

УДК 678.067.5

*Д.А. Мельников¹, А.А. Громова¹, А.Е. Раскутин¹, А.О. Курносов¹***ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И ПРОЧНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА ВПС-53/120**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-8-8

Приведены теоретические подходы к расчету упруго-прочностных характеристик при растяжении композиционных материалов на основе тканых наполнителей. Описаны методы изготовления образцов отверждающихся связующих для испытаний на растяжение. Исследовано влияние метода изготовления образцов на определяемые упруго-прочностные характеристики эпоксидного связующего ВСЭ-34. Проведен теоретический расчет, а также получены экспериментальные значения прочности и модуля упругости при растяжении стеклопластика ВПС-53/120. Приведено сравнение теоретически рассчитанных значений с экспериментальными.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, стеклопластик, матрица, упруго-прочностные свойства, стеклоткань, стеклопластик ВПС-53/120, растяжение.

In the article theoretical approaches to calculation of elastic – strength characteristics at tension of composite materials on the basis of woven fillers are given. Manufacturing methods of samples of curing binders for tension tests are described. The influence of manufacturing method of samples on defined elastic and strength characteristics of epoxy resin VSE-34 is investigated. Theoretical calculations are carried out and experimental data of strength and elastic modulus are obtained for VPS-53/120 fiberglass at tension. Comparison of theoretically calculated values with experimental ones is given.

The work is performed within the implementation of the complex scientific direction 13.2. «Constructional PCM» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: polymer composite materials, GRP, matrix, elastic-mechanical properties, fiber glass fabric, VPS-53/120, tension.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время одним из основных показателей промышленного прогресса является происходящая во всем мире замена традиционных изделий из металла на полимерные композиционные материалы (ПКМ). Развитие современных технологий требует создания принципиально новых изделий из полимерных материалов, обладающих, кроме высоких технологических и эксплуатационных характеристик, способностью сохранять свои свойства при воздействии различных деструктивных факторов. С расширением областей применения увеличивается не только спрос и ассортимент полимерных материалов, но и качественные требования, предъявляемые к физико-механическим показателям, а также к способам переработки с использованием современных энергосберегающих и экологически чистых методов [1, 2].

Полимерные композиционные материалы состоят из двух основных компонентов: непрерывной фазы – матрицы (связующего) и армирующего наполнителя. Основные прочностные характеристики композита, такие как прочность, модуль упругости при растяжении и др., во многом определяются свойствами армирующего наполнителя. В качестве армирующих наполнителей широкое применение нашли стеклянные и углеродные волокна. Данные типы волокон имеют свои достоинства: у углеродных – высокий уровень физико-механических показателей (прочность, модуль упругости) и электропроводности, а среди преимуществ стеклянных волокон можно отметить низкую стоимость, высокую теплостойкость, устойчивость к химическому воздействию, низкую теплопроводность и хорошие диэлектрические характеристики [3–5].

Физико-механические свойства стеклопластиков, так же как и других полимерных композиционных материалов, в основном зависят от трех факторов: прочности армирующего наполнителя, прочности и деформационных свойств полимерной матрицы, прочности адгезионной связи матрицы с поверхностью армирующего наполнителя. Вышеперечисленное справедливо при условии одинаковости других параметров материалов: пористости, степени наполнения, технологии переработки и т. д. При разработке новых стеклопластиков перед исследователями встает проблема совместимости компонентов [6–8]. Казалось бы, чем более высокими упруго-прочностными характеристиками обладает полимерная матрица стеклопластика, тем выше его свойства. Однако не следует считать, что полимерная матрица, со свойствами приближающимися к свойствам армирующего наполнителя, обеспечит наилучшие свойства композиту [9, 10].

В композиционном материале каждый из компонентов выполняет свою функцию и должен обладать оптимальными свойствами в каждом конкретном случае. Композиционные материалы представляют собой гетерогенные системы, обладающие ярко выраженной анизотропией свойств как в отношении деформации, так и в отношении прочности. «Идеальной» можно считать ту гетерогенную систему, в которой в максимальной степени используются свойства составляющих ее элементов и которая обладает наибольшей возможной жесткостью и прочностью. Другими словами, наиболее перспективными материалами являются те, в которых независимо от характера локального приложения внешних нагрузок обеспечивается наиболее однородная деформация всей гетерогенной системы в целом, наибольшая одновременность работы всех элементов системы и ее монолитность. При работе композиционных материалов нагрузки в основном воспринимаются армирующими волокнами.

В табл. 1 приведены физико-механические характеристики армирующего волокна и расчетные свойства полимерной матрицы, которая, по мнению авторов работы [11], обеспечивает при объемном содержании армирующих волокон 70% реализацию прочности стекловолокна на 90%. Данные требования к свойствам полимерной матрицы сформулированы на основе системы неравенств: $(E_{\text{матрицы}}/E_{\text{стекла}}) \geq 0,064$; $(\sigma_{\text{матрицы}}/\sigma_{\text{стекла}}) \geq 0,060$; $(\epsilon_{\text{матрицы}}/\epsilon_{\text{стекла}}) \geq 1,5$, что близко к неравенствам, представленным в работе [10]. В работе утверждается, что для обеспечения совместной деформации всех армирующих элементов в композиционном материале механические свойства матрицы и армирующего волокна должны соответствовать следующим неравенствам: $(E_{\text{матрицы}}/E_{\text{волокна}}) \geq 0,06$; $(\tau_{\text{адгезии}}/\sigma_{\text{в волокна}}) \geq 0,015$; $(\epsilon_{\text{матрицы}}/\epsilon_{\text{волокна}}) \geq 1,7$; $(\tau_{\text{матрицы}}/\tau_{\text{волокна}}) \geq 1$. В первом приближении монолитность ориентированного стеклопластика будет обеспечена в случае одновременного выполнения комплекса ранее описанных соотношений. Автор работы утверждает, что наибольшая прочность композита и одновременность разрушения волокна, матрицы и адгезионной связи между ними будет наблюдаться только в случае удовлетворения всего комплекса условий [11].

Таблица 1

**Физико-механические характеристики армирующего волокна
и свойства полимерной матрицы**

Свойства	Значения свойств компонентов			
	стекло типа E	требования к полимерной матрице	стекло типа S	требования к полимерной матрице
Предел прочности при растяжении, МПа	3500	210	5000	300
Модуль упругости, ГПа	73	4,7	88	5,6
Удлинение при растя- жении, %	4,8	7,2	5,4	8,1

На соотношение удлинений при разрыве полимерной матрицы и стеклянного волокна указано в работе [12], в которой отмечено, что в случае, когда удлинение матрицы меньше удлинения волокна, прочность в пластике не может быть реализована на 100%. Если анализировать данные, приведенные в табл. 1, то можно прийти к выводу о том, что матрица, отвечающая этим требованиям, в настоящее время еще не разработана. Кроме того, матрица не может одновременно отвечать всем приведенным характеристикам. Если деформационные свойства матрицы отвечают закону Гука ($\sigma = E \cdot \varepsilon$), то для стекла типа S, например, величина предела прочности при растяжении матрицы должна составить $5600 \text{ МПа} \cdot 0,092 = 455 \text{ МПа}$. Ясно, что изотропный полимер с такой прочностью в настоящее время не известен. Исходя из этих фактов можно прийти к выводу, что в настоящее время при создании высокопрочных композиционных материалов необходим компромисс. Необходимо эмпирическим путем определять, какие из свойств полимерной матрицы в большей степени влияют на свойства композита. Это тем более важно, что композит должен отвечать комплексу свойств.

Цель данной работы – определение механических характеристик матрицы и проведение на их основе расчета модуля упругости и прочности стеклопластика при растяжении.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран стеклопластик ВПС-53/120 на основе расплавленного эпоксидного связующего ВСЭ-34 и равнопрочной стеклоткани типа 120. Стеклянная ткань типа 120 производится из стеклянных крученых нитей силикатного состава стекла типа E путем переплетения каждой основной нитью нескольких нитей утка, такое плетение называется четырехремизным неправильным сатином. Характеристики стеклоткани приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики стеклоткани типа 120 [13, 14]

Характеристики нити				Характеристики стеклянного волокна						
Номинальное количество нитей на 1 см	Текс нити		Количе- ство круток на метр	Предел прочности при растяже- нии, МПа	Удлинение при растя- жении, %	Модуль упругости, ГПа	Модуль сдвига, ГПа	Диаметр, мкм	Кoeffи- циент Пуассона	
	основа	уток								основа
основа 23,6	уток 22,9	основа	уток	100	3500	4,8	73	31	5	0,2
		11								

Механические свойства композиционных материалов определяются уровнем упруго-прочностных свойств волокон и матриц, их соотношением и прочностью связи по границе раздела, а также рядом факторов, влияющих на реализацию в композитах

упруго-прочностных свойств компонентов – в первую очередь армирующих волокон. Основными факторами являются дефектность армирующих волокон и их геометрические размеры, взаимное влияние волокна и матрицы, напряженность компонентов, макроструктурные несовершенства композита и нарушения его монолитности. К макроструктурным несовершенствам композитов относятся искривление и крутка армирующих волокон, их разориентация (отклонение от заданного направления армирования), неравномерность распределения по сечению композита и пористость матрицы. Пластики, армированные тканями, представляют собой очень сложный класс композиционных материалов. Это объясняется тем, что вследствие переплетения нитей жесткость и напряженное состояние тканевых пластиков в пределах повторяющегося элемента структуры непрерывно меняются от сечения к сечению. Введение коэффициента реализации прочности K_σ и модуля упругости K_E волокон позволяет оценивать влияние отдельных факторов на реализацию в композите средних значений этих показателей. Для высоконаполненных систем с параллельным расположением волокон коэффициенты реализации могут быть определены с достаточной для инженерных расчетов точностью по уравнению [13]:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_n}{V_B \sigma_B}; \quad (1)$$

$$K_E = \frac{E_n}{V_B E_B}, \quad (2)$$

где V_B – объемное содержание волокна; σ_n , E_n – предел прочности и модуль упругости композита.

Коэффициенты реализации предела прочности и модуля упругости можно также выразить в виде произведения коэффициентов, учитывающих влияние каждого фактора:

$$K_\sigma = k_m k_{v\sigma} k_{vE} k_l k_\phi k_n; \quad (3)$$

$$K_E = k_m k_l k_\phi k_n k_{vE}, \quad (4)$$

где k_m , $k_{v\sigma}$, k_{vE} , k_l , k_ϕ , k_n – коэффициенты, учитывающие влияние на степень реализации средних значений предела прочности и модуля упругости волокон таких факторов, как взаимное влияние компонентов, дисперсия прочности и модуля упругости, дискретность и разориентация волокон, пористость матрицы соответственно [13].

Для расчета предела прочности и модуля упругости стеклопластика необходимо определить физические и упруго-прочностные характеристики входящих в его состав компонентов: стеклянного армирующего наполнителя и связующего (матрицы). Если свойства выпускаемых промышленностью стеклянных армирующих волокон широко представлены в литературе [11–14], то свойства матриц достаточно часто необходимо определять экспериментально. Так, для расчета предела прочности и модуля упругости стеклопластика на основе стеклянной ткани типа 120 свойства армирующего наполнителя взяты из справочника (табл. 2), а свойства связующего ВСЭ-34 определены экспериментально.

Известно, что достоверность результатов механических испытаний материалов зависит, в том числе, от способа наработки образцов, который, как правило, определяет их качество. К настоящему времени наработку образцов для механических испытаний материалов на основе отверждающихся синтетических смол осуществляют в основном двумя способами: заливкой в открытые или закрытые ячейки форм, имеющих размеры и форму образца, а также механической обработкой из предварительно отвержденных заготовок в виде прутков, труб, пластин и т. д. Определяющими свойствами связующего при изготовлении образцов для механических испытаний являются: вязкость и температура при заливке, время нарастания вязкости до потери текучести, наличие в

составе деаэраторов, температурный режим отверждения [15]. Чем ниже вязкость связующего и чем медленнее она нарастает во времени, тем проще получить более качественные образцы для механических испытаний. Так, при изготовлении образцов для механических испытаний из низковязких связующих, обычно предназначенных для переработки методами RTM, VaRTM, пултрузией, ручным формованием и т. д., используют закрытые составные формы, в которых заливка осуществляется по методу сообщающихся сосудов. Таким образом удается получить качественные образцы без использования дополнительных технологических приемов. Однако в последнее время широкое распространение получила автоклавная технология переработки с применением полуфабрикатов (препрегов) на основе расплавных связующих, к которым относится связующее ВСЭ-34. Современные расплавные связующие, перерабатываемые по препреговой технологии, обладают достаточно высокой вязкостью расплава (~2–8 Па·с) и ограниченным временем нарастания вязкости до потери текучести при температуре заливки. Данные обстоятельства накладывают дополнительные требования к изготовлению образцов из связующих расплавного типа. Для уменьшения количества дефектов в образцах от попадания пузырьков воздуха, связующее необходимо предварительно вакуумировать. Для более эффективного удаления воздуха связующее вакуумируют в условиях, когда вязкость связующего минимальна на протяжении необходимого для деаэрации времени.

Для определения упруго-прочностных характеристик отвержденного расплавного эпоксидного связующего ВСЭ-34 проведены механические испытания образцов различных типов (по ГОСТ 11262), изготовленных тремя различными способами. При изготовлении образцов всех типов связующее предварительно вакуумировали. Отверждение проводили при атмосферном давлении, после отверждения для уменьшения внутренних напряжений образцы подвергали отжигу.

Способы изготовления образцов (рис. 1):

- 1 – отверждение навески связующего в открытой форме;
- 2 – отверждение навески связующего в закрытой форме;
- 3 – отверждение навески в блоковой форме с последующей механической обработкой, заключающейся в разрезании полимерного блока (заготовки) на образцы требуемой толщины.

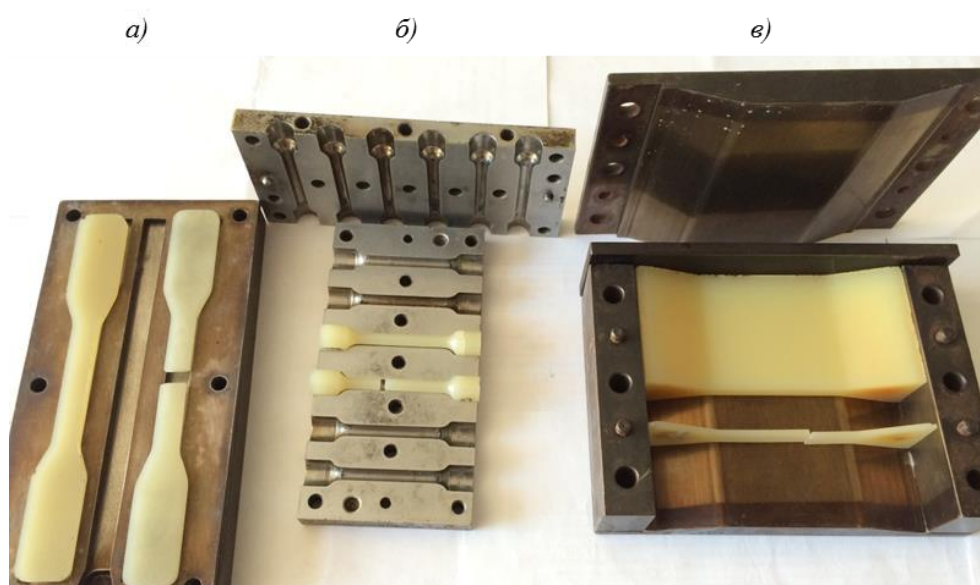


Рис. 1. Вид оснасток для изготовления образцов по способам 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

При заливке образцов в открытые формы часто возникают дефекты в виде значительной разнотолщинности, непараллельности плоскостей, трещин, менисков. Для образцов, отлитых в закрытые формы, характерен заметно меньший разброс по геометрическим размерам, однако в случае если вязкость заливаемой композиции >1 Па·с, могут образовываться трудноудаляемые пузырьки воздуха. Для закрытых форм также могут быть характерны дополнительные дефекты в местах смыкания формы. Большинство этих дефектов можно избежать, используя третий двухстадийный способ изготовления образцов. На первом этапе связующее заливают и отверждают в специальной блок-форме. После отверждения форму разбирают, извлекают отвержденный полимерный блок и разрезают его на образцы требуемой толщины. На рис. 2 показана схема разрезки отвержденных полимерных блоков на образцы для определения механических свойств при растяжении [15].

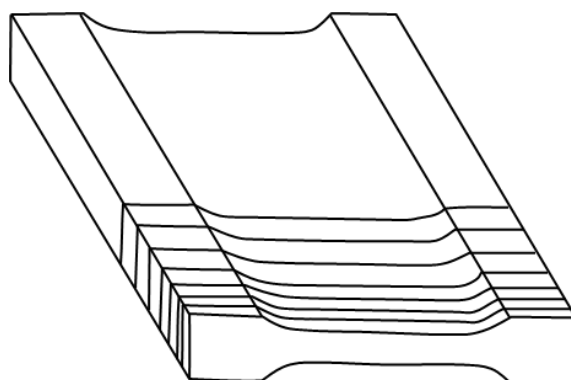


Рис. 2. Схема разрезки полимерного блока на образцы для испытаний при растяжении [15]

Результаты сравнительных испытаний отвержденных образцов связующего ВСЭ-34 приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Свойства испытанных при растяжении образцов
отвержденного связующего ВСЭ-34**

Свойства	Значения свойств для образцов, изготовленных по способу					
	1		2		3	
	среднее значение*	коэффициент вариации, %	среднее значение*	коэффициент вариации, %	среднее значение*	коэффициент вариации, %
Прочность при растяжении, МПа	45	16,4	72	8,7	75	5,7
Удлинение при растяжении, %	1,5	18,2	2,5	8,4	2,9	5,9
Модуль упругости, ГПа	3,0	5,7	3,2	4,8	3,4	3,8

* По результатам испытаний десяти образцов.

Результаты испытаний образцов отвержденного связующего ВСЭ-34 показали, что образцы, изготовленные по способу 3, отличаются высоким уровнем и стабильностью показателей. Экспериментально подтверждено, что изготовление полимерных блоков с дальнейшим нарезанием на образцы требуемой толщины позволяет сочетать преимущества двух других способов и исключить некоторые их недостатки. Например, образцы, изготовленные по способу 3, обладают точностью размеров, схожей с

точностью размеров образцов, изготовленных в закрытых формах, а пористостью – близкой к пористости образцов, заливаемых в открытые формы. Для дальнейших расчетов приняты результаты испытаний образцов, изготовленных способом 3. Дополнительно на образцах с помощью экстензометра, позволяющего одновременно определять продольную и поперечную деформацию (рис. 3), определен коэффициент Пуассона (μ_m), среднее значение которого составило 0,38.



Рис. 3. Образец связующего ВСЭ-34 с установленным экстензометром продольной и поперечной деформации

В основе теоретических расчетов предела прочности и модуля упругости стеклопластика при растяжении лежат следующие допущения:

- материал состоит из двух компонентов – волокна и связующего;
- компоненты однородные, линейно-упругие;
- волокна непрерывные, распределены и искривлены равномерно, имеют одинаковое круглое сечение;
- между волокнами и связующим существует жесткое сцепление;
- все расчеты и экспериментальные определения проводятся в направлении основы.

При растяжении в направлении армирования наибольшую нагрузку воспринимают волокна, при этом предел прочности в направлении армирования можно рассчитать по формуле:

$$\sigma_{xx} = K_{\sigma} [K_{II} \sigma'_B V_B + \sigma_m (1 - V_B K_{II})], \quad (5)$$

где коэффициент K_{II} , учитывающий содержание волокна в направлении действующей нагрузки, рассчитывается по формуле:

$$K_{II} = \frac{T_o n_o}{T_o n_o + T_y n_y}, \quad (6)$$

где T_o – метрический текс нитей в направлении основы; n_o – число нитей, расположенных на участке шириной 1 см, в направлении основы; T_y, n_y – соответствующие величины в уточном направлении; σ'_B – реализуемая прочность волокна с учетом удлинения матрицы ϵ_m :

$$\sigma'_B = \frac{\sigma_B \epsilon_m}{\epsilon_B}; \quad (7)$$

K_{σ} – коэффициент, учитывающий уменьшение степени реализации средних значений предела прочности вследствие разориентации волокон при использовании тканых армирующих материалов с регулярными противофазными искривлениями (огибание основными нитями уточных):

$$K_{\sigma} = \frac{1}{1 + \left(\frac{E_B}{G_M} \cdot V_B (1 - V_B) \cdot (\varphi_1^2 + \varphi_2^2) \right)}, \quad (8)$$

где G_M определяется через коэффициент Пуассона μ_M :

$$G_M = \frac{E_M}{2(1 + \mu_M)}. \quad (9)$$

Пространственное искривление волокон, возникающее при изготовлении тканых наполнителей, можно охарактеризовать двумя параметрами: углом φ_2 наклона винтовой линии подъема волокна на плоскость xy относительно пряжи и углом φ_1 , образующимся вследствие искривления волокон при огибании пряжи (рис. 4) [16].

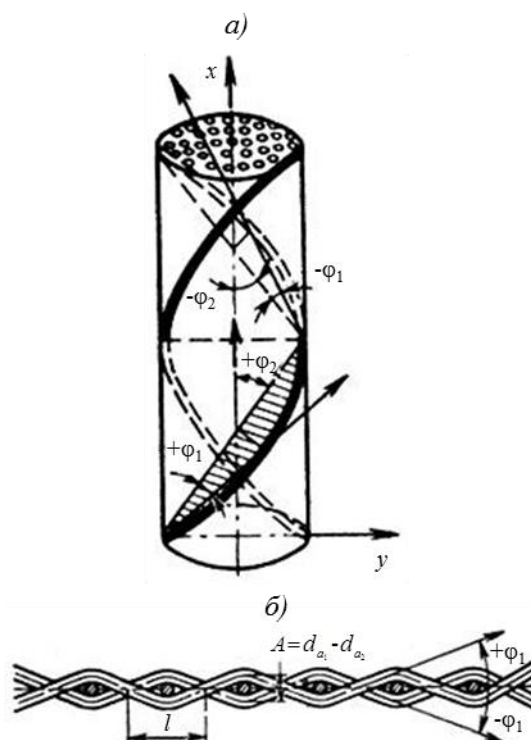


Рис. 4. Схема расположения волокон в крученой пряже [16]

Связь между углами φ_1 , φ_2 и текстурными параметрами наполнителя можно выразить уравнениями [16]:

$$\varphi_2 = \arctg \frac{D2K}{1000} = \arctg d_a \left(\frac{n}{V_H} \right)^{0.5} \cdot 2K \cdot 10^{-3}; \quad (10)$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{D}{\sqrt{D^2 + \left(\frac{1000}{2K} \right)^2}} = \arctg \frac{1}{\sqrt{1 + \text{ctg}^2 \varphi_2}}, \quad (11)$$

где D – толщина нити, мм; K – количество круток на метр.

Численное значение угла φ_1 также можно определить по микрофотографии стеклопластика (рис. 5).

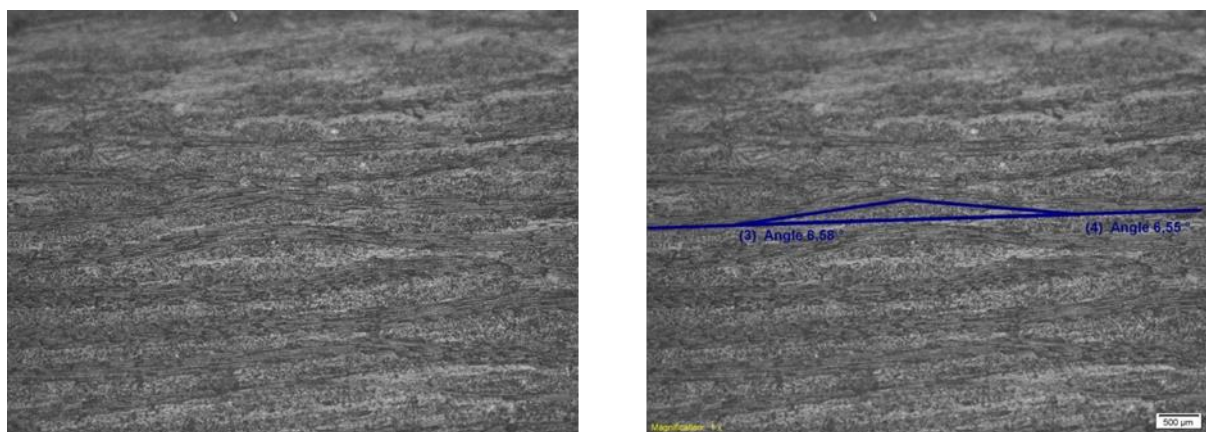


Рис. 5. Микрофотографии стеклопластика ВПС-53/120

Методы исследования упругих свойств слоистых композиционных материалов наиболее полно изложены в работах [14, 17–19]. Для определения упругих характеристик стеклопластика, армированного тканью, дополнительно использовано допущение, что материал состоит из двух гипотетических слоев, однонаправленно-армированных искривленными волокнами: толщина слоев пропорциональна объемному содержанию волокон, а их взаимное расположение перпендикулярно, а также принимаем, что влияние изменения искривления волокон в процессе нагружения на упругие характеристики пренебрежимо мало.

Модуль упругости стеклопластика E_{Π} в направлении основы рассчитывали по формуле [14]:

$$E_{\Pi} = E_o K_{\Pi} + E_y (1 - K_{\Pi}). \quad (12)$$

Модуль упругости второго условного подслоя E_y представляет собой трансверсальный модуль упругости пластика, условно однонаправленно-армированного искривленными волокнами в направлении утка, который практически не зависит от искривления волокон [14]:

$$E_y = \left[\left(1 - 2\sqrt{\frac{V_B}{\pi}} \right) \frac{1}{1 - \mu_M^2} + 2\sqrt{\frac{V_B}{\pi}} I \right] E_M, \quad (13)$$

где

$$I = \frac{1}{b E_M} \left[\frac{\pi}{2} - \frac{2a}{\sqrt{a^2 - b^2}} \arctg \sqrt{\frac{a-b}{a+b}} \right]; \quad a = \frac{1 - \mu_M^2}{E_M}; \quad b = 2\sqrt{\frac{V_B}{\pi}} \left(\frac{1 - \mu_B^2}{E_B} - a \right). \quad (14-16)$$

Модуль упругости первого условного подслоя, армированного искривленными волокнами в направлении основы (E_o), определяется по формуле [14]:

$$E_o = \frac{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_1)^2}{\frac{1}{E_{\parallel}} + \left(\frac{1}{G_{\perp\perp}} - 2\frac{\mu_{\parallel\perp}}{E_{\parallel}} \right) \operatorname{tg}^2 \varphi_1 + \frac{1}{E_y} \operatorname{tg}^4 \varphi_1}, \quad (17)$$

где

$$E_{\parallel} = E_B V_B + E_M (1 - V_B); \quad G_{\perp\perp} = \left[1 + 2\sqrt{\frac{V_B}{\pi}} k \left(\frac{2k}{\sqrt{k^2 - 1}} \arctg \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} - \frac{\pi}{2} \right) - 2\sqrt{\frac{V_B}{\pi}} \right] G_M; \quad (18-19)$$

$$G_M = \frac{E_M}{2(1 + \mu_M)}; \quad k = \frac{G_B}{2(G_B - G_M)\sqrt{\frac{V_B}{\pi}}}; \quad \mu_{||\perp} = V_B \mu_B + (1 - V_B) \mu_M. \quad (20-22)$$

Результаты

По приведенным формулам (5–22) рассчитаны предел прочности и модуль упругости стеклопластика на основе стеклянной ткани типа 120 и связующего ВСЭ-34. Для диапазона содержания связующего 25–50% (по массе) построены зависимости предела прочности при растяжении и модуля упругости (рис. 6).

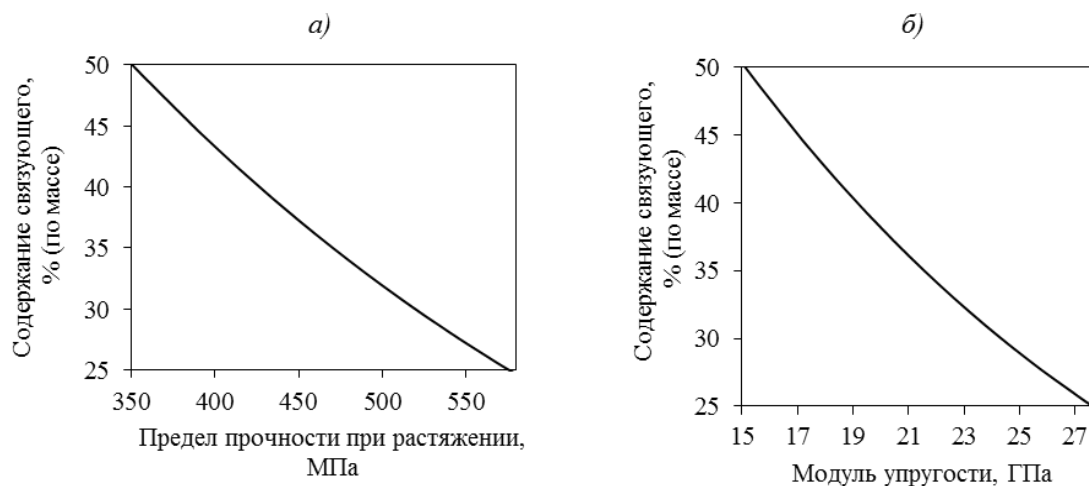


Рис. 6. Рассчитанные зависимости предела прочности (а) и модуля упругости (б) при растяжении от содержания связующего ВСЭ-34 для стеклопластика на основе стеклоткани типа 120

Для проверки расчетов методом автоклавного формования из препрега на основе стеклоткани типа 120 и эпоксидного связующего ВСЭ-34 изготовлен стеклопластик ВПС-53/120. Полученные характеристики стеклопластика после испытания образцов при растяжении (по ГОСТ 11262) в сравнении с теоретически рассчитанными приведены в табл. 4.

Таблица 4

Расчетные и экспериментальные значения предела прочности и модуля упругости при растяжении стеклопластика ВПС-53/120

Свойства	Экспериментальные значения* (по 10 определениям)	Расчетные значения
Предел прочности при растяжении $\sigma_{п}$, МПа	460/3,63	449
Модуль упругости при растяжении $E_{п}$, ГПа	21,7/3,96	20,4
Содержание связующего, % (по массе)	37,4	
Содержание волокна, % (объемн.)	44,6	

* В числителе – средние значения, в знаменателе – коэффициент вариации в %.

Значения предела прочности и модуля упругости при растяжении стеклопластика, полученные экспериментально, с целью построения зависимостей нормализованы по формуле:

$$x_{\text{прив}} = \frac{x_{п} V_{\text{в норм}}}{V_{\text{в}}}, \quad (23)$$

где $x_{\text{прив}}$ – нормализованное значение; $x_{п}$ – экспериментальное значение; $V_{\text{в норм}}$ – объемное содержание волокна, к которому приводят значения предела прочности.

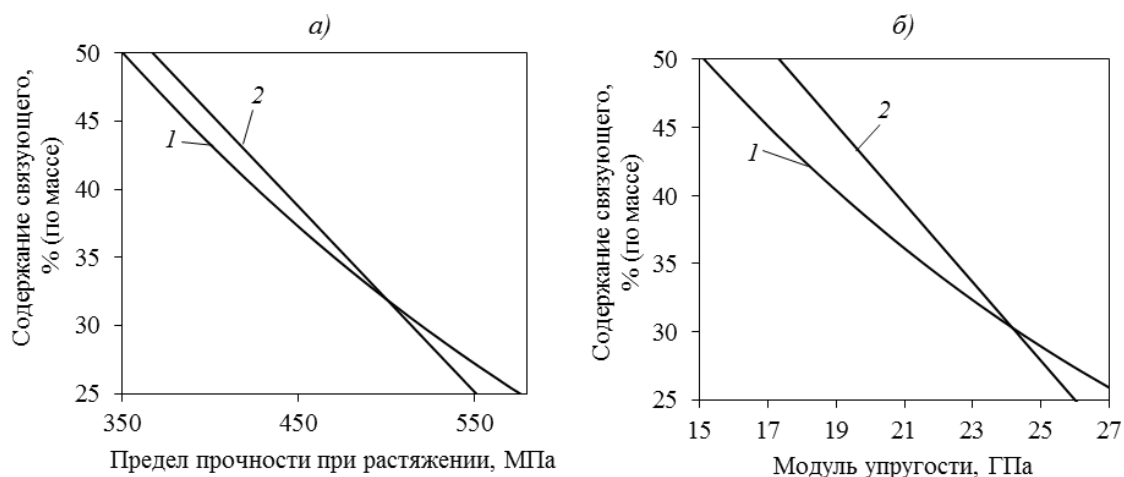


Рис. 7. Сравнение нормализованных (1) и расчетных (2) значений предела прочности (а) и модуля упругости (б) при растяжении для стеклопластика ВПС-53/120:

Сравнение расчетных значений модуля упругости и предела прочности при растяжении стеклопластика ВПС-53/120 и значений, полученных с помощью нормализации, приведено на рис. 7.

Обсуждение и заключения

Теоретические подходы для прогнозирования предела прочности и модуля упругости при растяжении стеклопластика на основе тканого наполнителя позволяют рассчитать значения с достаточной для инженерных расчетов точностью. Для снижения вероятности ошибки в расчетах необходимо получать достоверные значения упруго-прочностных характеристик матрицы. При их определении большое значение имеет качество отлитых образцов, которое напрямую зависит от метода изготовления и реологических свойств связующего. Для выбранного связующего марки ВСЭ-34 наиболее оптимальным (с точки зрения точности определения свойств) оказался метод изготовления полимерных блоков с последующей механической обработкой (нарезанием образцов). Отклонения экспериментальных значений от теоретических не превышают 6% – для модуля упругости и 2,4% – для предела прочности при растяжении. Для сравнения теоретических и экспериментальных значений в диапазоне содержания связующего от 25 до 50% проведена нормализация. Полученные результаты позволяют дать оценку теоретическим моделям, приведенным в данной работе.

Благодарности

Авторский коллектив выражает благодарность инженеру 2 категории ФГУП «ВИАМ» Ильичеву Александру Владимировичу за помощь при проведении испытаний и консультацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой // Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 17–20.

3. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
4. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // *Авиационная промышленность*. 2009. №4. С. 36–46.
5. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // *Вопросы материаловедения*. 2006. №1. С. 64–67.
6. Вавилова М.И., Кавун Н.С. Стеклопластики на основе цианэфирных связующих // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S2. С. 19–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-19-23.
7. Курносое А.О., Мельников Д.А. Характеристики стеклопластиков на основе высокодеформативных расплавных связующих в условиях воздействия эксплуатационных факторов // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2015. №11. С. 14–18.
8. Ильичев А.В., Раскутин А.Е. Исследование влияния концентратора напряжений на напряженно-деформационное состояние углепластика методом корреляции цифровых изображений // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №3. С. 62–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-62-66.
9. Каргин В.А., Слонимский Г.Л. Краткие очерки о физико-химии полимеров. М.: Химия, 1967. 232 с.
10. Рабинович А.Л. Введение в механику армированных полимеров. М.: Химия, 1970. 482 с.
11. Рогинский С.Л., Канович М.З., Колтунов М.А. Высокопрочные стеклопластики. М.: Химия, 1979. 144 с.
12. Киселев Б.А. Стеклопластики. М.: Гос. науч.-технич. изд-во хим. лит-ры. 1961, 240 с.
13. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М.: Химия, 1981. 232 с.
14. Скудра А.М., Булаве Ф.Я. Прочность армированных пластиков. М.: Химия, 1982. 216 с.
15. Волосков Г.А., Морозов В.Н. К вопросу оценки механических свойств материалов на основе отверждающихся синтетических смол // *Синтез и исследование эпоксидных олигомеров и полимеров: сб. науч. тр.* Черкассы: Изд.-полиграф. отдел отделения НИИТЭХИМа, 1979. С. 85–91.
16. Гуняев Г.М. Конструирование высокомодульных полимерных композитов. М.: Машиностроение, 1977. 160 с.
17. Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композитные материалы: справочник. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.
18. Кучер Н.К., Двейрин А.З., Земцов М.П., Анкянец О.К. Характеристики упругости слоистых тканых стеклопластиков // *Проблемы прочности*. 2004. №6. С. 26–32.
19. Кучер Н.К., Двейрин А.З., Заразовский М.Н., Земцов М.П. Деформирование слоистых стеклопластиков, армированных тканью сатиновой структуры при комнатной и низких температурах // *Механика композитных материалов*. 2004. №3. С. 341–354.