

## БЕЗАВТОКЛАВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

30 years ago autoclave curing and hot press molding technologies took the leading place in the composites production for aerospace industry. During last 20 years there were developed high technological fibers that led to appearance of reinforcement materials of totally different structures and significantly simplified the technology of preform assembling. There were generated low viscous resins, created light fillers and what was most important there were learnt and adjusted the technologies of vacuum infusion, RTM, Light-RTM, SCRIMP and VARTM. Before such methods were used cautiously but later they became widely used in the aircraft industry. The definition "nonautoclave technologies" appeared from here – effective low-cost molding methods of structural materials.

### Определение

До конца 80-х годов прошлого века технологии автоклавного отверждения и горячего прессования препрегов (предварительно пропитанных термореактивной смолой слоистых материалов) занимали основное место в производстве композитов для изделий аэрокосмической промышленности и других ответственных приложений. Оболочки, изготовленные методами контактного или вакуумного формования, не отвечали жёстким требованиям к прочности и массе деталей летательных аппаратов, а методы трансферного формования в то время только начинали стремительный прогресс [1].

Напомним вкратце основные признаки традиционной технологии получения углепластиковых деталей летательных аппаратов:

Наполнителем являются высокопрочные или высокомодульные волокна. Эти волокна должны быть ориентированы (расчитаны, раскроены и уложены) строго определённым образом – вдоль направления основных усилий, действующих на деталь. Применяются, как правило, однонаправленные ленты или жгуты. Ткани применяются реже, так как их прочность оказывается ниже. Объёмное содержание наполнителя в композите высоко (около 60%).

Связующая смола также должна иметь высокие прочностные характеристики. Из реактопластов в ос-

новном применяются эпоксидные связующие горячего отверждения.

Готовые детали должны иметь низкую пористость (не более 2%) [2].

Поскольку работать с сухими однородными лентами чрезвычайно сложно, а эпоксидные связующие имеют большую вязкость, затрудняющую процесс пропитки, был разработан особый класс материалов – препреги. Препреги изготавливают на специальном оборудовании: пропитывают ленты растворами или расплавами смол, а затем подсушивают до степени остаточной липкости. Препреги легко раскраиваются на отдельные слои и прекрасно слипаются вместе, образуя пресс-пакет и не требуя дополнительных операций по совместной фиксации. Смола в препреже присутствует в строго определённом количестве, она равномерно распределена и дополнительная пропитка не требуется. Этим обеспечивается такое важное требование к конструкционным пластикам, как воспроизводимость свойств отверждённого композита.

Для получения высокого содержания наполнителя и обеспечения низкой пористости материал формуют под действием внешнего давления не менее 5-7 бар. Пакет слоёв препрежа часто при этом вакуумируется.

Отверждение связующего происходит при температурах от 80 до 175°C и занимает длительное время.

Выполнение данных требований вынуждает технологов применять сложное громоздкое и дорогостоящее оборудование – пропиточные машины для получения препрежа, автоклавы или гидравлические прессы с обогреваемыми плитами.

Однако за прошедшие два десятилетия были разработаны новые более высокопрочные волокна, что одновременно с развитием текстильных технологий привело к появлению армирующих материалов самой разной структуры, и таким образом позволило применять в конструкционных пластиках не только преимущественно однонаправленные ленты, но тканые материалы. Это заметно упростило технологию сборки преформ. Были синтезированы новые маловязкие смолы, созданы лёгкие наполнители, а главное – изучены и отлажены технологии вакуумной инфузии и инжекции смол в обогреваемые тяжёлые (RTM) и стеклопластиковые лёгкие (Light-RTM, SCRIMP или VARTM) формы, содержащие сухой армирующий материал (преформу). Данные методы вначале осторожно, а затем всё шире

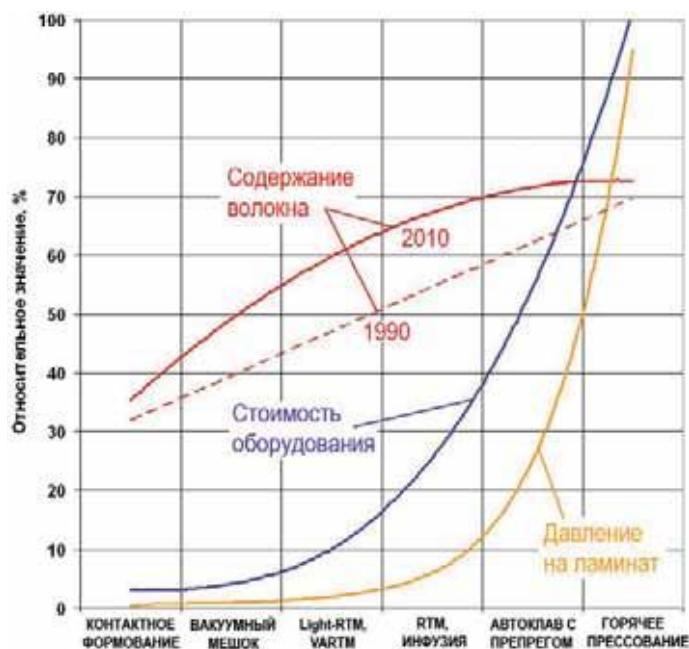


Рисунок 1



начали применяться в авиастроении [3, 4].

Именно поэтому возник термин «безавтоклавные технологии», означающий эффективные низкозатратные методы формования конструкционных композитов, альтернативные автоклавированию термореактивных препрегов.

Если весьма условно изобразить на графике, какое содержание волокна обеспечивают современные технологии, станет виден результат деятельности поколения учёных и инженеров: трансферное формование с пропиткой под вакуумом позволяет выпускать композиты, по механическим свойствам не уступающие материалам, изготовленным из препрегов методом горячего прессования (Рис. 1). При этом характерная величина давления в форме оказывается на порядок ниже давления в автоклаве и на два порядка – давления под гидравлическим прессом. Соответственно, стоимость технологического оборудования и оснастки радикально снижается, энергозатраты и себестоимость изделий заметно сокращаются, а производительность и безопасность труда – возрастают. Безавтоклавные методы формования динамично развиваются и находят всё более широкое применения при изготовлении ответственных деталей в разных отраслях промышленности.

Покажем это на примерах зарубежных компаний и на опыте российской фирмы ПОЛИТЕРМО.

## ТРИ ШАГА В НЕБО

### Шаг 1: снижение давления

Первый шаг в развитии безавтоклавных технологий – это существенное снижение внешнего давления, позволяющее отказаться от массивного автоклава, главной функцией которого является создание избыточного давления прессования на слой препрега. Давление необходимо для того, чтобы выдавить излишки смолы, который обязательно содержится в препрегах, и обеспечить требуемое соотношение объёмов армирующего волокна и матрицы. Существуют препреги, не имеющие избытка связующего (с объёмным содержанием смолы порядка 35%), однако они не получили широкого распространения из-за получающейся повышенной пористости изделия.

Часто для создания усилия закрытия формы достаточно замков или болтовых соединений, расположенных на самой оснастке. Если форма имеет большие габариты, то современные материалы часто избавляют от необходимости прессовать препрег под высоким давлением. Например, фирма GMT Composites, выпускающая углепластиковые мачты для яхт, в статье с характерным названием «Миф про автоклав» [5] приводит протоколы сравнительных испытаний композита, отверждённого при высокой температуре в обычном вакуумном мешке (т.е. под давлением 1 бар), с образцами из автоклава (полученными под давлением 5 бар). Пористость материала в первом случае оказалась та-кая же, как после автоклава – порядка 0,5%. Несмотря на некоторое различие в содержании волокна (65,1% против 66,9%), механические свойства обоих ламинатов очень близки: хотя модуль упругости у образцов из автоклава на 1-3% выше, они имеют меньшую толщину и момент инерции, поэтому общая несущая способность мачт оказывается практически одинаковой.

### Шаг 2: преформы вместо препрегов

Второй шаг – отказ от применения препрегов и замена их сухим наполнителем, слои которого относительно легко сдавливаются до нужного объёма внутри оснастки. По данному пути пошли технологии трансферного формования (RTM, вакуумная инфузия и инжекция). Принцип прост: в матрицу для формования помещается сухой тканевый наполнитель, пакет подпрессовывается вакуумным мешком, гибким или жёстким пуансоном до нужных размеров. Затем в вакуумированную форму подаётся эпоксидная смола, которая пропитывает сухую ткань. Далее оснастка нагревается и связующее полимеризуется.

С появлением армирующих материалов сложной структуры, в которых волокно, ориентированное в заданных направлениях, сочетается со смолопроводящим слоем и лёгкой сэндвичевой прослойкой, изготовление преформы нередко сводится к подбору подходящего материала и раскрою заготовки. В случае безавтоклавных технологий, где жёсткие требования к изделиям диктуют расположение каждого волокна армирующего материала, на выручку пришли многокоординатные ткацкие станки, машины объёмного плетения, машины для выкладки и комплексы автоматизированного раскроя – все с компьютерным управлением (кстати, на данное оборудование распространяются особые экспортные ограничения).

В статье [6] рассказывается, как применение сравнительно недорогой технологии трёхкоординатного плетения в сочетании RTM позволило фирме Fiber Innovations наладить выпуск элементов каркаса самолёта – углепластиковых стрингеров, лонжеронов и шпангоутов. Технология, разработанная по программе NASA, нашла применение в самолётах Boeing. Используются алюминиевые формы и оправки, а там, где требования к стабильности размеров длинных композитных профилей являются особо жёсткими – оснастка из инвара [6,7]. Плетёная заготовка на оправке помещается форму, которая вакуумируется и нагревается до 120-140°C. Смола смешивается с отвердителем, дегазируется и нагревается до 80-90°C (подогрев смолы позволил снизить пористость до 0,5%), после чего инжектируется в форму под давлением 3-6 бар. Отверждение выполняется в два этапа: 30 минут при 150°C и 90 минут при 180°C. Затем форма охлаждается, деталь извлекается и в свободном состоянии выдерживается два часа при температуре 180°C. Снижение веса рёбер жёсткости фюзеляжа достигает десятков процентов относительно металлических, а себестоимость (которая составила порядка \$50/кг без учёта отходов) сокращается на 20-25%.

Ныне фирма Fiber Innovations выпускает способами RTM и вакуумной инжекции (VARTM) самые различные изделия для самолётов и космических аппаратов, включая торOIDальные резервуары и компрессорные лопатки – и везде применяются преформы оптимальной структуры (Рис. 2).

Более того, заливка под вакуумом позволила Fiber Innovations освоить выпуск корпуса ракеты «воздух-земля» длиной 4,3 м – изделия, которое считалось прерогативой метода намотки композитов. Необычное трапецидальное сечение фюзеляжа потребовало новых решений. Корпус собирается из трёх отдельных деталей, но преформа делается цельной. Её изготовление начинается с плетения внутренней оболочки и соз-



Рисунок 3



Рисунок 4

даётся сетчатая структура максимальной плотности. Поверх укладывается хорошо драпируемая мультинаправленная прошиватая ткань. С помощью извлекаемых игл крепятся элементы сердечника, изготовленные на станке с ЧПУ из плотного пористого материала, и вся конструкция повторно оплетается волокном. Затем готовая преформа прорезается, внешний плетёный слой с носовой и кормовой частей снимается и натягивается на отдельные оправки, основная же преформа остаётся на месте. Детали накрываются вакуумными мешками, и материал заполняется эпоксидной смолой, специально разработанной для VARTM. Отвердение выполняется при температуре 100°C, а постотверждение – при 150°C [8].

Разумеется, методы изготовления преформ для RTM не ограничиваются плетением. Широко применяется шитьё (Рис. 3) – как двухкоординатное (в основном для матов), так и трёхкоординатное (для деталей сложной формы) [9], различные ткацкие технологии, вязание, ручная или автоматизированная послойная выкладка [1] к двухкоординатная (в основном для матов), так и трёхкоординатная (для деталей сложной формы). Структура преформы определяется не только конструкцией изделия, но и применяемой технологической оснасткой, способом подачи связующего и схемой отверждения.

Необходимо заметить также, что процесс раскроя сухой ткани вручную, а также сборка выкроенных заготовок в преформу является непростой задачей. Сухая ткань, в отличие от препрегов, рассыпается по краям реза, образует баҳому и к тому же лишена начальной липкости. На выручку пришли специально разработанные спрей-клей (например, фирмы 3М), которые распыляются тонким слоем по поверхности сухой ткани (без проникновения внутрь), придают ей необходимую технологическую липкость и фиксиру-

ют волокна по краям реза. Это позволяет использовать накопленный опыт по раскрою препрегов и переносить его на работу с сухими наполнителями.

Именно благодаря трансферным технологиям углепластики всё шире применяются в крупносерийном автомобилестроении, где малопроизводительное автоклавирование не годится. Например, японская компания Toray Industries, выпускающая углеродные материалы, разработала технологию, сочетающую RTM с ускоренной пропиткой и отверждением и сокращающую цикл изготовления углепластиковых автомобильных деталей со 160 до 10 минут. При этом углепластиковые детали на 50% легче стальных и в полтора раза безопасней при столкновении [10].

А в самолётостроении RTM сегодня используют такие фирмы, как Lockheed Martin, GKN Aerospace, Northrop Grumman, Cytec Engineered Materials и множество других (в том числе российских), причём иногда инжекция сочетается с применением препрегов или находятся иные решения, однако общим является отказ от дорогостоящего автоклавирования в пользу более экономичных технологий [8-11].

Конкуренция препрого-автоклавному процессу со стороны RTM сегодня быстро возрастает, поскольку обе технологии предназначены для изделий одного

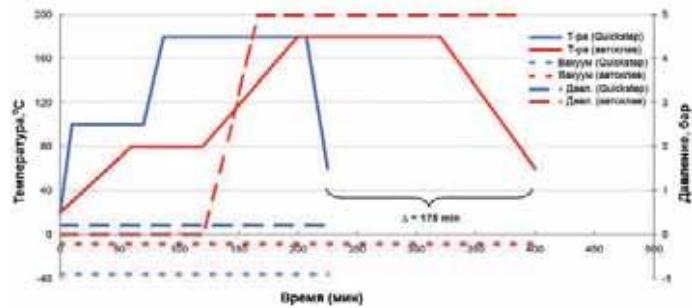


Рисунок 5

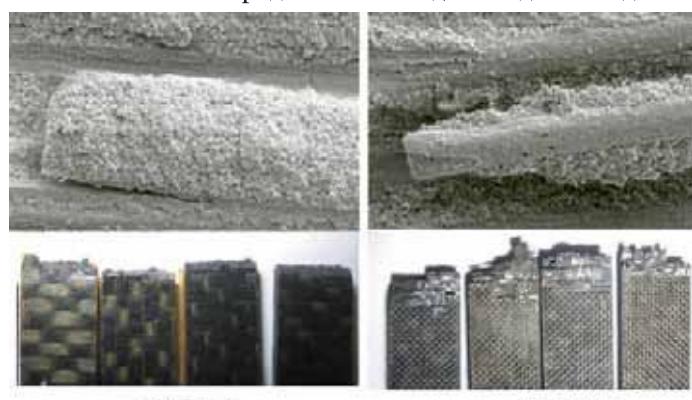


Рисунок 6



Рисунок 7

рода. Вакуумная пропитка, изначально нацеленная на удешевление производства корпусных оболочек, ныне всё шире применяется для ответственных конструкций, имеющих строгие требования к прочности, массе и точности размеров и изготовленных из композитов на основе эпоксидных связующих и высокомодульных углеродных, стеклянных или органических волокон.

Однако трансферное формование нельзя рассматривать как единственную универсальную технологию в мире композитов. Будущее – за сочетанием различных методов, оптимальных для каждого случая.

### **Шаг 3: маловязкие смолы и точный контроль температуры**

Помимо отказа от применения препрегов, существует иной путь снизить давление прессования. Он заключается в применении смол с пониженной вязкостью и прессовании при повышенных температурах, когда нагретая смола имеет наименьшую вязкость.

В этом случае особую значимость приобретают методы гибкого регулирования и точного контроля температуры. Встаёт необходимость в равномерном и быстром прогреве пресс-пакета с целью уменьшения вязкости смолы, обеспечив контролем процесса полимеризации. В этом смысле интересен и полезен опыт фирмы Quickstep.

Как известно, в автоклаве температура детали меняется по заданному графику, причём в качестве теплоносителя применяется окружающий форму горячий сжатый газ. Австралийская фирма Quickstep предложила революционное решение и запатентовала безавтоклавный процесс, в котором термостатированный сосуд высокого давления заменён лёгким двусторочным коробом, а теплоносителем является жидкий глицерин, заключённый в эластичные баллоны при постоянном небольшом давлении (до 0,3 бар). Технология позволяет использовать как препреги, так и заполнять смолой сухой материал по методу инфузии или RTM. Площадь детали в первом случае может достигать десятков квадратных метров (Рис. 4).

Высокая теплопроводность и теплоёмкость жидкости, хранящейся в отдельных резервуарах разной температуры, позволяет быстро и точно регулировать ход отверждения, остановить его в нужный момент, чтобы добавить компонент для соединения с оболочкой, а затем продолжить процесс. Таким образом создаются детали сложной формы, не имеющие kleевых швов. Это позволяет, например, собрать прямо в форме крыло самолёта с лонжеронами. Применение в

оснастке нескольких баллонов с гликолем обеспечивает разную степень отверждения участков изделия, что делает технологию ещё более гибкой. Сравнительно с автоклавированием время цикла изготовления сокращается почти вдвое, а энергозатраты снижаются на 70–90% [12].

Работа [13] посвящена возможностям применения технологии Quickstep в аэрокосмической отрасли. На Рис. 5 представлены режимы получения образцов для сравнительных испытаний. Были изготовлены как сплошные углепластиковые пластины, так и сотовые сэндвич-панели. При практически одинаковой достигнутой степени отверждения и температуре стеклования образцов автоклавирование потребовало около 400 минут, а процесс Quickstep – всего 240 минут.

Прочность на разрыв ламината, изготовленного по методу Quickstep, оказалась всего на 1% ниже, зато сопротивление межслоевому сдвигу – на 12,5% выше, чем у автоклавированного композита. Характер разрушения показал, что образцы из автоклава являются более хрупкими (Рис. 6). Полученные результаты объясняются тем, что вследствие более быстрого и равномерного прогрева препрега смачивание волокна улучшается и, следовательно, возрастает его адгезия к связующему. Авторы [13] видят большой потенциал Quickstep как новой экономичной, высокопродуктивной и энергосберегающей технологии для аэрокосмической промышленности.

Фирма Quickstep разрабатывала безавтоклавную технологию с целью выпуска деталей автомобилей – таких, например, как итальянская спортивная Zonda [14]. Оказалось, что процесс не только экономически выигрывает у автоклава, но и обеспечивает превосходный внешний вид деталей. Компьютерное управление расходом теплоносителя позволяет оптимизировать ход отверждения и предотвратить перегрев детали на экзотермическом пике, что вкупе с равномерным нагрузением лёгкой матрицы гидростатическим давлением гарантирует отличный глянец поверхности без проявления фактуры армирующего материала (Рис. 7).

В исследованиях фирмы-разработчика выполнено сравнение экономических показателей нового и традиционного процессов [14,15]. На примере изготовления углепластикового капота выполнен анализ денежных и временных затрат на каждом этапе технологического процесса – от раскрытия преформы до упаковки изделия, а также сравнение капитальных вложений в оборудование и расхода энергии. Показано, что

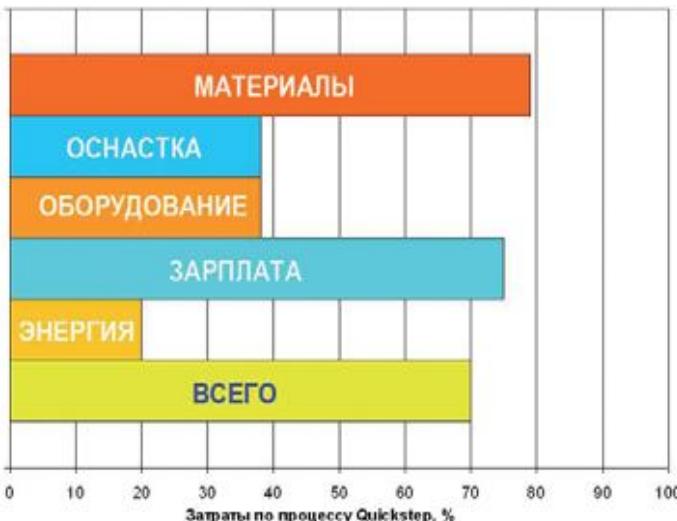


Рисунок 8

при выпуске 40 тысяч капотов за 4 года себестоимость изделий, изготовленных по технологии Quickstep, по всем показателям оказывается существенно ниже, чем при автоклавировании. Результаты из таблицы [15] более наглядно можно представить в виде диаграммы, столбцы которой показывают процентное значение суммарных затрат при переходе на безавтоклавный процесс Quickstep, если затраты на традиционный процесс принять за 100% (Рис. 8).

Безавтоклавные технологии, обеспечивающие высокую точность размеров, успешно применяются для производства аэродинамических поверхностей. Автоклавирование крыла или панели обшивки фюзеляжа – весьма дорогостоящая операция, поэтому такие фирмы, как The New Piper Aircraft [8] или Cytec Engineered Materials [16] используют вакуумное прессование препрого, отверждаемых при температуре 100–130°C в обычной покрасочной камере. Специально разработанные маловязкие эпоксидные смолы позволяют добиться содержания волокна в углепластике порядка 60–65% и таких же механических характеристик композита, как при автоклавировании [16]. Замена автоклава печью особенно заметно снижает стоимость изготовления крупногабаритных изделий, такими являются элементы планера самолёта.

Упомянутая фирма Cytec Engineered Materials использует оригинальную разработку, основанную на уменьшении вязкости связующего. Известно, что отверждённые эпоксидные смолы в чистом виде являются довольно хрупкими. Для придания изделию свойства ударной вязкости в смолу вводят небольшое количество (всего несколько процентов) термопласта. Однако эта модифицирующая добавка заметно повышает вязкость полученной композиции и тем самым процесс пропитки наполнителя затрудняется, что влечёт за собой необходимость увеличения давления прессования.

Чтобы избежать автоклавирования, фирма Cytec предложила изобретение, запатентованное под названием PRIFORM: углекань, в которую заранее вплетены волокна модификатора прочности, растворяющегося в смоле при пропитке (Рис. 9). Модификатор, повышающий стойкость композита к излому и удару, равномерно распределяется в связующем. Пропитка осуществляется особой маловязкой смолой, обладающей высокой адгезией. Поскольку модификатор вво-

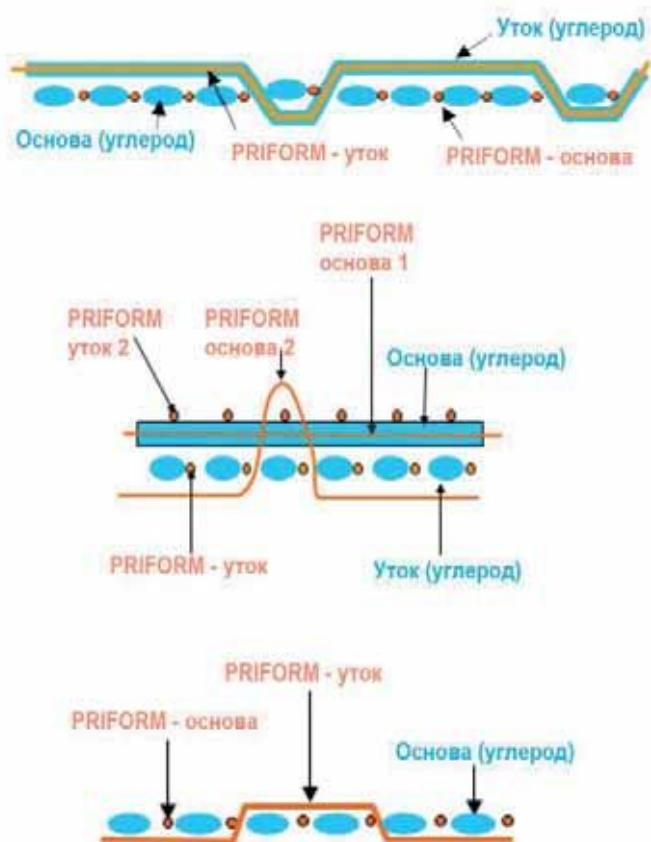


Рисунок 9

дится «на месте», вязкость смолы в процессе заполнения остаётся стабильно низкой, что обеспечивает возможность изготовления методом инфузии крупногабаритных изделий с автоклавным качеством.

Сегодня углеродные и стеклянные волокна в преформах и мульти направленных тканях прошаиваются полиэфирной нитью, которая вследствие способности сорбировать влагу является источником возможных нарушений структуры композита, концентрации напряжений и потенциальных дефектов. Прошивка PRIFORM растворяется в смоле и вместе с ней исчезает данная проблема. По механическим свойствам новый материал не уступает прессованным препарам, может эксплуатироваться в самых тяжёлых условиях и применяться для несущих конструкций самолётов, хотя и для других приложений перспективы открываются широчайшие.

### Комбинированные методы

Появляются разнообразные модификации трансферных методов, объединяющие различные способы формования и позволяющие изготавливать высокоплотные ламинаты и цельные крупногабаритные сложные конструкции.

В простейшем случае термостатированный автоклав заменяется обычным сосудом под давлением – такая технология известна под названием ComPRIS (инфузия под давлением) [17]. Отверждение выполняется при комнатной температуре, но повышение окружающего давления в 5–10 раз сравнительно с VARTM позволяет заметно увеличить плотность ламината и формовать толстые слоистые пластики. Метод удачно позволяет сочетать стеклопластик с деталями из бетона или дерева, которые выполняют при прессовании

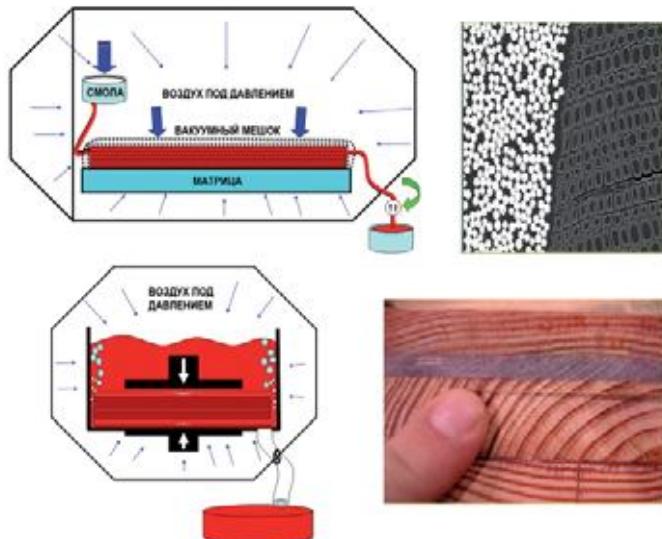


Рисунок 10

роль пористой матрицы, поглощающей вытесненный из ламината воздух (Рис. 10). Поэтому ComPRIS применяется, например, для производства роликовых досок. Однако заманчивей вообще обойтись без сосуда со сжатым воздухом, ограничиваясь атмосферным давлением, либо прессуя ламинат иным способом.

Например, фирмой V System Composites запатентован процесс HyPerVARTM [8,18]. В данном методе подача смолы осуществляется в одну точку, а система её распределения встроена в оснастку. Это избавляет от необходимости иметь смолопроводящий слой, существенно сокращает отходы и уменьшает долю ручного труда, что выражается в снижении себестоимости. Возможность выборочного регулирования расхода обеспечивает оптимальное содержание связующего в каждой части сложной конструкции. Технология успешно применяется в производстве корпусных деталей вертолётов и самолётов; с её помощью была изготовлена углепластиковая параболическая антенна для NASA. Фирма намерена на этом же принципе внедрить метод HyPerRTM, который позволит получать детали с качеством классического RTM по цене HyPerVARTM, и к тому же при необходимости содержащие металлические вставки [18].

По другому пути пошла фирма Radius Engineering, предложив технологию, именуемую SQRTM (по смыслу – «RTM автоклавного качества»). Здесь, как и в автоклаве, используются термореактивные препреги, но давление на ламинат создаётся не сжатым воздухом или азотом, а жидкой смолой, инжектируемой подобно методу RTM в закрытую обогреваемую форму. Поскольку форма плотно заполнена препрегом, расход смолы, создающей гидростатическое давление, оказывается весьма невелик: она даже не проникает в материал и не создаёт зоны с повышенным содержанием связующего [8]. А раз расход мал – не требуются насосы, и для подачи вспомогательной смолы используется пневматический цилиндр с давлением инъекции до 27 бар, схематически показанный в фирменном буклете (Рис. 11). Технология применяется в перспективных разработках BBC США.

Очевидно, что такая технология не позволит добиться высокой степени армирования материала при использовании обычных препрегов, имеющих избыточное количество смолы. Однако она может быть



Рисунок 11

успешной при использовании препрегов с пониженным содержанием связующего (см. выше). Пористость изделий в этом случае явно не будет выше нормы и деталь будет иметь высокую прочность. А давление, необходимое для смыкания пресс-формы, окажется ниже, чем при использовании обычных препрегов.

К комбинированным методам формования относится и термокомпрессионный, в котором сжатие препрега или преформы выполняется за счёт увеличения размеров нагреваемых элементов оснастки, изготовленных из материала с высоким коэффициентом теплового расширения – алюминия, бронзы, силиконового каучука. Данный метод позволяет прессовать изделия сложной формы, когда применение обычного вакуумного формования оказывается трудным или неэффективным. Детали, изготовленные по данной технологии, применяются не только в стратегическом бомбардировщике B-1, но и во многих японских автомобилях.

Оригинальные разработки имеют и российские учёные. Так, Национальный институт авиационных технологий разработал и запатентовал универсальный автоматизированный комплекс для безавтоклавного формования оболочковых композиционных конструкций в электромагнитном поле сверхвысокой частоты. Суть метода: крупногабаритная деталь формуется с помощью пары смежных формующих оболочек, выполненных из полимерного композиционного материала. Усилие прессования обеспечивает система из нескольких гидроцилиндров, которые соединены в единую систему и обеспечивают равномерно распределенную нагрузку (равную давлению при автоклавном формировании) и управляются устройством с ЧПУ. Процесс нагревания осуществляется в печи СВЧ. Сжатие пакета оболочек между массивами дискретных опор создает благоприятные условия для лучшего проникновения СВЧ-поля через формующие оболочки к препрегу и его разогрева до требуемых температур, уменьшает потери тепла путем теплопередачи с контактирующей оснасткой [19].

Особый интерес представляет возможность замены термореактивных смол на термопластичные. Термопластичные композиционные материалы имеют ряд преимуществ: высокая надёжность изделий, низкий уровень остаточных напряжений, релаксирующих в



Рисунок 12

термопластичной матрице в первые часы после формования, повышенная демпфирующая способность, выдающаяся ударная вязкость ( $600\text{--}700\text{ кДж/m}^2$ ), отличные механические характеристики и высокая температура длительной эксплуатации (более  $250^\circ\text{C}$ ).

Не менее значительны и технологические преимущества: неограниченная жизнеспособность сырья и полуфабрикатов, резкое сокращение цикла формования, вследствие исключения необходимости отверждения связующего. Появляется возможность применять процессы гибки, штамповки, сварки, исправления брака, а простота утилизации отходов создаёт предпосылки для эффективного решения экологических проблем [21]. Однако вязкость термопластичных связующих остаётся крайне высокой, что затрудняет их широкое использование при традиционных схемах формования, а применение крупногабаритных пресс-форм для литья композитов под давлением по методам SRIM и RRIM оправдано лишь в массовом производстве.

Тем не менее, учёным из германского Института производственных технологий Фраунгофера удалось добиться существенного повышения скорости производства углеволоконных изделий при одновременном снижении затрат. Создан автомат, который непрерывно выкладывает на поверхность формы «бесконечную» тонкую ленту, в которой совмещены углеродные нити и плавкая смола. Аппарат совмещает ленты стык в стык, плотно прижимая их (а потом подаёт новые слои сверху), и каждый раз лазерный луч синхронно с выкладкой почти мгновенно расплавляет смолу так, что ленты свариваются, тут же и остывая. Излучение проникает сквозь верхний слой материала в точку контакта и образуются стабильные связи, обеспечивающие должную прочность всей детали.

Технология института Фраунгофера устраниет практически все шаги традиционного цикла: плетение преформы, приготовление жидкого полимера, вакуумирование и температурную полимеризацию (Рис. 12).

Сам процесс автоматической выкладки ответственных изделий на специализированных станках с ЧПУ – довольно известная практика в авиационном и космическом машиностроении. В частности, американская компания MAG производит широкую гамму станков для выкладки деталей из композиционных материалов. На этих станках ведущие предприятия отрасли выпускают корпусные детали самолётов, вертолётов, а компания General Electric делает углепластиковые лопатки вентилятора для авиационного двигателя GE90.



- пленка из смолы
- матрица
- мягкий вкладыш
- углеродный шлангот
- разделительная ткань
- стеклоткань
- жертвенная ткань
- жертвенная ткань с пленкой из смолы
- дренажный материал
- вакуумная пленка
- уплотнитель



Рисунок 13

Однако во всех случаях в качестве связующего используются термопротивные эпоксидные смолы, нуждающиеся в дальнейшей обработке. Применение же препретов на основе термопластичных смол позволило полностью отказаться не только от автоклава, но и вообще от процесса прессования и получать готовую деталь непосредственно на станке для выкладки.

#### Чем крупней – тем выгодней

Но почему для изделий большой площади вместо препретов не применить более дешёвую инжекцию, которая превосходно себя зарекомендовала в судостроении? Дело в том, что трансферные процессы подчиняются закону Дарси: скорость заполнения при заданном напоре обратно пропорциональна вязкости смолы и пути фильтрации. В неустановившемся процессе заливки формы длина смоченного участка непрерывно возрастает, скорость фронта смолы линейно уменьшается, и с увеличением размера детали вдвое время пропитки возрастает в четыре раза! А поскольку вязкость эпоксидных смол бывает на порядки выше, чем полиэфирных, и к тому же в безавтоклавных технологиях применяется более плотное армирование с низкой проницаемостью, то время заполнения стремительно выходит за допустимые пределы.

Увеличение давления подачи влечёт за собой непомерное удорожание оборудования и оснастки, а главное – не решает проблему, т.к. высокое гидравлическое сопротивление плотного материала приводит к сдвигу и деформации преформы нагнетаемой смолой. Поэтому при изготовлении крупных деталей применяют специальные маловязкие смолы и технику инфузии. Если при автоклавировании избыток смолы из препрета поступает в «жертвенный» дренажный материал, то при инфузии – наоборот: смола распределяется через специальную сетку по поверхности будущей детали с минимальным гидравлическим сопротивлением, заполняет всю площадь изделия и сквозь разделительную ткань проникает в поры находящегося под вакуумом армирующего материала. Радикальное увеличение живого сечения и сокращение пути фильтрационного течения (фактически всего лишь до толщины самой детали) сравнительно с RTM позволяет заполнять преформы любых габаритов, однако появляется и очевидный недостаток – дополнительные

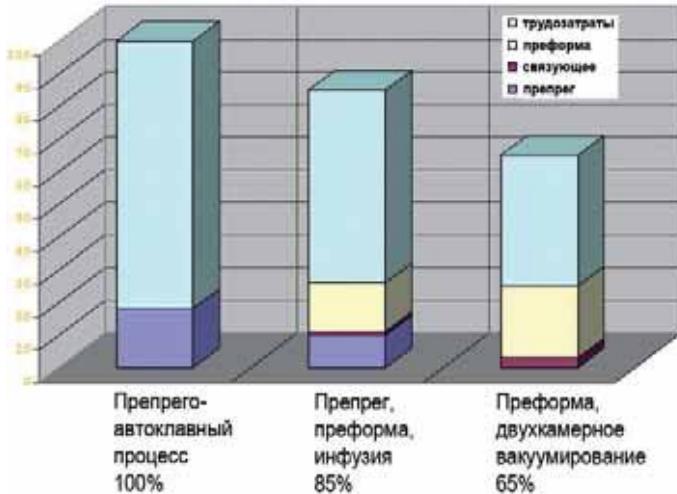


Рисунок 14

затраты смолы и вспомогательных материалов. Инфузионной технологии посвящён специальный выпуск «Композитного мира» [20].

Эффективное решение было найдено при разработке истребителя Eurofighter Typhoon, центральная часть фюзеляжа которого изготавливается в автоклаве из препрэга на основе волокна IM7 и смолы Hexcel/Herkules 8552. В безавтоклавной технологии требовалось сохранить применяемые материалы, поэтому преформы шпангоутов были сделаны из того же волокна, что и препрэг обшивки. Указанная смола может выпускаться в виде пленки, что предоставило удачную возможность пропитать шпангоуты и объединить их с обшивкой за одну операцию (Рис. 13).

Собранная преформа оребрённой панели фюзеляжа вакуумируется и нагревается в печи. Смоляная пленка, уложенная вдоль шпангоутов, расплавляется и заполняет армирующий материал. Затем температура повышается и выполняется совместное отверждение препрэга обшивки и шпангоутов, после чего осуществляется постотверждение. Повышенное давление не требуется - весь процесс происходит под вакуумом, а автоклавное качество достигается благодаря укладке материалов, образующих две вакуумные полости. Первая, где расплавленная смола заполняет капилляры материала – это сам шпангоут. Вторая, через которую осуществляется вакуумирование, отделена от первой полупроницаемой мембраной, пропускающей газы, но задерживающей смолу. Благодаря этому удается сформировать плотный композит с низкой пористостью, причём вероятность брака ниже, чем при автоклавировании, поскольку температура контролируется более точно, а капиллярная инфильтрация смолы – это саморегулирующийся процесс [9]. Предложенный метод RFI оказался существенно экономичней традиционного (Рис. 14), поэтому он популярен не только в Европе – фирма McDonnell Douglas также активно развивает и применяет данную технологию [3].

### Безавтоклавные углепластики ПОЛИТЕРМО

Инжиниринговая фирма ПОЛИТЕРМО одной из первых в России начала осваивать современные трансферные методы производства композитов, сочетающие их со сквозной цифровой технологией изготовления крупногабаритной оснастки. Перерабатывая преимущественно полиэфирные смолы и гелькоаты, сотрудничая с ведущими институтами и предприяти-



Рисунок 15

ями различных отраслей промышленности, фирма второе десятилетие успешно применяет Light-RTM и VARTM для выпуска сантехнического оборудования, строительства катеров и яхт, изготовления обшивки автомобилей и автобусов, локомотивов, вагонов метро и монорельса, для архитектурных сооружений и объектов энергетики (Рис. 15). На практике изучены разнообразнейшие связующие, армирующие материалы, наполнители и аддитивы, найдены оригинальные конструкторские решения и оптимальные технологические приёмы. Фирма охотно делится опытом, передаёт технологии, проектирует и сдаёт под ключ участки и цеха по производству композитов. Исследуются и перспективные направления – например, на Первой национальной конференции Российской ассоциации ветроиндустрии фирма представила обзор современных методов производства лопастей мощных ветрогенераторов.

Поэтому естественным стал следующий шаг – освоение безавтоклавных комбинированных технологий на основе RTM с целью производства углепластиковых деталей самолётов и авиационных двигателей.

Работы в данном направлении ведутся в сотрудничестве с такими известными научными организациями, как ЦИАМ и ЦАГИ. Отрабатываются процессы вакуумного прессования углепластиковых препрэгов (например, для изготовления «лемнискаты» – воздушозаборника реактивного двигателя) и инжекции в сочетании с термокомпрессией (для изготовления воздушных винтов и лопаток турбовентиляторного двигателя). Здесь применяется только отечественное сырьё, и поэтому выбор материалов, наиболее подходящих для разных изделий и методов, представляет весьма нетривиальную задачу.

Однако её решение сулит многое. Например, замена титановых лопаток вентилятора ТРДД на углепластиковые обеспечит:

- снижение массы лопатки и массы роторного узла на 40–45%;
- оптимальное решение проблемы локализации разрушений при обрыве лопатки из углепластика;
- повышение долговечности и надежности деталей до 20%;
- снижение уровня шума, возбуждаемого колебаниями лопатки до 10%;
- повышение экономичности двигателя на 4–8%;
- снижение стоимости обслуживания в 2 раза;

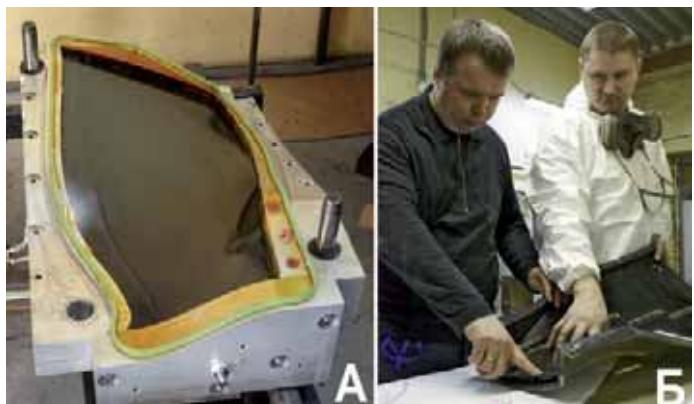


Рисунок 16

- снижение стоимости изготовления на 20% по сравнению со стоимостью изготовления сплошной и на 30–45% – полой титановой лопатки.

На первом этапе целью совместных работ ПОЛИТЕРМО и ЦИАМ являлась отладка безавтоклавной технологии и получение полноразмерных образцов лопаток для прочностных, вибрационных и ресурсных испытаний. Необходимость изготовления полноразмерных образцов диктуется не только задачами оптимизации технологии, но и «масштабным фактором»: механические свойства готового изделия сложной формы и размеров несколько отличаются от прочностных характеристик материала, полученных в лабораторных условиях на плоских образцах.

С этой целью потребовалось изготовить пресс-форму из высокопрочного алюминиевого сплава и наладить систему поддержания и контроля её температуры (Рис. 16, а). Широкохордная лопатка имеет сложный аэродинамический профиль, поэтому раскрой слоёв преформы выполнялся по компьютерной модели, анализ которой сразу показал необходимость отдельно формовать сердечник хвостовика лопатки, для чего также была изготовлена обогреваемая пресс-форма. Ориентация одноправленной и мультинаправленной ткани в каждом слое определялась конструкторами из условий обеспечения заданной прочности. Выкладка преформы – задача весьма ответственная. На первом этапе она выполнялась по разметке вручную (Рис. 16, б), но уже на этапе опытно промышленной серии планируется осуществлять выкладку слоёв по собственной оригинальной технологии, разработанной ЦИАМ и ПОЛИТЕРМО. Технология обеспечивает не только относительную простоту процесса, но и гарантирует высокую взаимную точность расположения слоёв при сборке пакета. В данный момент технология находится на стадии патентования. Технология успешно опробована и внедрена при изготовлении серии модельных малоразмерных лопаток вентилятора из углепластика и хорошо зарекомендовала себя.

Был разработан и отложен комбинированный многостадийный процесс, сочетающий РТМ и горячее прессование. Материал, уложенный в форму вместе с ранее изготовленным по тому же методу сердечником, предварительно сжимался, вакуумировался и нагревался до температуры инжекции. Горячая дегазированная эпоксидная смола подавалась под давлением до 6 бар; процесс заполнения контролировался по картине течения в выпорах. Затем каналы выпоров перекрывались, давление на ламинат дополнительно повышалось, и по заданному алгоритму выполнялся



Рисунок 17

цикл отверждения с последующим постотверждением. В ходе многофакторного эксперимента технологические параметры варьировались совместно с конструктивными, пока не были установлены надёжные корреляции между режимами процесса и свойствами композита. В результате найдено оптимальное технологическое решение и достигнуто содержание армирующего углеродного волокна в лопатке порядка 65% при минимальной пористости материала. Фотография готовой лопатки представлена на обложке этого номера журнала (публикуется по разрешению ЦИАМ).

Помимо задачи обеспечения необходимой механической прочности и ударной вязкости композита, требовалось гарантировать стабильность размеров (которые контролировались на многокоординатной измерительной машине), а также высокое качество и эрозионную стойкость аэродинамической поверхности лопатки. Особо подвержена эрозии входная кромка, которую закрывает накладка из титанового сплава мелкозернистой структуры. Остальную поверхность лопатки защищает от эрозии полиуретановый лак, превосходно себя зарекомендовавший при многолетней эксплуатации лопастей ветроагрегатов в самых тяжёлых условиях (однако в настоящее время изучаются перспективы создания эрозионно-стойкого композита с углеродными нанотрубками [22]).

Кроме выполнения данной НИОКР, фирма ПОЛИТЕРМО для выпуска углепластиков разрабатывает и применяет широкий спектр безавтоклавных технологических решений: изготавливает лопасти высокого-оборотного ветрогенератора по проекту ЦАГИ, выпускает элементы корпусов вертолётов и яхт (Рис. 17). В стратегии развития ПОЛИТЕРМО придерживается Перечня приоритетных технологий Российской Федерации и видит свою миссию в не только в освоении передового зарубежного опыта для нужд отечественной промышленности, но и во внедрении собственных наукоёмких инноваций.

Афанасьев Дмитрий Викторович – научный  
сотрудник отделения конструкционной прочности  
композиционных материалов ЦИАМ  
Ощепков Михаил Юрьевич – к.т.н., директор по  
науке инжиниринговой фирмы ПОЛИТЕРМО

## Литература

1. Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures / Ed. Teresa M. Kruckenberg, Rowan Paton. London: Cluwer Academic Publishers, 1998 – 522 p.
2. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. Кн. 2 / Под ред. Дж. Любина; Пер. с англ. А.Б. Геллера и др.; Под ред. Б.Э. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988.- 584 с.: ил.
3. Peter Morgan. Carbon Fibers and their Composites / NY: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005 – 1131 p.
4. «Композитный мир», № 4, 2006 – Специальный выпуск: «Композиты в авиастроении»
5. The Autoclave Myth // GMT Composites: <http://www.gmtcomposites.com/why/autoclave>
6. D. Stover. Braiding and RTM succeed in aircraft primary structures // High-Performance Composites, Jan. Feb. 1994.
7. Andrew Dugmore, Jed Illsley. Behind every good part is a great tool // Reinforced Plastics. March, 2009
8. Karen Mason. Autoclave Quality outside the Autoclave? // High-Performance Composites, Jan. 2006
9. J. Bauer. Increasing Productivity in Composite Manufacturing // RTO AVT Specialists' Meeting "Low Cost Composite Structures". Loen, Norway, May 2001.
10. Richard Stewart. Carbon fibre composites poised for dramatic growth // Reinforced Plastics. Apr., 2009
11. Bruce Morey. Processes Reduce Composite Costs // Manufacturing Engineering, Apr. 2007, Vol. 138, No. 4
12. Don Rosato. Out of Autoclave Composites Manufacturing Processes // Special Chem. – Jan 19, 2007.
13. M. Kaiser, C. Garschke, B. Fox, C. Weimer, K. Drechsler. Out of Autoclave Manufacture of Structural Aerospace Composite Materials // Eurocopter Deutschland GmbH etc., 2005. – 6 p.
14. H.F. Seibert, N. Noble. Cost-Effective Processing of Automotive Parts // Röhm GmbH&Co.KG, Quickstep Technologies Pty Ltd. – 11 p.
15. Dale Brosius. Economic Comparison of Autoclave and Quickstep Processes for High Volume Advanced Composite Automotive Components // Quickstep Technologies Pty. Ltd., Nov. 2004. – 14 p.
16. Paul Dvorak. A Material for Large Parts, without an Autoclave // Windpower Engineering, July 2009
17. Barry Goodell, Roberto Lopez-Anido, Benjamin Herzog. The Composites Pressure Resin Infusion System // AEWC Center, University of Maine
18. Barry Berenberg. Liquid Composite Molding Achieves Aerospace Quality // Composites World, May 2010
19. Рынкевич С.Ю., Сироткин О.С., Боголюбов В.С., Карпов А.В. Универсальный автоматизированный комплекс для безавтоклавного формования оболочковых конструкций из ПКМ в СВЧ-поле и способ его настройки // Патент РФ № 2162412
20. «Композитный мир», № 2, 2008 – Специальный выпуск: «Технология инфузии»
21. Волоконная технология переработки термопластичных композиционных материалов / Г.С.Головкин, В.А.Гончаренко, В.П. Дмитренко и др.; Под ред. Г.С. Головкина - М.: Изд-во МАИ, 1993. – 232 с.
22. Wayde Schmidt, Harry Eaton. Nanocomposite layered airfoil // United States Patent 6341747

CIM	Compression injection molding	Компрессионное формование с литьём под давлением
LTVB	Low temperature bag molding	Вакуумный мешок при комнатной температуре
RIM	Reaction injection molding	Литьё реактопластов под давлением
SRIM	Structural reaction injection molding	Литьё армированных реактопластов под давлением
RRIM	Reinforced reaction injection molding	Трансферное формование композитов
RTM	Resin transfer molding	Инжекция под малым давлением и вакуумом в лёгкие матрицы с гибким цулагом или пуансоном
LRTM	Light-RTM	Двойной RIFT: RTM с диафрагменным формированием
RIFT	Resin infusion under flexible tooling	RTM под вакуумом, патентованный метод Симанна
DRDF	Double RIFT diaphragm forming	RTM с последовательной подачей в литники
SCRIMP	Seemann composite resin infusion molding process	Вакуумная инфузия с расплавлением смоляной плёнки
SMRIM	Sequential multi port resin injection system	Вакуумная инфузия с расплавлением смоляной плёнки
SPRINT	SP resin infusion technology	Инжекция посредством вакуума
RFI	Resin film infusion	RTM под вакуумом
TERTM	Thermal expansion resin transfer molding	Вакуумная инфузия
VARI	Vacuum assisted resin injection	Варианты горячего прессования
VARTM	Vacuum assisted resin transfer molding	
VIMP	Vacuum infusion molding process	
VIP	Vacuum infusion processing	
DMC	Thermoset dough molding compound	
BMC	Thermoset bulk molding compound	
SMC	Thermoset sheet molding compound	