высоко армированных с $a_{\text{ср},f}/d = 0,25-0,125$ – формование в автоклавах, пултрузия, намотка;

- для предельно армированных с $a_{\text{ср},f}/d < 0,125$ и сверхвысоко армированных с $a_{\text{ср},f}/d < 0,0$ – прессование, намотка, формование в гидроклавах и пресс-камерах.

Классификация армированных пластиков (1D - структура) по структурному принципу полностью отражает процессы поэтапного формирования структуры, изменения обобщенных параметров и свойств АрПКМ (стеклопластики, углепластики, базальтопластики, органопластики и т.д.) с увеличением содержания волокон (от 5 до $\phi_{\text{м},f} = 78,5$ об. %) и полностью подтверждается экспериментальными данными и их переработкой в изделия различными методами.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 2014/114 код проекта № 1984 Минобрнауки Российской Федерации.

Литература

1. Полимерные композиционные материалы. Свойства. Структура. Технологии. под ред. акад. А. А. Берлина / С-П, Профессия, 2008 с. 558
2. Головкин Г.С., Бунаков В.А. "Армированные пластики." Под ред. проф. Г. С. Головкина, В. И. Семенова. - М.: МАИ, 1997, с. 404.
3. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые композиты, НОТ, С-П 2009 с.380
4. И.Д. Симонов-Емельянов / Построение структур в дисперсно-наполненных полимерах и свойства композиционных материалов // 2015, Пласт.массы №9-10. С. 29-36
5. И.Д. Симонов-Емельянов, С.В. Соколов, С.И. Шалгунов, В.И. Соколов, В.В. Николаев / Уплотнение дисперсных, волокнистых и слоистых наполнителей под давлением и формирование структуры ПКМ // Пласт.массы. 2007, № 3, с.10-13
6. Пахомов К.С., Ю.В. Антипов, И.Д. Симонов-Емельянов, Кульков А.А. / Уплотнение волокнистых наполнителей под давлением и структурообразование в армированных органопластиках при переработке// Пласт.массы №9-10 2014 С. 3-7
7. И.Д. Симонов-Емельянов, Н.В. Апексимов, А.Н. Трофимов, А.Ю. Золкина, Т.И. Андреева, О.О. Петров / "Структурообразование, составы и свойства дисперсно-наполненных полимерных нанокомпозитов" // 2012, Пласт.массы № 6, с.7-13
8. С.Л. Баженов, О.А. Серенко, И.Л. Дубникова, А.А. Берлин / Критерий появления ромбовидных пор в дисперсно-наполненных полимерах // Докл. РАН 2003, Т. 393, №3 С.336-340
9. Wu S. A. Generalized for Rubber Toughening The Critical Matrix Ligament Thickness J. Appl. Polymer. Sci. 1988. V. 35 №2. P. 549-561
10. Х.Т. Кортен "Разрушение армированных пластиков" Под ред. Ю. М. Тарнопольского, пер. с англ. под ред. Т. Я. Кинциса. - М.: Химия, 1967, с. 92 - 97.
11. И.Д. Симонов-Емельянов, В.И. Соколов, С.И. Шалгунов, Л.Г. Михеева /Влияние исходных компонентов и границы раздела фаз наполнитель-полимер на сорбцию воды и стабильность электрофизических и прочностных характеристик стеклопластиков // Пластические массы. - 2005. - № 2. - С. 15-20.
12. И.Д. Симонов-Емельянов, Н.Л. Шембель, А.Н. Трофимов, Н.В. Апексимов / Номограмма для определения параметров процесса нанесения полимерного связующего на поверхность волокнистого армирующего наполнителя и проводов // Конструкции из композиционных материалов. - 2010 - №3, С.13-21