

Построение структур армированных полимерных композиционных материалов в обобщенных и приведенных параметрах, свойства и методы переработки в изделия

Construction of structures of reinforced polymeric composite materials in generalized and reduced parameters, properties and methods of processing into a product

И.Д. СИМОНОВ-ЕМЕЛЬЯНОВ¹, С. И. ШАЛГУНОВ²

I.D. SIMONOV-EMELYANOV¹, S.I. SHALGUNOV²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² АО «НПО Стеклопластик», п. Андреевка, Московская обл., Россия

¹ MIREA – Russian Technological University, Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow, Russia

² NPO Stekloplastic, Andreyevka, Moscow region, Russia

simonov@mitht.ru

Впервые предлагается модель и описание монолитной структуры армированных пластиков в одном направлении (1D-структура) в новых обобщенных и приведенных параметрах (Θ , Θ/B и Θ/S_f), которые позволяют рассматривать структурообразование, с одной стороны, с позиции армирующего волокна с учетом его размеров, упаковки, величины поверхности и содержания, а с другой – полимерной матрицы, представляя ее в виде трех функциональных составляющих.

Проведена классификация АрПКМ по структурному принципу на: неармированные, слабоармированные, среднеармированные, армированные, высокоармированные, предельно-армированные и сверхвысокоармированные пластики по обобщенным и приведенным параметрам структуры. Установлены критические значения обобщенных и приведенных параметров переходов АрПКМ от одного типа структуры к другому согласно классификации и показано, что структурный переход сопровождается изменением технологических и эксплуатационных свойств армированных пластиков.

Впервые предложено связать обобщенные и приведенные параметры структуры АрПКМ с давлением формования и методом переработки в изделия.

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

For the first time, a model and description of the monolithic structure of reinforced plastics in one direction (1D-structure) is proposed in new generalized and reduced parameters (Θ , Θ/B and Θ/S_f), which allow to consider structure formation from the side of the reinforcing fiber taking into account its dimensions, packaging, surface size and content, and on the other, a polymer matrix, representing it in the form of three functional components.

RPCM are classified according to the structural principle into: non-reinforced, weakly reinforced, medium-reinforced, reinforced, highly reinforced, extremely reinforced and super-highly reinforced plastics. The critical values of the generalized and reduced parameters of the transitions of RPCM from one type of structure to another are established, according to the classification, and it is shown that the structural transition is accompanied by a change in the technological and operational properties of reinforced plastics.

For the first time, generalized and reduced parameters and type of the structure of reinforced plastics were connected with pressure of moulding and method of plastics processing into products.

Keywords: reinforced plastics, structure, generalized structure parameters, properties

DOI: 10.35164/0554-2901-2022-1-2-5-9

Введение

Армированные пластики – высокопрочные конструкционные полимерные материалы – нашли широкое применение для создания специальных изделий, высоконагруженных деталей и несущих конструкций.

Свойства армированных полимерных композиционных материалов (АрПКМ) определяются направленным выбором исходных компонентов (армирующего наполнителя и полимерной матрицы), типом структуры (армированные в одном, двух и трёх направлениях и т.д.), а также ее описанием в терминах обобщенных и приведенных параметров [1–4].

В работе [5] рассмотрены обобщенные ($a_{ср,f}/d_f$, $a_{ср1,f}/d_f$, Θ , B и M) и приведенные (Θ/B и Θ/S_f) параметры, которые учитывают построение гетерогенной структуры при введении волокна в полимерную матрицу АрПКМ, что наиболее объективно описывает структуру армированного материала.

Обобщенные и приведенные параметры структуры армированных полимерных композиционных материалов

Геометрический обобщенный параметр $a_{ср,f}$ (среднее расстояние между волокнами в АрПКМ) одновременно учитывает диа-

метр (d_f), 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:

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

Второй обобщенный параметр системы – расстояние между волокнами в сечении по диагонали ($a_{ср1,f}$) – можно рассчитать по формуле:

$$a_{ср1,f} = d_f [(\varphi_{m,f}/\varphi_f)^{1/2} - 1] + d_f (\sqrt{2} - 1) = d_f [(\varphi_{m,f}/\varphi_f)^{1/2} - 1] + d_f (1,4 - 1) = d_f [(\varphi_{m,f}/\varphi_f)^{1/2} - 0,6] \quad (2)$$

Минимальное значение параметра $a_{ср1,f}$ при максимальной доле волокна $\varphi_{m,f}$ в армированной системе возрастает с увеличением диаметра волокна, и его можно рассчитать как:

$$a_{ср1,f} = kd_f = 0,4d_f \quad (3)$$

Для исключения влияния диаметра волокон был введен приведенный обобщенный параметр структуры – $a_{ср,f}/d_f$ ($a_{ср1,f}/d_f$), который ранее был предложен для описания дисперсно-наполненных систем [6, 7] и определяется в основном упаковкой (кубической) и содержанием волокон.

На рис. 1 приведена зависимость $a_{ср, f}/d_f$ для АрПКМ с волокном диаметром 10 мкм от его содержания.

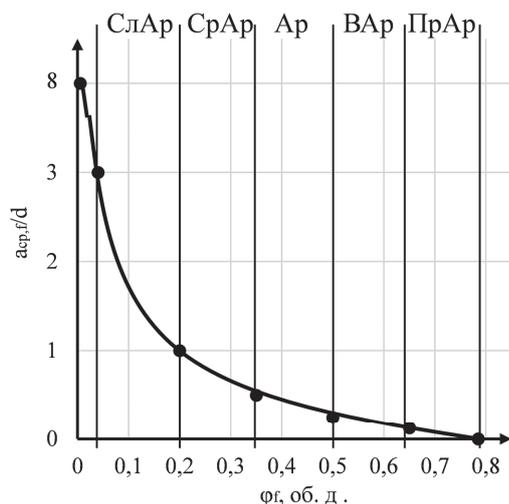


Рис. 1. Зависимость геометрического обобщенного параметра $a_{ср, f}/d_f$ структуры АрПКМ с волокном диаметром 10 мкм от содержания волокна.

Нелинейность функции $a_{ср, f}/d_f = f(φ_f)$ позволяет рассматривать изменяющуюся систему на разных этапах формирования ее структуры при введении армирующего наполнителя, что было впервые использовано для структурной классификации армированных пластиков [5].

Обобщенный геометрический параметр $a_{ср, f}/d_f$ ($a_{ср1, f}/d_f$) отражает вклад только армирующего волокна в построение структуры АрПКМ.

Предложенная классификация АрПКМ по геометрическому приведенному параметру $a_{ср, f}/d_f$ [5] учитывает характеристики волокнистого наполнителя, его диаметр, упаковку и содержание, однако второй компонент – полимерная матрица, которая формирует монолитный материал – не представлена в параметрах структуры, в результате в полной мере не отражается функциональное построение полимерной матрицы (обобщенные параметры $Θ$, B и M) и армированной структуры в целом с увеличением содержания армирующей фазы.

В модель структуры АрПКМ были введены параметры, отражающие функциональное построение полимерной матрицы (связующего). В этом случае полимерную матрицу ($φ_n$) в АрПКМ можно представить, по аналогии с ДНПКМ, в виде трех функциональных составляющих:

$$φ_n = Θ + B + M \quad (4)$$

где $Θ$ – доля полимерной фазы-матрицы для формирования прослойки между волокнами; B – доля полимерной матрицы для заполнения объема между волокнами с прослойками и M – доля полимерной матрицы в граничных (межфазных) слоях с толщиной ($δ$).

Составляющие полимерной матрицы $Θ$, B и M различаются по своей функциональной роли в построении структуры и по вкладу в комплекс технологических и эксплуатационных свойств АрПКМ.

Обобщенный параметр $Θ$ связан с толщиной формирующихся прослоек полимерной матрицы между волокнами (геометрический обобщенный параметр $a_{ср, f}/d_f$) и определяет подвижность армированной системы, ее технологические и эксплуатационные свойства.

Создание монолитного АрПКМ и заполнение объема между волокнами с полимерными прослойками осуществляется с помощью доли полимерной матрицы B .

При развитой поверхности волокна необходимо учитывать долю граничного слоя M . Следует отметить, что для большинства волокнистых наполнителей с диаметром волокна более ~10 мкм доля граничного слоя M в структуре АрПКМ не превышает ~5 об. %.

Ниже приведены формулы для расчета обобщенных параметров $Θ$, B и M структуры АрПКМ:

$$Θ = (φ_{m, f} - f^2 φ_f) / φ_{m, f} \quad (5)$$

$$B = [(1 - φ_{m, f}) / φ_{m, f}] f^2 φ_f \quad (6)$$

$$M = (f^2 - 1) φ_f \quad (7)$$

где $φ_{m, f}$ – максимальная доля волокна в АрПКМ; $φ_f$ – содержание волокна в АрПКМ, $f^2 = (1 + 2δ/d_f)$ – коэффициент, учитывающий отношение толщины граничного слоя ($δ$) к диаметру волокна (d_f).

Для армированных пластиков с диаметром волокна более 5 мкм значение коэффициента f^2 можно принять равным единице ($f^2 = 1$), тогда формулы 1–3 существенно упрощаются.

В отличие от дисперсного наполнителя максимальное содержание ($φ_{m, f}$) жестких волокон при кубической упаковке значительно больше и составляет 0,785 об.д., а гексагональной – 0,905 об.д. Для реальных систем иногда используют среднее значение – 0,845 об.д. Параметр $φ_{m, f}$ существенно зависит от натяжения и укладки волокна, а также от количества армирующих слоев.

Введенный новый приведенный параметр для описания структуры АрПКМ $Θ/B$ отражает перестроение полимерной матрицы (связующего) с увеличением содержания волокна, что оказывает влияние на технологические и эксплуатационные характеристики системы.

На рис. 2 приведены зависимости обобщенных параметров $Θ$ и B от содержания волокна с диаметром 10 мкм при значении параметра $φ_{m, f} = 0,785$ об.д.

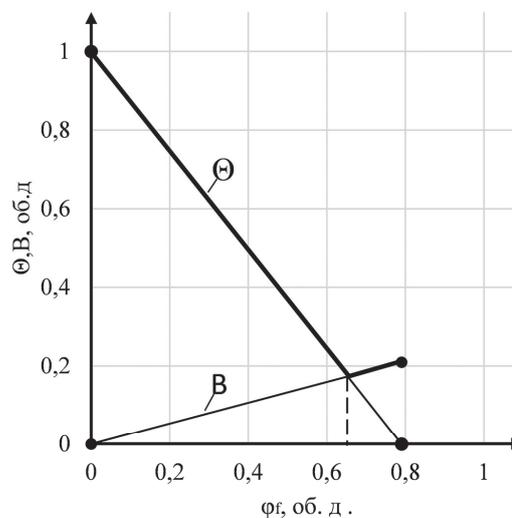


Рис. 2. Зависимость обобщенных параметров $Θ$ и B от содержания волокна при $φ_{m, f} = 0,785$ об. д.

Видно, что до определенного содержания волокна в структуре АрПКМ превалирует доля полимерной матрицы $Θ$, заключенной в прослойках между волокнами, а затем начинает возрастать роль объемной доли B . Это происходит при $Θ$ и B , равных ~0,15 об.д., и $Θ/B ≈ 1$, что достигается для волокон диаметром 10 мкм при $φ_{m, f} = 0,785$ об.д. и их содержании ~0,65 об.д. Следует отметить, что для многих реальных АрПКМ при содержании волокна ~65 об. % достигается максимальное значение прочности.

В многочисленных работах по созданию армированных пластиков и анализу их структуры практически не используется параметр S_f – поверхность волокнистого наполнителя в единице объема АрПКМ, который указывает на протяженность реальной границы раздела фаз и отражает ее участие в построении структуры.

Для учета поверхности наполнителя и ее влияния на свойства АрПКМ для описания армированной структуры нами предложено ввести параметр S_f , который при условии постоянства сечения элементарного волокна можно рассчитать как:

$$S_f = π φ_f^2 / d_{φ, m} (π φ_f + 1) \quad (8)$$

Новый приведенный параметр $Θ/S_f$ для описания структуры АрПКМ позволяет учитывать протяженность границы раздела фаз, а также как полимерную составляющую, так и волокнистый наполнитель.

По полученным зависимостям обобщенного параметра $Θ$, введенных параметров $Θ/B$ и $Θ/S_f$ от обобщенного геометрического параметра $a_{ср, f}/d_f$ определены критические точки переходов АрПКМ и проведена классификация армированных пластиков по структурному принципу [5].

В качестве примера на рис. 3 приведена зависимость обобщенного параметра $Θ$ от геометрического параметра $a_{ср, f}/d_f$ с указанием типа структуры АрПКМ согласно классификации [4].

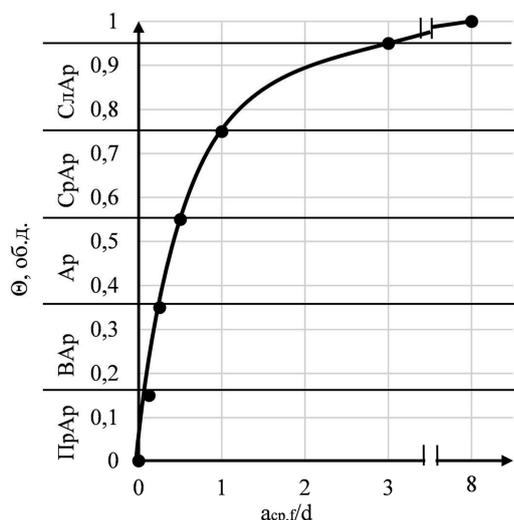


Рис. 3. Зависимость обобщенного параметра Θ структуры АрПКМ от геометрического параметра $a_{cp,f}/d_f$.

Новый подход к описанию и классификации структуры АрПКМ представляется более полным, так как учитывает не только размеры, упаковку непрерывных волокон, но и функциональное построение полимерной матрицы и реальную площадь поверхности волокон (границу раздела фаз) в материале.

Классификация армированных полимерных композиционных материалов по структурному принципу

На основании полученных данных и обобщения большого экспериментального материала можно представить классификацию армированных материалов 1D структуры по типам структур и значению обобщенных и приведенных параметров ($a_{cp,f}/d_f$, Θ , Θ/B , Θ/S_f) при кубической упаковке волокон с $\varphi_{mf} = 0,785$ об.д. (таблица 1).

Пластики с неармированной структурой с параметрами $a_{cp,f}/d_f \geq 3,0$ практически не используются и в дальнейшем не рассматриваются.

АрПКМ с параметрами сверхвысокоармированных систем (СВАр) с $a_{cp,f}/d_f < 0,0$ и пористой структурой также не применяют для получения высокопрочных изделий.

Таблица 1. Обобщенная классификация армированных пластиков 1D-структуры по обобщенным и приведенным параметрам.

Тип структуры	Обобщенные и приведенные параметры структуры АрПКМ			
	$a_{cp,f}/d_f$	Θ , об. д.	Θ/B	Θ/S_f
Слабоармированные (СлАр)	от 3,0 до 1,0	от 0,95 до 0,75	от 70 до 15	от 1500 до 75
Среднеармированные (СрАр)	от 1,0 до 0,5	от 0,75 до 0,55	от 15 до 5	от 75 до 25
Армированные (Ар)	от 0,5 до 0,25	от 0,55 до 0,35	от 5 до 2,5	от 25 до 10
Высокоармированные (ВАр)	от 0,25 до 0,125	от 0,35 до 0,15	от 2,5 до 1,0	от 10 до 3
Предельно-армированные (ПрАр)	от 0,125 до 0,0	от 0,15 до 0,0	от 1,0 до 0,0	от 3 до 0,0

Таблица 2. Свойства армированных углепластиков на эпоксидной матрице с разной структурой ($\sigma_f = 3000$ МПа, $E_f = 450$ ГПа, $\sigma_{30} = 100$ МПа, $E_{30} = 3$ ГПа).

Параметры структуры и свойства АрПКМ	Типы структур АрПКМ				
	Слабоармированные СлАр	Среднеармированные СрАр	Армированные Ар	Высокоармированные Ар	Предельно-армированные ПрАр
$a_{cp,f}/d_f$	3,0–1,0	1,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,125	0,125–0,0
Θ , об. д.	0,95–0,75	0,75–0,55	0,55–0,35	0,35–0,15	0,15–0,0
Θ/B	70–15	15–5,0	5–2,5	2,5–1,0	1,0–0,0
$\Theta/S_f \cdot 10^3$, мкм ⁻¹	1500–75	75–25	25–10	10–3,0	3,0–0,0
Содержание волокна, об.%.	5–20	20–35	35–50	50–65	65–78
Прочность при растяжении, МПа	150–600	600–1050	1050–1500	1500–1950	1950–2250
Модуль упругости, ГПа	25–95	95–160	160–225	225–295	295–340

Структура АрПКМ разных типов и их физико-механические свойства

В зависимости от структурной организации, согласно классификации, разные типы структур АрПКМ характеризуются различными технологическими и эксплуатационными свойствами, так как структура и ее параметры определяют свойства материалов.

Наибольший интерес представляет получение АрПКМ с максимальной прочностью и модулем упругости. Однако следует отметить, что зависимости физико-механических и других свойств АрПКМ, представленные в координатах свойство–содержание армирующего волокна (φ_f), не позволяют судить о структуре армированного пластика и ее перестройке с увеличением содержания волокна.

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости разрушающего напряжения при растяжении (σ_p) однонаправленного стеклопластика на основе эпоксидианового олигомера при использовании жгута марки ЖС-24/4 (кривая 1) и первичной нити (кривая 2) от обобщенного Θ (а) и приведенных параметров Θ/B (б) и Θ/S_f (в).

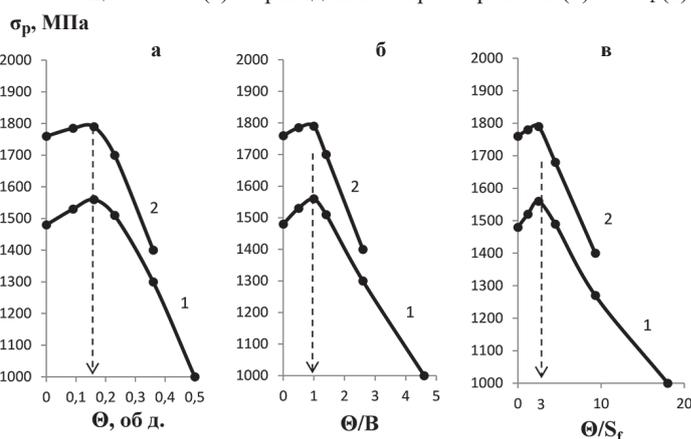


Рис. 4. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении (σ_p) однонаправленного эпоксидного стеклопластика на основе жгута (1) и первичной нити (2) от обобщенного параметра Θ , приведенных параметров Θ/B (а) и Θ/S_f (б).

Максимальное значение прочности АрПКМ достигается при ПрАр структуре и значениях обобщенных и приведенных параметров: $a_{cp,f}/d_f \approx 0,1$; $\Theta \approx 0,15$ об.д.; $\Theta/B \approx 1,0$ и $\Theta/S_f \approx 3$, при этом содержание волокнистого наполнителя составляет ~ 65 об.%. Важно отметить, что максимальная прочность реализуется в АрПКМ при $\Theta \approx 0,15$ об.д.; $B \approx 0,15$ об.д. и $\Theta/B \approx 1,0$ (рис. 1).

В таблице 2 представлены обобщенные и приведенные параметры и физико-механические характеристики углепластиков на эпоксидной матрице с разным типом структуры.

Предложен алгоритм проектирования составов АрПКМ с заданным типом структуры, а, следовательно, с требуемым уровнем технологических, физико-механических и деформационных свойств [5].

В основу расчета составов АрПКМ положено проектирование заданной структуры и значение обобщенных и приведенных параметров структуры при переходе от одного типа структуры в другой. По значениям обобщенных и приведенных параметров для выбранного типа структуры АрПКМ находят содержание армирующего волокнистого наполнителя, которое обеспечивает данный

тип структуры. Например, для армированного типа структуры (Ар) значение обобщенного параметра $\Theta = 0,40$ об.д., тогда из формулы (1) рассчитываем значение содержания волокнистого наполнителя (φ_f) при известном параметре $\varphi_{m,f} = 0,785$ об.д.: $\varphi_f = \varphi_{m,f} (1 - 0,40)$ и определяем долю полимерной матрицы (φ_n , об.д.) как $\varphi_n = 1 - \varphi_f$. Аналогичные данные можно получить при использовании значений приведенных параметров Θ/B и Θ/S_f для различных типов структур АрПКМ.

Типы структур АрПКМ и основные методы их переработки в изделия различного назначения

В настоящее время существует большое многообразие методов переработки АрПКМ в изделия различной формы, конфигурации и типоразмеров.

Практически все методы получения АрПКМ и формования изделий основаны на пропитке армирующих волокнистых структур и каркасов наполнителя полимерным связующим, а также на необратимой деформации армирующего наполнителя. Полимерное связующее и матрица обеспечивают неразрывность среды и связывают в единое целое все элементы структуры АрПКМ.

Тип структуры АрПКМ и пропитка волокнистых армирующих наполнителей

Лимитирующей стадией пропитки каркаса армирующего наполнителя разного строения (нить, лента, жгут, ткань, объемный каркас и т.д.) является пропитка нити, состоящей из множества элементарных волокон с диаметром d_f и плотностью упаковки (~0,785 об.д.), зависящей от натяжения и укладки волокон в технологическом процессе.

Ткани получают ткачеством из нитей, которые состоят из заданного количества элементарных волокон с определенным диаметром. Организация порового пространства в тканях зависит от вида плетения, структуры и распределения волокон в трехмерном пространстве. Для волокнистых каркасов сложного плетения или нетканых систем задача усложняется, так как необходимы параметрические данные по расположению волокон в пространстве.

Распределение порового пространства и его параметры различаются в разных направлениях ориентации ткани (по утку и основе), волокон и армирующих элементов. Все это приводит к зависимости пропитки и заполнения порового пространства различных систем от распределения свободного пространства по пути движения фронта полимерного связующего с заданной скоростью.

Качество пропитки определяется пористостью получаемой заготовки или изделия и зависит от физико-химических характеристик (поверхностное натяжение, статический и динамический углы смачивания), вязкости связующего и параметров капиллярной системы, а также от скорости и полноты заполнения порового пространства по пути движения фронта полимерного связующего [8, 9].

Повышение давления при формовании изделий способствует пропитке пористой структуры или каркаса армирующего наполнителя и расширяет возможности по использованию различных типов структур АрПКМ – СлАр, СрАр, Ар, ВАр, ПрАр для получения изделий и варьирования физико-механических характеристик.

Давление пропитки, согласно уравнению Пуазейля, изменяется обратно пропорционально квадрату диаметра (радиуса) капилляра $\sim 1/d_k^2$ при постоянной вязкости связующего [8].

Для АрПКМ обобщенные параметры структуры $a_{cp,f}$ и $a_{cp1,f}$ (межволоконное расстояние) можно в первом приближении принять равными диаметру капилляра ($a_{cp,f}$ или $a_{cp1,f} \approx d_k$). Тогда можно показать, что давление пропитки (формования) в этом случае определяется размерами, упаковкой и содержанием армирующего волокна в нити – $a_{cp,f} = d_f [(\varphi_{m,f}/\varphi_f)^{1/2} - 1]$ или $a_{cp1,f} = d_f [(\varphi_{m,f}/\varphi_f)^{1/2} - 0,6]$ в зависимости от направления движения потока жидкого связующего, причем давление возрастает с уменьшением параметра $a_{cp,f}$ и $a_{cp1,f}$.

Обобщенные параметры $a_{cp,f}$ и $a_{cp1,f}$ связаны между собой линейной зависимостью, а по приведенному параметру $a_{cp,f}/d_f$ была проведена классификация АрПКМ по структурному принципу, которую также можно связать с параметром $a_{cp1,f}/d_f$.

Каждый тип структуры АрПКМ характеризуется своим комплексом обобщенных и приведенных параметров, причем с увеличением содержания волокнистого наполнителя с заданным диаметром и упаковкой при переходе от СлАр → СрАр → Ар → ВАр → ПрАр обобщенные параметры $a_{cp,f}$ и $a_{cp1,f} \approx d_k$ уменьшаются, а следовательно, возрастает давление пропитки (формования). Минимальное значение обобщенного параметра $a_{cp1,f}$ в АрПКМ со структурой ПрАр ($a_{cp,f} \approx 0$) равно $a_{cp1,f} \approx 0,4 d_f$, при этом давление пропитки должно возрастать с уменьшением диаметра волокна.

Аналогичные критические значения параметров структуры АрПКМ можно получить для обобщенного параметра (Θ) и приведенных параметров (Θ/B и Θ/S_f).

В настоящее время разработаны модели пропитки волокнистых армирующих систем по различным программам, например, RAM-RTM (ESI Group), в основу которых положено описание и распределение порового пространства в тканях и каркасах в трехмерном измерении [3].

Эти модели достаточно широко используются при моделировании процессов пропитки сложных волокнистых систем, однако основным сдерживающим фактором является определение и описание порового пространства через обобщенные и приведенные параметры структуры тканей и каркасов.

Таким образом, впервые показана связь обобщенных и приведенных параметров и типа структуры АрПКМ с параметрами пропитки, давлением формования, что позволяет научно обосновать выбор методов переработки армированных пластиков с разными типами структур.



Рис. 5. Основные методы формования изделий из АрПКМ.

Таблица 3. Основные методы формования изделий из АрПКМ с различными типами структур.

№ п/п	Метод формования	Давление формования, МПа	Тип структуры АрПКМ	Содержание волокна, об.% ($\varphi_{m,f} = 0,785$ об. д.)
1	Контактное формование	0,01–2,5	СрАр и Ар	20–50
2	Вакуумное формование	0,06–0,1	и СрАр	20–35
3	Намотка (мокрая)	0,05–1,0	СрАр и Ар	20–50
4	Намотка (сухая)	1,0–3,0	СрАр, Ар, ВАр и ПрАр	20–75
5	Пултрузия	0,2–5,0	СрАр, Ар, ВАр и ПрАр	20–75
6	Роллрузия	1,0–30,0	Ар, ВАр и ПрАр	35–75
7	Термокомпрессионное формование	1,0–100	Ар, ВАр и ПрАр	35–75
8	Прессование в жесткой матрице	0,5–100	Ар, ВАр и ПрАр	35–75
9	Прессование с эластичным пуансоном	0,5–10,0	СрАр, Ар и ВАр	20–65
10	Формование в пресс-камерах	0,1–3,0	СрАр, Ар, ВАр и ПрАр	20–75
11	Автоклавное формование	0,1–1,5	СрАр, Ар	20–50
12	Гидроклавное формование	0,1–5,0	СрАр, Ар, ВАр и ПрАр	20–75
13	Процессы инфузии	0,01–1,0	СрАр	20–35
14	Процессы RTM, RTM-Licht и SQ-RTM	0,1–1,0	СрАр и Ар	20–50
15	Вибрационное формование	0,1–1,0	СрАр и Ар	20–50
16	Магнито-импульсное формование	350–400	Ар, ВАр и ПрАр	35–75

*Методы формования изделий из АрПКМ
с разными типами структур*

На основании анализа многочисленных работ, накопленного опыта в области переработки армированных пластиков, используя предложенную классификацию по структурному принципу и значениям обобщенного (Θ) и приведенных параметров (Θ/V и Θ/S_f) структуры, можно рекомендовать следующие основные методы формования изделий и их различные модификации из АрПКМ разных типов структур (рис. 5):

- контактное формование;
- прессовое формование;
- пневмо-, гидро-, компрессионное формование;
- трансферное формование;
- электро- и магнитоимпульсное формование.

Представленные основные методы формования до настоящего времени не были связаны с типом, обобщенными и приведенными параметрами структуры АрПКМ, которые определяют технологические свойства и выбор метода переработки в изделия.

Нами впервые представлены данные по типам структур АрПКМ и основным методам их формования в изделия.

Обобщенные данные по методам переработки, типам структуры АрПКМ и давлениям формования, которые реализуются в основных процессах переработки армированных пластиков с различными типами структур в изделия с использованием объемных каркасов или препрегов, приведены в таблице 3.

Таким образом, обобщенные и приведенные параметры, модель структуры и классификация АрПКМ (1D-структура) по структурному принципу полностью отражают процессы структурообразования и изменение свойств с увеличением содержания армирующего волокнистого наполнителя, что подтверждается экспериментальными данными по свойствам и технологией переработки армированных пластиков в изделия различными методами.

Литература

1. Головкин Г.С., Бунаков В.А. Армированные пластики. Под ред. проф. Г.С. Головкина, В.И. Семенова. – М.: МАИ, 1997, – 404 с.
2. Кортен Х.Т. Разрушение армированных пластиков. Под ред. Ю.М. Тарнопольского, пер. с англ. под ред. Т.Я. Кинциса. – М.: Химия, 1967, – С. 92–97.

3. Полимерные композиционные материалы. Свойства. Структура. Технологии., 5-е издание под ред. акад. А. А. Берлина — СПб: Профессия, 2018. – 558 с.
4. Симонов-Емельянов И.Д. / Армированные пластики и их классификация по структурному принципу и перерабатываемости // Пласт. массы – 2016. – №5–6. – С. 3–8.
5. Симонов-Емельянов И.Д., Апекусов Н.В., Шалгунов С.И. / Обобщенные параметры структуры армированных пластиков, их классификация и свойства // Теоретические основы химической технологии – 2021, – том. 55, №4 – С. 1–13.
6. Симонов-Емельянов И.Д. / Построение структур в дисперсно-наполненных полимерах и свойства композиционных материалов // Пласт. массы – 2015 – №9–10. – С. 29–36.
7. Симонов-Емельянов И.Д. / Параметры решетки и структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов с регулируемым комплексом свойств // Конструкции из композиционных материалов – 2019 – №3 – С. 37–46.
8. Симонов-Емельянов И.Д., Соколов В.И., Трофимов А.Н., Шалгунов С.И., Смотров С.А. / Организация процессов пропитки волокнистых заготовок полимерными связующими при изготовлении конструкций безавтоклавными методами формования // Конструкции из композиционных материалов – 2017 – №4 – С. 7–19.
9. Симонов-Емельянов И.Д., Соколов В.И., Трофимов А.Н., Смотров С.А., Шалгунов С. И., Евдокимов Ю.Ю. / Пропитка волокнистых армирующих наполнителей полимерными связующими в динамических режимах формования изделий // Конструкции из композиционных материалов – 2018 – №1 – С. 14–23.