

## РЕШЕНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ПРИ ФОРМОВАНИИ ОБОЛОЧЕК НА ГИБКИХ ОПРАВКАХ

<sup>1</sup>Василевич Ю.В., <sup>2</sup>Сахоненко В.М., <sup>2</sup>Горелый К.А., <sup>2</sup>Малютин Е.В., <sup>1</sup>Неумержицкая Е.Ю.

<sup>1</sup>УО «Белорусский национальный технический университет», Минск

<sup>2</sup>ОАО «Авангард», Сафоново

Создание композита тесно связано с проблемой его расчета, так как получение армированной системы – комплексная задача, включающая: во-первых, обеспечение хорошего адгезионного слоя между жесткими и прочными армирующими элементами и полимерным связующим, обладающими ярко выраженными реологическими свойствами; во-вторых, формирование условий, которым должны отвечать упруго-прочностные свойства исходных компонентов, чтобы гетерогенная система мог-

ла рассматриваться как сплошная анизотропная среда с некоторым тензором приведенных вязкоупругих характеристик, соответствующих техническому заданию; в третьих, эта задача включает вопросы оптимального синтеза этих компонентов, т.е. разработке и строгому соблюдению технологии изготовления изделия.

Наиболее тривиальным конструктивным решением, позволяющим использовать высокую механическую прочность стеклянных волокон, являются вантовые конструкции, в которых непрерывные волокна укладываются параллельными пучками вдоль действующих напряжений растяжения. Поэтому совершенно очевидно, что основным несущим элементом в композите является наполнитель. Роль связующего двояка: с одной стороны оно служит для передачи усилий от непосредственно нагруженных элементов к незагруженным, а с другой – препятствует потере устойчивости волокон. Для выполнения своих функций связующее должно обладать:

- хорошей смачивающей способностью и высокой адгезией к материалам арматуры (стеклом, базальтом и т.д.);
- высокой когезионной прочностью и достаточно большим модулем упругости при вязком характере разрушения; достаточной деформативностью, т.е. относительное удлинение упругой и пластичной деформации связующего вплоть до разрыва должно быть не менее соответствующих значений для стеклоарматуры;
- незначительной усадкой при отверждении и значением коэффициента термического расширения близким к значению этого показателя для стеклоарматуры; отсутствием при отверждении выделений побочных продуктов, нарушающих монолитность стеклопластиков;
- достаточной теплостойкостью и стабильностью физико-химических свойств при хранении и эксплуатации в соответствии с заданными требованиями; гидрофобностью и высокой водостойкостью; малой коррозионной активностью по отношению к металлам, химической нейтральностью отвержденного связующего по отношению к стеклоарматуре;
- приемлемыми технологическими свойствами (вязкостью, жизнеспособностью, температурой охлаждения, временем желатинизации и т.д.);
- экономическими показателями полимера (стоимостью, дефицитностью и т.п.).

Технологически армирование по одной и той же принятой схеме может быть выполнено с переплетением и без переплетения волокон (или нитей), от чего меняется рисунок каждого элементарного слоя стеклопластика, его макростроение. В зависимости от этого изменяются и некоторые свойства стеклопластика. Например, герметичность, жесткость при изгибе и др. Поэтому для большей определенности необходимо стеклопластики дополнительно характеризовать строением его текстурных слоев. В этом плане различаются стеклопластики: а) с тканевой текстурой; б) со строчной текстурой или однонаправленно-армированной; в) с плетеной текстурой, в которой в каждом текстурном слое волокна переплетены между собой.

Выполнение торовых оболочек предполагает использование всех этих текстур в зависимости от дополнительных требований. Конкретный выбор материала регулируется условиями, которые будут рассмотрены ниже. Таким образом, мы будем рассматривать стеклопластики, представляющие собой слоистые текстуры с чередующимися слоями высокомодульной арматуры и прослойками связующего. При проведении технологических исследований используют разнообразные методы, необходимее для получения достаточно полной и надежной информации о процессах, проходящих при изготовлении изделий и об изменениях их в зависимости от состава, структуры, свойств и технологии переработки входящих материалов. Эти многочисленные и отличающиеся между собой методы исследования можно распределить на следующие три группы: структурные методы, с помощью которых определяют строение и превращения, протекающие в материале изделия в процессе его изготовления; методы, использование которых позволяют непосредственно определять свойства материалов, требуемые в тех или иных условиях эксплуатации, и прежде всего механические; технологические методы, в частности, определяющие поведение материалов в производстве, включая свойства деформируемости, требуемые для данных условий эксплуатации.

Для анализа деформативного и напряженного состояния определим понятие среды исследования, рассмотрим геометрические величины, описывающие изменения этой среды, внутренние силы и их связь с внешними воздействиями. Соотношения между внутренними силами и деформациями будем получать на основе экспериментальных исследований. Технология изготовления торовых оболочек на гибких оправках основывается на технологии производства цилиндрических оболочек с учетом ряда особенностей. Все дальнейшие рассуждения будем проводить только для торовых оболочек круглого сечения, хотя принципиальной разницы в этом нет. На оправку наматывается или

наформовывается цилиндрическая оболочка. Оправка должна быть жесткой как в радиальном, так и в осевом направлениях, а материал наформованной оболочки должен оставаться препрегом. Дальнейшая трансформация оболочки происходит путем изгиба совместно с оправкой. В этом случае оправка должна быть освобождена от жестких связей в осевом направлении. Изгиб оболочки происходит путем приложения внешних усилий: изгибающего момента и осевой силы с опорой на жесткую поверхность, представляющую собой внутреннюю поверхность тора. В результате полученная торовая оболочка не должна иметь утяжек и разрывов армирующего материала, складок на поверхности и внутренних расслоений, т.е. параметры созданной оболочки должны удовлетворять требованиям конструкторской документации.

Исследуем процессы, которые происходят при проведении указанной последовательности технологических операций с целью выработки и принятия мер для предотвращения тех отступлений, которые перечислены выше. С точки зрения прочности и надежности конструкции изделия наиболее ответственной является задача обеспечения заданных конструктором структурных параметров. При этом требуемая геометрия изделия, точность и чистота поверхности обеспечиваются рабочими поверхностями технологической оснастки. Качество формирования стеклопластиковых оболочек независимо от типа применяемой стеклоарматуры оценивается по двум критериям: величиной коэффициента объемной плотности  $H_0$  и величиной коэффициента поверхностной плотности  $\Pi$ , характеризующей пористость намотанной структуры, а, следовательно, в конечном счете, герметичностью готового стеклопластика. Таким образом, выдерживание расчетных значений структурных показателей  $H_0$ ,  $\Pi$  и  $T_0$ , где  $T_0$  - величина технологического натяжения арматуры при формовании изделия, в пределах заданных допусков, позволит значительно сократить и регламентировать высокую стабильность прочностных данных у оболочек. Для выдерживания этих структурных параметров технологу при подготовке производства необходимо установить оптимальные величины технологических параметров формования и регламентировать их соответствующими допусками, которые гарантировали бы стабильность готовых стеклопластиковых структур в заданных пределах. Таковыми являются контактное давление формования  $N$ , технологическое натяжение арматуры  $T_0$  при формовании изделия и температура формования  $t^\circ\text{C}$ . Кроме того, необходимо обеспечить заданные макроструктурные критерии и схемы армирования, требуемые геометрические формы поверхностей, точность размеров и геометрических форм, точность взаимного расположения, высокое качество и чистоту формируемых поверхностей и регламентировать процент возможных дефектов. Все сказанное относится к подготовке производства цилиндрической оболочки, которую можно формовать как «сухим» методом (стеклоарматура перед формованием предварительно пропитывается связующим на отдельной технологической операции), так и мокрым, когда нанос связующего осуществляется непосредственно при намотке.

Вторая стадия, которая предусматривает уже непосредственное изгибание цилиндрической оболочки вместе с оправкой, должна происходить при повышенной температуре. Это требование исходит из следующих рассуждений. Так как при изгибе цилиндрической оболочки происходят большие относительные деформации материала, которые в некоторых случаях достигают нескольких десятков процентов, то эти деформации в значительной степени должны быть неупругими. В идеальном случае упругие деформации отсутствуют или являются минимальными. Это требование выполняется если материал оболочки находится в состоянии препрега. Кроме того, чтобы уменьшить силы трения, возникающие при сдвигающих перемещениях армирующего материала, необходимо обеспечить минимальное значение вязкости связующего. Опытным путем установлено: температура переработки связующего должна составлять примерно  $80^\circ\text{C}$ , если согласно технологической маршрутной карте для связующего в это время осталось не менее 97% массовой доли растворимой смолы, так как это напрямую связано с ее жизнеспособностью.

Развитие промышленного производства композитов невозможно без широкого внедрения технологии изготовления изделий из полуфабрикатов, в частности, препрегов. При этом к полимерным связующим предъявляются дополнительные требования технологического характера, основными из которых являются сочетание длительной жизнеспособности при температуре хранения и достаточно высокие реакционные способности при температурах переработки.

Следует отметить, что само понятие «жизнеспособность» требует уточнения, поскольку отсутствуют единые критерии его оценки. При хранении препрегов в связующих протекают два взаимосвязанных процесса: химическое структурирование, т.е. образование сетки химических связей, и фи-

зическое структурирование, т.е. образование сетки физических связей. Наиболее часто жизнеспособность связующих отождествляют со временем гелеобразования. Именно в момент гелеобразования связующие теряют текучесть, в итоге чего резко снижается их способность к дальнейшей переработке. Очевидно, что эта величина является верхним пределом жизнеспособности полимерной композиции и зависит от процесса химического структурирования полимера, т.е. образования в нем сетки химических связей. На практике препреги теряют способность к дальнейшей переработке задолго до достижения верхнего предела жизнеспособности из-за существенного повышения вязкости связующего вплоть до перехода в стеклообразное состояние. Время, за которое достигается максимальное значение вязкости, следует считать технологической жизнеспособностью. Технологическая жизнеспособность связующих обусловлена критическим явлением затвердевания, т.е. появлением в полимере сетки физических связей.

При получении торовых оболочек связующее, очевидно, должно быть таким, чтобы оно способствовало достижению минимального значения внутренней силы трения при скольжении армирующего материала препрега. Отсюда вытекает необходимость повышения жизнеспособности связующего применительно для изготовления торовых оболочек на гибких оправках. Это необходимо делать по двум причинам: из-за увеличения периода изготовления торовой оболочки и из-за необходимости иметь связующее с минимальной вязкостью в момент получения торовой оболочки из цилиндрической.

Существуют разнообразные методы повышения жизнеспособности связующих. Так, например, регулируется реакционная способность подбором всех компонентов связующего, а также при необходимости вводятся катализаторы, ускорители или ингибиторы (замедлители). Наполнители при изготовлении композитов иногда могут играть роль ингибиторов. Наличие воды в компонентах связующего и наполнителях также приводит к снижению реакционной способности связующих, как и присутствие растворителей и реактивных пластификаторов. Важной проблемой в химии эпоксидов является необходимость сочетания быстрого отверждения эпоксидных композиций с ее высокой жизнеспособностью при хранении. Частично эта проблема решается путем замены катализаторов на латентные ускорители (УА-605/2-5, А-30-1,5, блок-полиизоцианаты, И-120У), которые имеют разную температуру активации и позволяют получать связующие не только с достаточно длительным сроком хранения, но и значительно сокращают время полимеризации. Одни смолы имеют длительный цикл отверждения, другие – короткий, поэтому для получения связующего с заданными сроками жизнеспособности разрабатываются модифицированные системы. Например, изменение свойств связующих, в частности, свойства «жизнеспособности» проводится с использованием системы на основе эпоксидных соединений, называемых в промышленности «смолами», представляющими собой ароматические, гетероциклические и циклоалифатические мономеры с повышенной удельной функциональностью или смеси мономеров с примесью олигомерной фракции или с использованием отвердителей других классов. Для композиций на основе эпоксидных полимеров марок ЭД-16, ЭД-10 и эпуров на их основе с отвердителем - продуктом конденсации анилина с формальдегидом используется метод раздельного нанесения смоляной и затвердевающей части на различные слои армирующего материала с последующим их объединением-чередованием в процессе формования изделий. Имеются и другие методы повышения жизнеспособности связующих. Однако необходимо также отметить, что управление жизнеспособностью может привести к изменению других свойств связующего, иногда даже в нежелательную сторону. Поэтому управление жизнеспособностью связующих не совсем простая задача, но вполне выполнимая.

### **Резюме**

Дано научное обсуждение решения проблем при разработке и создании оболочек из композиционных материалов.

### **Summary**

*Given a scientific discussion of solutions in the design and creation of shells made of composite materials.*

Поступила в редакцию 24.11.2012