

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ ПРЕПРЕГОВ, РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

<sup>1</sup>Василевич Ю.В., <sup>1</sup>Сафонов А.И., <sup>2</sup>Можаровский В.В., <sup>3</sup>Неумержицкая Е.Ю.

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск

<sup>2</sup>УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»

<sup>3</sup>Академия последипломного образования, Минск

Одним из ключевых компонентов создаваемых композиционных материалов является препрег. Техническое изделие, изготовленное из препрега и обладающее большой податливостью, позволяет проводить с ним необходимую переработку. В результате уже сформированное изделие может приобрести новые формы с измененными размерами. При этом, если соблюдать заранее рассчитанные и заданные технологические параметры, то в процессе переработки в армирующем материале препрега не будут возникать остаточные напряжения, что позволит создать качественное и долговечное изделие. Основные характеристики препрегов, исследованные в процессе изготовления изделий из композита, рекомендованы для использования при разработке новых конструкционных материалов, а также изделий с заданными эксплуатационными свойствами.

Композит, препрег, полимер, связующее, стеклопластик, анизотропия, прочность, ткань, волокно, каркас.

Цель работы – дать анализ основных научных результатов, полученных при изготовлении конструкционных изделий на основе препрегов.

Препреги – это полимерно-волоконистая композиционная среда, находящаяся в неотвержденном состоянии полимеров. Композиты можно охарактеризовать как определенную комбинацию разнородных материалов, обладающую специфической структурой и геометрической формой. При проектировании композита стремятся реализовать наивысшие эксплуатационные характеристики материала, недостижимые при использовании каждого из компонентов в отдельности. Довольно часто удается получать композиты с уникальными структурами, формой и свойствами, которые значительно превосходят свойства компонентов [1].

**Оптимизация текстильного армирования.** Текстильные композиты можно определить, как комбинацию полимерного связующего с системой волокон или нитей, либо с тканью, полученной текстильными методами. Непропитанные волоконистые материалы (волокно, нити или ткани), образующие определенную плоскую или пространственную структуру, называют текстильными армирующими каркасами. Текстильные каркасы различаются ориентацией волокон, видом переплетения и геометрическими параметрами. Варьирование структуры (топологии переплетения) ткани – эффективный путь оптимизации текстильного армирования. Исходными данными для моделирования являются: линейная плотность нитей, их поперечное сечение в свободном состоянии, диаграммы сжатия и изгиба, топология переплетения, плотность ткани. Если ткань деформирована, то модель расчета может быть реализована в новой системе координат. Сравнивая натяжение, изгиб и сжатие нитей в исходной и деформированной конфигурации, можно рассчитать усилия, вызвавшие деформации. Такой подход че-

рез известные деформации наиболее соответствует технологиям трансформации, когда известны начальная и конечная конфигурации.

Элементы конструкций из композиционных материалов, воспринимающие основные и второстепенные нагрузки, должны изготавливаться из высокомодульных волокон и нитей. С коммерческой точки зрения к числу основных высокомодульных волокон относятся стеклянные, углеродные, органические, керамические и стальные волокна. Каждый из видов волокон обладает своими характерными преимуществами и недостатками по сравнению с другими. Например, углеродные волокна самые жесткие и упругие. Органические волокна хорошо сопротивляются разрыву, но плохо переносят сжимающие нагрузки. Стеклянные волокна самые дешевые и доступные, обладают наиболее высокой вязкостью разрушения, но не имеют прочности и жесткости присущих другим волокнам.

Важнейшую роль в пластике играет характер и ориентация расположения наполнителя в матрице, приводящие к анизотропии свойств композита. Анизотропия стеклопластиков (конструктивная анизотропия) оказывается еще одним регулируемым параметром, дополнительной «степенью» свободы при конструировании полимерных материалов и конструкций на их основе. Другим преимуществом перед обычными изотропными материалами является эффективное управление анизотропией их механических, теплофизических и других свойств в плоскости армирования. Это дает дополнительные резервы в повышении надежности конструкций, снижении их массы и расширении области применения. Управление анизотропией свойств осуществляется варьированием укладки арматуры. Появляется возможность формировать свойства материала под конкретную деталь под ее напряженно-деформированное состояние, что обеспечивает повышение несущей способности изделия и приводит к существенному снижению его массы. При этом использование композиционного материала предоставляет возможность широкого выбора исходных компонентов и структурных схем армирования, технологических способов формообразования изделия и получения требуемой геометрии поверхности конструкции, что дает большую степень свободы разработчику при проектировании изделия.

**Полимерное связующее.** Неотъемлемой частью при разработке композиционного материала является связующее, которое представляет собой двухкомпонентную или многокомпонентную систему, состоящую из синтетической смолы (полимерной или олигомерной составляющей) и отвердителей (или инициаторов и ускорителей отверждения). Она может включать пассивные и активные растворители (разбавители), пигменты и красители, пластификаторы, стабилизаторы и другие материалы, вводимые с целью придания связующим и стеклопластикам необходимых технологических и эксплуатационных свойств.

К основным требованиям, предъявляемым к связующим в производстве стеклопластиков, относятся: высокая когезионная прочность, смачивающая способность и адгезия к поверхности стеклянного волокна, технологичность при переработке и малая объемная усадка при отверждении, низкая токсичность и невысокая стоимость. Кроме того, в зависимости от эксплуатационных требований к изделиям, могут возникать специфические требования к связующим. Например, устойчивость к действию агрессивных сред, термостойкость и др. Выбор связующего определяется условиями изготовления и эксплуатации стеклопластиков. Основная роль полимерного связующего заключается в обеспечении монолитности материала и фиксации армирующих компонентов в

заданном положении или ориентации. Требования к величине вязкости полимерной системы зависят от структуры армирующего каркаса и используемого для пропитки технологического приема. В свою очередь поверхность волокон, контактирующих со связующим, должна иметь возможность быть смачиваемой и совмещаться с полимерной системой.

Пропитанный связующим армирующий текстильный каркас при формовании обычно подвергается действию значительного давления, позволяющего удалить пузырьки воздуха или технологического газа— носителя связующего. Для достижения высоких механических характеристик объемное соотношение армирующего каркаса и полимерной матрицы в текстильных композитах должно составлять примерно 70:30. Важно иметь способ удаления избытка связующего введенного при пропитке. После получения требуемой степени пропитки полимерное связующее отверждается. Отверждение происходит при нормальной или повышенной температуре в одну или несколько стадий в зависимости от вида текстильного материала, типа связующего, способа изготовления композита, необходимой скорости отверждения, степени отверждения и требований к свойствам конечного продукта. Обычно глубокое отверждение полимерной системы в результате высокотемпературной обработки после отверждения увеличивает термостойкость матрицы и композита, однако при этом возрастает и их хрупкость.

Основным видом смол для изготовления текстильных композитов, от которых не требуется высокой термостойкости, являются полиэфирные смолы, которые относительно дешевы, обладают хорошей текучестью, хорошо смачивают поверхность волокон и отверждаются при умеренных температурах. В то же время из-за высокой чувствительности к тепловому воздействию отвержденные полиэфирные смолы имеют низкую прочность, плохо сопротивляются удару и проявляют значительную усадку при повышенных температурах. Полиэфирные смолы с успехом применяются для изготовления текстильных композитов самого разного назначения, что позволило накопить значительный опыт в этой области технологии композитов. Таким образом, можно ожидать, что полиэфирные смолы окажутся вне конкуренции для изготовления текстильных конструктивных композитов, работающих в диапазоне умеренных температур.

Для высокотемпературных областей применения основным связующим для текстильных композитов являются эпоксидные смолы. Они обладают высокой прочностью и отверждаются при сравнительно невысоких температурах (до 160 °С). Вследствие меньшей температурной чувствительности эти системы характеризуются меньшей усадкой и меньшей склонностью к ползучести, чем полиэфирные. К отрицательным свойствам эпоксидных смол относятся высокая стоимость и токсичность, чрезмерная твердость, а также пониженная прочность при высоких температурах. В целом, по присущему им комплексу свойств, эпоксидные смолы являются наилучшими из доступных полимерных систем для изготовления композитов, работающих при повышенных температурах, когда их высокой жесткостью можно пренебречь. Сильные ударные воздействия или высокие удельные напряжения при высоких температурах эксплуатации требуют от композита повышенной ударной вязкости. В этом случае необходимо применять рецептуры эпоксидных смол, обладающих большей эластичностью. Такие рецептуры существуют, однако их применение связано с необходимостью выбора между улучшенной ударной вязкостью и снижениями термостойкости, прочности и жесткости.

Оптимальная вязкость связующих для «мокрой» намотки изделий и для изготовления препрегов на практике составляет по вискозиметру ВЗ-1 (1÷3) °Е в градусах Энглера. Именно такие значения вязкости связующих эффективны для пропитки тканей различной структуры при изготовлении препрегов. В этом случае связующее легко проникает в межленточное пространство тканевых наполнителей и хорошо смачивает волокна.

Монолитность композиционных материалов напрямую зависит от степени пропитки связующим. В работе [2] время, необходимое для полной пропитки композита, определяется по формуле

$$t = \frac{\mu f(\delta) k^2 \ln k}{\rho g h + \frac{2\delta \cos \theta}{r_b} \frac{1-\delta}{\delta^2}},$$

где  $f(\delta) = 16(1-\delta)^{1,5} [1 + 56(1-\delta)^3]$ ,  $k = r_0 / r_b$ ,  $r_0$  – наружный радиус макронити;  $r_b$  – радиус элементарного волокна;  $h$  – высота поднятия жидкости в капилляре;  $\sigma$  – пористость;  $\mu$  – вязкость связующего;  $\theta$  – угол наклона арматуры к горизонту.

Анализ приведенного соотношения выше показывает, что скорость капиллярного течения связующего весьма низка (2–8 см/мин), а для того, чтобы скорость пропитки была приемлемой с точки зрения производительности процесса, необходимо протягивать ткань со скоростью 2–80 м/мин, т.е. на два-три порядка выше. Это не обеспечивает полную пропитку армирующего материала в ванне, поэтому процесс пропитки на микроуровне начинается только при выходе из ванны, когда под действием гравитационных сил в капиллярах образуются капли, раздвигающие волокна и способствующие образованию радиальных и продольных щелей, куда устремляется связующее. При этом волокна могут быть раздвинуты настолько, что перестают действовать капиллярные силы. В результате процесс пропитки замедляется. Поэтому необходимо иметь такое натяжение волокон, которое сохранило бы стабильную капиллярную структуру наполнителя. В случае стабильности структуры значительно улучшается качество пропитки и, следовательно, увеличивается количество работающих волокон, что в конечном итоге приводит к повышению прочности композита. Кроме того, для улучшения качества пропитки и, следовательно, для повышения прочности композита намотку следует вести с минимально возможным значением вязкости.

**Натяжение арматуры.** Роль технологического натяжения арматуры при намотке очень велика. Натяжение определяет коэффициент наполнения композиционного материала арматурой, решающим образом влияет на прочность и другие свойства материала даже при не слишком хороших упругих и адгезионных свойствах применяемого связующего. Однако превышение некоторого максимума технологического натяжения приводит к дополнительным повреждениям армирующих волокон при движении по пропиточно-формирующему тракту станка и к появлению участков, не смоченных связующим и создающих неоднородность свойств материала по толщине наматываемой оболочки.

Оптимальное давление контактного формования при намотке, определяемое натяжением наполнителя, позволяет получать максимальную прочность, минимальную пористость и наилучшие сочетания других свойств материала. Оно зависит от типа армирующего полуфабриката и характеристик полимерного связующего. Но-

минальное значение технологического натяжения армирующего материала, выражаемое в долях разрывной нагрузки применяемой арматуры ( $P_p$ ), для стеклянных нитей варьируется в пределах 0,12–0,5 от ( $P_p$ ) [3]. Для стеклоткани натяжение обычно составляет 0,1–0,4 ( $P_p$ ). При этом уровень применяемых натяжений органоластиков в 2 раза выше, а при намотке углепластиков и боропластиков в 2 раза ниже, чем при намотке стеклопластиков. Таким образом, следует заметить, что оптимальное давление контактного формования при намотке композиционного материала имеет свои определенные границы.

Без обеспечения герметичности стеклопластиков немислимо их применение в ряде отраслей промышленности и новой техники. Поэтому проблема формирования условий, которым должны удовлетворять как исходные элементы композита, так и условия его эксплуатации, для создания герметичной системы весьма актуальна. Между тем при создании изделия или применяется эмпирический подход, или за основу расчета принимаются рекомендации автора работы [4], которые полагают, во-первых, что герметичность системы является функцией лишь деформации ее элементов и, во-вторых, даже при такой постановке анализ основан на простейших плоских моделях. Такой подход к созданию герметичного материала приводит, с одной стороны, к явно завышенным требованиям к деформации связующего, а с другой – не учитывает когезионной и адгезионной прочности композита, что приводит к значительным ошибкам, ибо разгерметизация материала может произойти и вследствие потери сплошности связующего или границы раздела армирующая матрица.

Далее, и это главное, как правило, элементы конструкции должны быть одновременно и герметичными, и несущими, т.е. условия герметичности должны быть построены с учетом требований, предъявляемым к прочностным свойствам материала. В противном случае происходит утяжеление и удорожание конструкции, что связано с необходимостью предусматривать наличие как герметичных, так и несущих слоев.

Сформулируем требования к элементам стеклопластика и к условиям его эксплуатации в аспекте создания герметичной и одновременно достаточно прочной структуры. Нарушение сплошности композита происходит вследствие либо нарушения сплошности связующего или из-за нарушения связи по границе раздела волокно-смола. Условия сплошности описываются системой неравенств [2]

$$\frac{E_c}{E_a} \geq 0,06, \quad \frac{\tau_{адг}}{\sigma_a} \geq 0,04, \quad \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_a} \geq 1,5, \quad \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \geq 0,06, \quad \frac{\tau_c}{\sigma_a} \geq 0,04.$$

Из-за существенного различия свойств компоненты стеклопластика разрушаются не одновременно. Поэтому при формулировании условий герметичности необходимо учитывать, какой из компонентов (или контактный слой) разрушается первым. В композитах даже при простых видах нагружения отвердевшее связующее находится в плоском (или объемном) напряженном состоянии, и для оценки его прочности и, следовательно, сплошности совершенно необходимо применение тех гипотез прочности, которые учитывают реальное напряженное состояние.

Как известно, упруго-прочностные свойства композиционных материалов определяются не только упруго-прочностными свойствами их элементов, но и грани-

цами раздела волокно-матрица, которые существенно влияют на равнозагруженность и одновременность работы всех волокон.

При работе композита на сжатие (например, в месте прокола круглого отверстия; при трансформации цилиндрической оболочки в торовую) разрушение материала начинается с потери устойчивости армирующих элементов. Поэтому их жесткость должна оказывать значительное влияние на прочность композита при сжатии. Известно, что жесткость волокон является степенной функцией их диаметра. Можно предположить, что прочность при сжатии существенным образом зависит от диаметра. Действительно, имеет место следующее уравнение регрессии [5, 6]

$$\sigma_{сж} = 115 + 11,5d + 46E_a E_c + 7,75\tau_{адг},$$

т. е. прочность композита линейно связана с диаметром. Здесь  $E_a$  и  $E_c$  – модули упругости арматуры и связующего;  $d$  – диаметр волокна.

Это было подтверждено результатами исследования устойчивости модели стеклопластика, в которой нагрузка непосредственно прикладывается лишь к среднему элементу, а крайние вовлекаются в работу через связующее. Была получена линейная связь между  $\sigma_{сж}$  и  $d$ .

Изложенный научный материал носит методическую направленность по разработке инженерно-технических изделий из композиционных материалов. Объектом исследования является препрег, физико-механические характеристики которого изучены в процессе формования изготавливаемого изделия, проведения экспериментальных исследований, моделирования технологических и механических процессов. Особое внимание уделено изложению ключевых этапов создания изделий из композита и полученных формул, описывающих количественные показатели результатов исследований. Дополнительным информационным источником по теме работы может служить литература, содержащаяся в приведенном списке литературы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Василевич, Ю.В. Применение свойств препрегов в технических процессах изготовления изделий из композиционных материалов / Ю.В. Василевич и др. // Научное издание. Москва, 2017. – 153 с.
2. Xue, P. *Integrated micro/macro-mechanical model of woven fabric composites under large deformation*//*Composite Structures* v.70. – 2005. – P. 69–80.
3. Трофимов, Н.Н. Основы создания полимерных композитов / Н.Н. Трофимов, М.З. Канович. – М.: Наука, 1999. – 539 с.
4. Калинин, В.А. Намотанные стеклопластики / В.А. Калинин, М.С. Макаров. – Москва: Химия, 1986. – 272 с.
5. Кортен, Х.Т. Разрушение армированных пластиков / Х.Т. Кортен; Пер. с англ., под ред. Р.М. Тарнопольского. – М.: Химия, 1967.
6. Рогинский, С.Л. / Основные принципы создания высокопрочных ориентированных стеклопластиков / С.Л. Рогинский, М.З. Канович // *Технология, физико-технические свойства и применение стеклопластиков*. – М., 1975.– с. 3–17.