

Автоматизированная технология  
изготовления конструкций  
из волокнистых композиционных  
материалов (ВКМ)

## Состояние и перспективы

### *Термопласты и реактопласты*

Композиционные материалы состоят из нескольких компонентов, обладают специфическими свойствами, отличными от свойств составляющих их компонентов и определяемыми их взаимодействием. Характеристиками свойств можно управлять посредством изменения состава и технологических параметров режима получения композиционных материалов.

Одни конструкционные композиционные материалы изготавливают в форме заготовок, которые далее преобразуются в конструкции посредством воздействия на них температуры и давления (термопласты).

Другие получают в результате прохождения реакции между компонентами смеси, загруженной в формообразующую оснастку (реактопласты). При этом одновременно «рождаются» композиционный материал и конструкция.

### *Конструкции из композиционных материалов.*

В современных качественных изделиях неуклонно растет доля использования композиционных материалов, что объясняется стремлением оптимизировать и удешевить изделия за счет эксплуатации уникальных свойств композиционных материалов, уменьшить количество конструкций в них. Большое влияние оказывает фактор истощения и удорожания природных ресурсов традиционно используемых конструкционных материалов.

Все конструкции из композиционных материалов можно условно разделить на:

- \* не подверженные силовым нагрузкам,
- \* несущие силовые нагрузки,
- \* несущие смешанные нагрузки.

К первым относятся термопласты, например, конструкции предназначенные для облицовки салонов.

Ко вторым и третьим относятся армированные реактопласты и волокнистые армированные реактопласты. Их используют в конструкциях, несущих силовые нагрузки и работающих в агрессивных средах.

К третьим принадлежат конструкции несущие силовые, тепловые, акустические и прочие нагрузки.

Значительную долю составляют армированные конструкции из волокнистых композиционных материалов (ВКМ) с минимальной массой: корпуса ракет, воздушных и водных малотоннажных судов, глубоководных аппаратов, несущих кузовов вагонов и автомобилей; бамперы, элементы подвески транспортных

средств; лопасти воздушных и гидравлических винтов. Например, в авиации и космонавтике за экономию килограмма массы изделия готовы платить:

Типы аппаратов	Экономия массы, доллар/кг массы
Малые гражданские суда	50
Вертолеты	100
Транспортные самолеты	180
Гражданские коммерческие самолеты	250
Двигатели летательных аппаратов	450
Самолет «Боинг 747»	450
Самолет - истребитель	450
Самолет вертикального и короткого взлета	580
Сверхзвуковой транспортный самолет	1100
Спутник с околоземной орбитой	10000
Спутник со стационарной орбитой	10000
Космический корабль «Шаттл»	15000

### *Армированные и оптимальные конструкции*

Конструкции из композиционных материалов можно оптимизировать изменяя их компонентный состав, геометрическую форму и параметры технологических режимов их получения.

Для армированных волокнистых реактопластов дополнительным высокоэффективным параметром оптимизации является схема армирования, позволяющая создавать нужную анизотропию свойств слоистых или пространственно армированных конструкций.

### *Конструкции будущего*

Возможность создавать высококачественные изделия посредством эксплуатации уникальных свойств композитов и использования в изделиях малого количества конструкций (и соединений) из ВКМ с любыми заданными геометрическими формами и схемами армирования и позволяет рассматривать конструкции из ВКМ в качестве основных для изделий ближайшего будущего.

## **Технологии формообразования армированных слоистых конструкций**

Существуют несколько известных многостадийных промышленных технологий производства армированных конструкций из ВКМ и их оценки:

Способ формования	Балльная оценка показателей *				
	Стоимость оборудования	Производительность	Прочность изделий	Квалификация формовщика	Сложность изделия
Ручной укладкой	1	3	3	10	9
Эластичной диафрагмой:					
под вакуумом	2	2	4	10	9
в автоклаве	3	1	6	6	7
Напылением	4	4	3	10	8
Намоткой волокна	6	6	10	2	4
Пульпузия	7	9	9	2	2
Штамповка листовых формовочных материалов	10	8	7	4	9
Центробежное	9	7	8	3	3
Непрерывное, протяжкой	10	10	5	2	1
Впрыскиванием смолы	3	2	3	7	7
Литье под давлением	10	10	6	2	10
Покрытие оболочек	9	4	3	5	7
Прессование стеклонаполненной композиции	9	8	7	4	8

\*Оценка в баллах: 10 - наивысшая

Производство анизотропных конструкций основано на задании волокну-стому армирующему материалу направления ориентации внутри конструкции - укладке армирующего материала вдоль заданной траектории на поверхности. К таким технологиям относятся намотка, ручное контактное формование, формование эластичной диафрагмой и прессование.

#### *Намотка*

Наиболее распространена, отработана и автоматизирована. При намотке (на стадии формообразования) пропитанную связующим непрерывную армирующую натянутую ленту автоматически наматывают на формообразующую оснастку. На последующей стадии полимеризации связующего материала формируется полимерная матрица. В результате получают твердую армированную конструкцию из ВКМ с имеющейся внутри нее или вынутой из нее оснасткой.

Основные ограничения технологии обусловлены необходимостью укладывать армирующий материал на формообразующую поверхность по непрерывным

геодезическим траекториям со знакопостоянной нормальной кривизной. Следствием этого является ограниченность геометрических форм и схем армирования конструкций. Типовыми конструкциями, производимыми по технологии намотки являются: трубы, баллоны, элементы корпусов ракет.

### *Ручное контактное формование*

Технологию ручного контактного формования отличает стадия формообразования, где армирующий материал в виде связанных (тканых или прошитых) лент конечной длины укладывается послойно на формообразующую поверхность любой геометрической формы и размеров вдоль любой заданной траектории. В качестве реализующей укладку исполнительной системы используется человек, работающий во вредной среде и использующий инструменты типа валиков, шпателей, кистей, ножей и ножниц для разглаживания, пропитки и раскроя армирующих лент.

Основные недостатки технологии сводятся к необходимости раскроя связанных армирующих лент, высокому проценту трудно утилизируемых отходов, возникающих при изготовлении конструкций с поверхностями ненулевой гауссовой кривизны, применению ручного труда человека во вредных условиях, нестабильности характеристик свойств композиционного материала в рамках одной и нескольких конструкций.

Для технологической подготовки процессов ручного контактного формования применяются системы технологического проектирования, реализованные как прикладные модули:

Например, модуль приложений в системе Pro/ENGINEER поддерживает автоматизированную технологию конструирования, документирования и изготовления слоистых плоских и искривленных гладких панелей, а также гладких панелей с кривизной поверхностей одного направления, выполняемых ручной выкладкой.

I-DEAS Laminate Composites - модуль приложений системы I-DEAS, который также поддерживает технологию автоматизированного конструирования и технологического проектирования слоистых армированных конструкций из ВКМ. Пользователь имеет возможность проводить:

- предварительный упрощенный анализ действия нагрузок на композитные конструкции с использованием внутренних средств модуля;
- детальный анализ с использованием интерфейса с системами NASTRAN и ABAQUS;
- анализ ортотропных и анизотропных оболочек из слоистого волокнистого композита, а также ортотропных твердых тел, доступных непосредственно в модуле I-DEAS Model Solution.

## Формование эластичной диафрагмы и опрессовка

Технология отличается от предыдущей наличием дополнительной стадии опрессовки непотвержденной композиции конструкций с небольшими габаритными размерами, используемой с целью ее уплотнения, удаления из нее газообразных включений и излишков связующего, т.е. устранения некоторых дефектов ручного контактного формования. Этим достигается улучшение стабильности характеристик свойств композиционного материала конструкций и самих конструкций.

### Автоматизированное формование

Потенциально широкие возможности технологии ручного контактного формования вызвали необходимость ее механизации и автоматизации - создания машин автоматизированного формования. В них наследованы методы ручного контактного формования, но произведена замена человека на автоматизированную исполнительную систему. Автоматизированное формование позволяет изготавливать высококачественные конструкции с малой гауссовой кривизной поверхности и близкими к геодезическим непрерывными и прерывистыми траекториями армирования. Некоторые производственные программы выполняются с применением специализированных автоматизированных формующих машин (например, обшивка крыла самолета).

Автоматизированное формование сняло ограничения технологии ручного контактного формования, вызванные применением средств ручного формования (человека). Сохранившиеся ограничения метода укладки связанных армирующих лент, используемого автоматическим рабочим органом (рис.1), позволяют уложить ленты лишь на поверхности с малой гауссовой кривизной и вдоль траекторий армирования, близких к геодезическим.

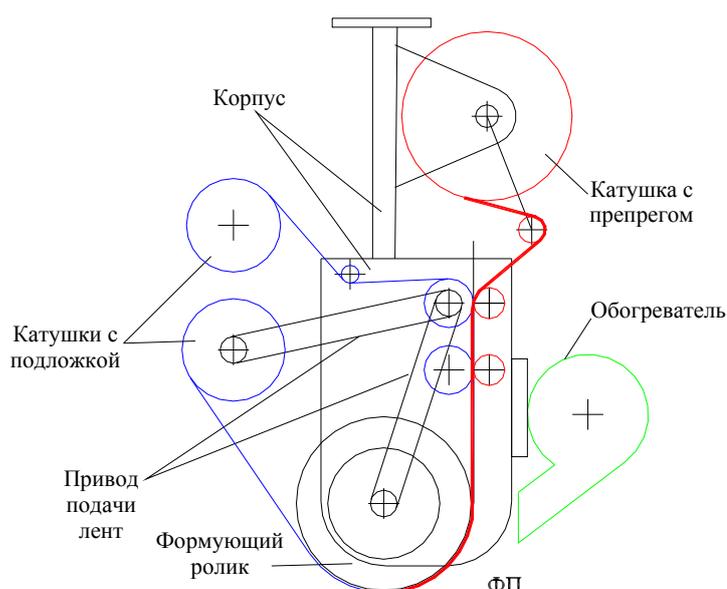


Рис.1. ФП- формообразующая поверхность.

## Автоматизированная технология формообразования

Предлагается *новая технология* автоматизированного формообразования отличается использованием *нового метода* укладки и *новых* автоматизированных *средств* его реализации.

*Новый метод* предоставляет возможность укладки лент встык и нахлест без их раскроя и отходов. Для этого он использует несвязанную ленту армирующего материала или ленту, состоящую из ее связанных компонентов. Ширина связанных компонентов ленты определяется их деформационными свойствами и дифференциальными характеристиками траектории армирования, вычисляемыми в ходе технологического проектирования процессов формообразования.

$$\varepsilon = K_g l - \frac{1}{2} K l^2 + R,$$

где  $\varepsilon$  - величина требуемой локальной посадки связанного компонента ленты;  $K_g$  и  $K$  соответственно геодезическая и гауссова кривизны траектории и поверхности укладки,  $l$  - ширина связанного компонента ленты;  $R$ - член порядка  $l^3$  - малая величина.

*Метод реализуется* автоматической исполнительной системой с программным управлением манипулированием рабочими органами, осуществляющими формирование несвязанной ленты, технологическими операциями и всеми технологическими параметрами процесса формования. Реализация заданных технологических параметров обеспечивается замкнутыми подсистемами регулирования.

Тем самым *гарантируется контролируемая и стабильная реализация* заданного качества композиционного материала и заданной схемы армирования, т.е. качество процесса формования композиционного материала.

Сменные рабочие органы позволяют *осуществить все стадии изготовления конструкции в одном гибком производственном модуле*: идентификацию геометрической формы поверхности оснастки и ее базирование в системе координат исполнительной подсистемы; ремонт поверхности оснастки; нанесение разделительного и отделочного покрытия; формование конструкции; полимеризацию композита; идентификацию поверхностей конструкции; механообработку и отделку конструкции.

*Автоматизированную подсистему технологического проектирования* процесса формообразования конструкции, построенную как приложение в открытой машиностроительной САПР поверхностного или твердотельного моделирования, *отличает* наличие модулей синтеза:

- исходной схемы армирования;
- траектории армирования;
- детализированной схемы армирования по данным, предоставляемым конструктором;

- моделей полос уложенного армирующего материала, ограничивающих поверхностей и «деталей» конструкции;
- очередности сборки конструкции из «деталей» с учетом ограниченности времени «жизни» связующего материала. В системе предусматривается выявление коллизий в планируемом процессе формообразования.

Предлагаемая *технология позволяет* автоматизировать проектирование процессов безотходного формообразования слоистых и пространственно армированных (по системе двух нитей) конструкций из ВКМ с заданными произвольными гладкими формами поверхностей и траекториями схем армирования, а также автоматически их изготавливать. Она использует дешевые исходные армирующие материалы (неподверженные промежуточной переработке) с высокими значениями их исходных характеристик.

В технологии моделирования и проектирования процессов формообразования можно выделить этапы, методы и средства:

Этапы	Методы	Средства САД систем
Построение ИСА	Задание ИСА: информация об ИСА в конечном множестве точек; направления армирования в этих точках; количество АМ; границы области; диапазон направлений армирования; толщины.	Построение поверхностей и касательных векторов к ним. Проецирование кривых на поверхность.
Синтез траекторий армирования ДСА	Моделирование траектории армирования: выбор стартовой точки траектории; построение сектора фильтра; отбор точек ИСА, включаемых в траекторию; построение и оценка траекторий. Оценка ДСА. Оценка толщины конструкции по ДСА.	Построение геодезических линий. Поиск примитивов на фрагменте поверхности. Построение интерполирующих кривых на поверхности. Вычисление геодезической кривизны кривой.
Формирование очереди выкладки «деталей», моделирования внутренней структуры и синтеза «деталей» конструкции	Определение возможности формования, критической точки на ПВ по условию времени «жизни» СМ. Получение качественного композита конструкции при низкой производительности ИС. Моделирование траектории выкладки. Моделирование полосы на ПВ. Формирование очереди выкладки полос. Расчет параметров «деталей».	Вычисление нормальной кривизны кривой, расстояния между поверхностями, длин кривых. Проецирование кривых по нормали к исходной поверхности Построение офсетных кривых на поверхности. Построение поверхностей по направляющим и ограничивающим кривым. Обрезка поверхностью.
Подготовка данных для УП	Аппроксимация траекторий выкладки кривыми, используемыми УЧПУ. Определение информации об ориентации РО в опорных точках аппроксимирующих траекторий.	Аппроксимация кривой кривыми заданного типа. Вычисление углов ориентации объектов в пространстве. Симуляция движения и обнаружения коллизий

На рис.2 приведена схема компоновки манипуляционной системы гибкого производственного модуля для малогабаритных конструкций из ВКМ.

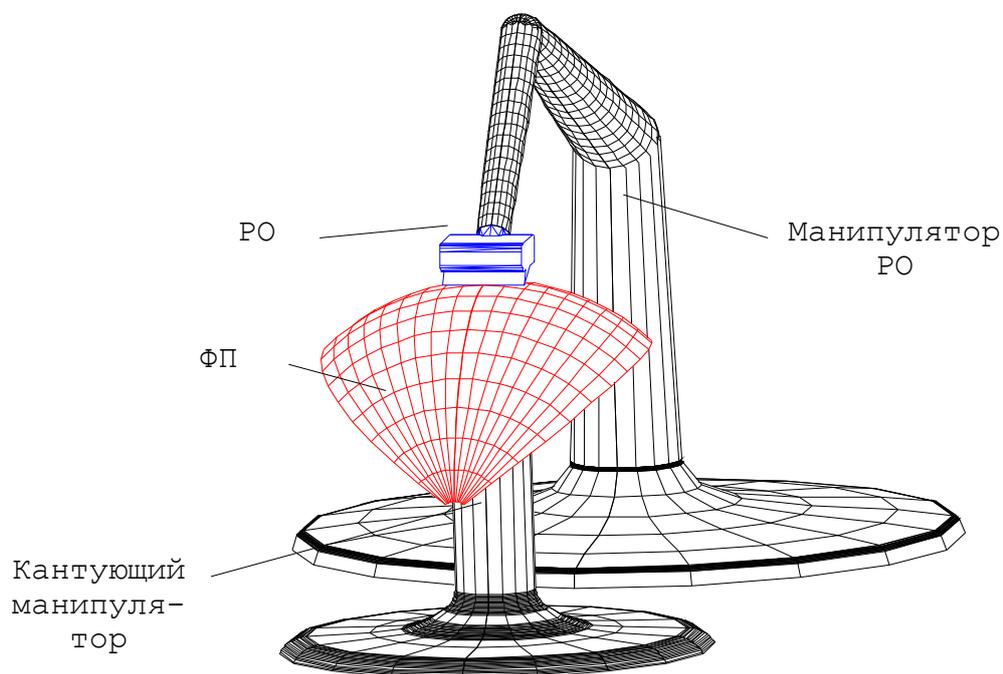


Рис.2. РО - рабочий орган.

*Предлагаемая технология пригодна для изготовления оптимальных конструкций, является новой и перспективной.*

### **Состояние проекта**

Решены все принципиальные вопросы создания технологии автоматизированного формообразования конструкций из волокнистых реактопластов.

Доказана возможность построения технологической системы с применением современных методов и средств автоматизации технологических процессов и производств.

Реализован гибкий модуль для изготовления масштабных образцов носовых обтекателей гидроакустических станций подводных лодок (рис.3). Изготовлены конструкции типа незамкнутых эллипсоидов с различными схемами армирования (рис. 4,5).

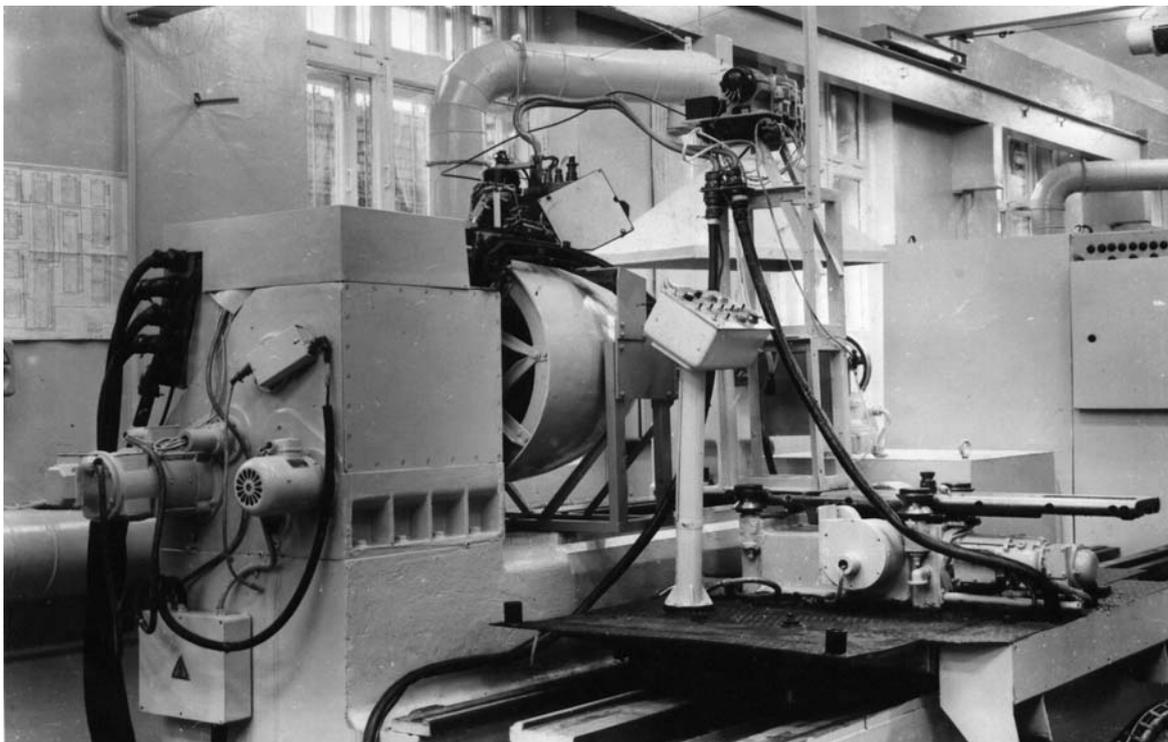


Рис.3



Рис 4

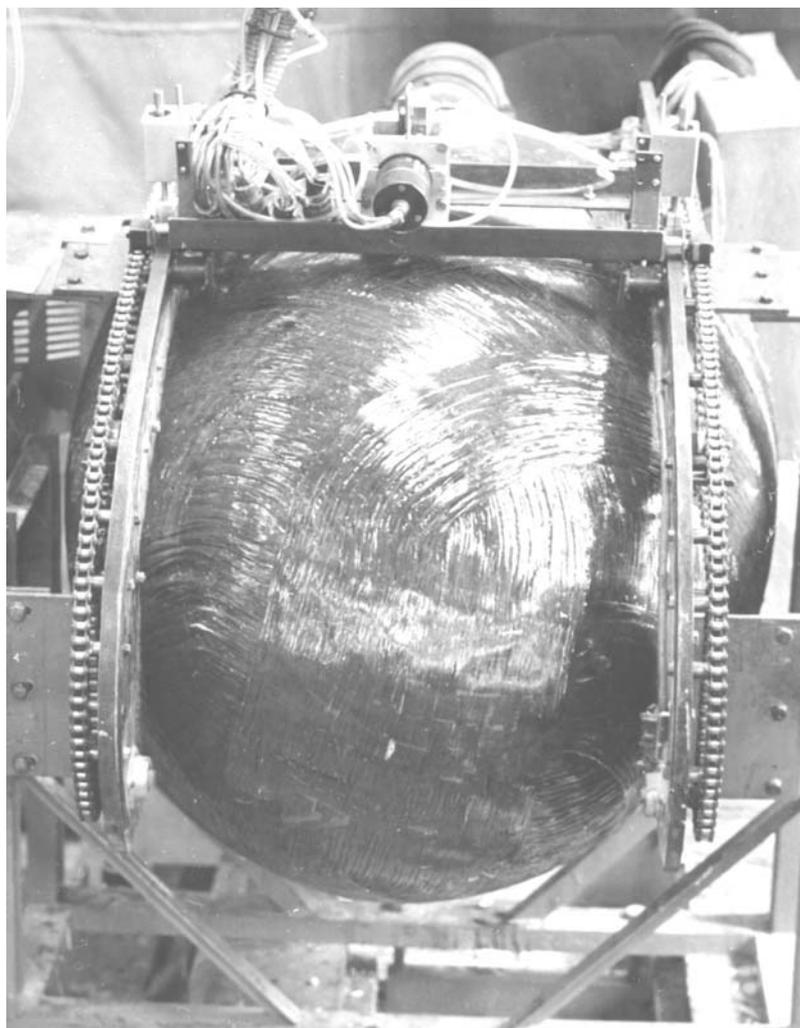


Рис.5.

*В процессе создания находится коммерческая технологическая система для изготовления конкретной номенклатуры перспективных конструкций из ВКМ с использованием предлагаемой автоматизированной технологии.*

В настоящий момент для разработчика наибольший интерес представляют потребности потенциальных заказчиков по типам и классам изделий, требования к конструкции, физическим и механическим параметрам изделий – а также массогабаритным характеристикам.

В этой связи необходимо сотрудничество с потенциальными заказчиками для полного описания свойств необходимых им перспективных изделий и конструкций.