

Современное ПЛАСТИКОВОЕ СУДОСТРОЕНИЕ

Продолжение. Начало см. в № 217.

Как мы уже говорили ранее, вершиной развития технологий работы с термореактивными волокнистоармированными пластиками сегодня являются инфузионный и инъекционный методы формования, по сути, довольно близкие друг к другу. Одно из важнейших достоинств подобных процессов – их повышенная экологическая чистота: нет работы с открытой смолой, в силу чего практически отсутствуют вредные выбросы в атмосферу. Однако полный список преимуществ этих методов этим отнюдь не ограничивается.

Но прежде всего давайте разберемся в терминологии. До огорчения часто приходится встречать некоторую путаницу в этом вопросе (особенно в отечественных источниках), поэтому, прежде чем перейти к сути вопроса, определимся: инфузионный метод (от англ. Infusion – всасывание, вливание) означает *всасывание* смолы из емкости в вакуумированный ламинат. Инъекционный метод (Injection – впрыскивание) означает *нагнетание* смолы в ламинат под тем или иным давлением (подобная технология практически всегда требует наличия ответной части матрицы – пуансона). Еще проще: инфузия означает подачу смолы под давлением, *меньше* атмосферного, инъекция – под давлением, *больше* атмосферного. В целом, сегодня существует около полусотни процессов (в той или иной степени отличающихся друг от друга), относящихся к инфузионному и инъекционному методам (или их комбинации): все зависит от конкретной сферы применения.

Инфузионный метод формования (VIP)

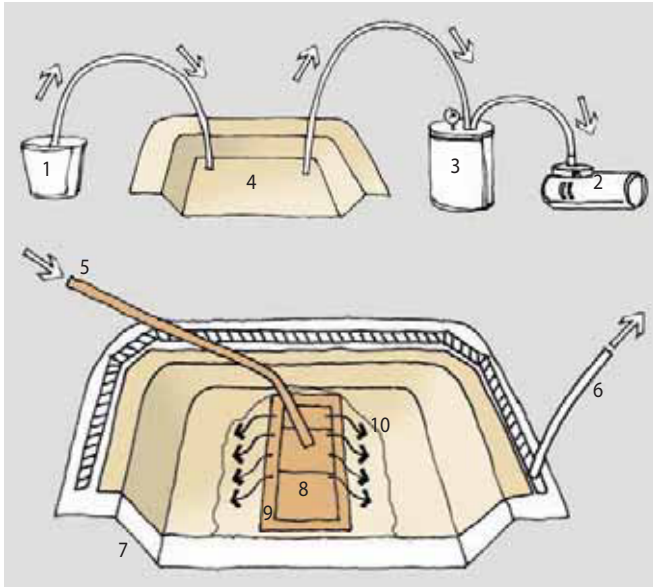
Инфузионный метод, или VIP (vacuum infusion processing, порой его еще называют RTVIP – resin transfer VIP), появился (в яхтостроении) сравнительно недавно, но его уже почти затмил «младший» брат – инъекционный способ формования. Наивно, однако, думать, что оба этих процесса взаимозаменяемы, и что инъекционное формование однозначно способно заменить инфузионное. У каждого из этих процессов есть свои сильные и слабые стороны и, как следствие, свои наиболее удачные сферы применения. Появление инфузионного способа формования стало результатом развития конструктивных синтетических материалов и появления таких необходимых для этого техпроцесса вещей, как смолы пониженной вязкости, объемные стеклоткани (представляющие собой сложные комбинированные системы из нескольких разнородно ориентированных слоев, порой состоящих из различных типов материалов: стекловолокно, кевлар, карбон), волокнистые материалы повышенного



Артур Гроховский. Фото автора

объема и массы, специальные синтетические материалы, имеющие очень высокую скорость пропитки смолой. Развитие технологий привело к тому, что все эти достижения появились (почти синхронно) в начале 90-х гг. прошлого века, которые и считаются началом применения инфузионных процессов в индустрии. Впрочем, в яхтостроении они пришли чуть позднее – на границе двух веков.

Инфузионный процесс выглядит сегодня так: из матрицы, закрытой вакуумным мешком, начинают постепенно откачивать воздух. Одновременно с этим через подающие трубки поступает смола пониженной вязкости, которая (поскольку природа не терпит пустоты) всасывается в ламинат, полностью пропитывая заранее уложенную заготовку. В этом и заключается главное достоинство инфузионного метода перед традиционным ручным с последующим вакуумным прижимом: всасывается ровно столько смолы, сколько ее готов «принять» в себя будущий ламинат (на деле – чуть больше). Еще одним важным обстоятельством является то, что слои стеклоткани прижимаются друг к другу вакуумом в сухом состоянии, что существенно снижает риск появления



Условная схема организации инфузионного процесса:
1. Емкость со смолой. 2. Вакуумная помпа. 3. Емкость для удаления излишков смолы. 4. Формуемая деталь. 5. Трубка подачи смолы. 6. Вакуумная трубка. 7. Матрица. 8. Мат-податчик. 9. Фанерная подложка. 10. Фронт распространения смолы



Для подачи высоковязкой особо прочной смолы емкости с ней располагают прямо над формуемой деталью на коротких жестких трубках (верфь «Amel»)

возможных пузырей (которые, увы, могут появиться при ручном формовании). Пузыри же, появляющиеся при ручной пропитке смолой, порой очень плохо разглаживаются даже под вакуумным прижимом. Особенно, если применяется вязкая смола, недостаточно велико усилие вакуумного прижима или монтаж вакуумного мешка был выполнен с некоторым запозданием, когда смола уже начала отверждаться. Иными словами, инфузионный процесс обеспечивает лучшее соотношение ткань-смола в готовом изделии (обычно удается получить весовую долю стеклоткани в готовом ламинате, равную 45–55%), выдавая его примерно на уровне препрегов, а также дает возможность достаточно точно прогнозировать расход смолы на формовку будущего изделия. Кроме того, VIP способен и несколько повысить качество формовки, а также механическое качество получаемых деталей (впрочем, на эту тему среди специалистов, как ни странно, единого мнения нет. В этом же номере, например, читатели могут ознакомиться с интервью президента компании «Farr Yacht Design», утверждающего, что ника-

кого выигрыша в качестве инфузионный метод не дает.) Ну и, само собой, инфузионный способ формовки обеспечивает гораздо большую чистоту производственного процесса как на рабочем месте, так и в окружающей среде, поскольку открытой смолы практически нет, все ее испарения вытягивает вакуумная система.

Можно увидеть, что подобный метод формования, по сути, похож на традиционную контактную ручную пропитку ламината смолой с последующим использованием вакуумного прижима. Разница, грубо говоря, в том, что при контактном формовании вакуумный мешок накрывает матрицу *после* пропитки ламината, а при применении инфузионного метода – *до этого* момента. Это различие и определяет существенную разницу в организации обоих процессов.

Начнем с самого начала. Большинство современных смол имеют весьма ограниченное время годности к применению – обычно не более получаса, и лишь у немногих разновидностей связующего время начала полимеризации отодвинуто на два с небольшим часа. Это вызывает определенные затруднения в применении вакуумного мешка при контактном формовании больших корпусов: персоналу попросту может не хватить времени для пропитки ламината и организации вакуумного прижима пропитанной заготовки за отведенное до начала полимеризации смолы время. Особенно если что-то вдруг пойдет не так. В этом отношении инфузионный метод гораздо менее требователен – поскольку вакуумный мешок организуется до начала процесса пропитки, можно успеть «семь раз примериться», чтобы убедиться в том, что все работает должным образом.

Есть, однако, и негативные моменты. Мы уже неоднократно подчеркивали, чем изысканнее и совершеннее технология, тем требовательнее она к квалификации персонала и организации самого техпроцесса и тем фатальнее последствия любых ее нарушений. Если в вакуумном мешке возникнут местные повреждения, и герметичность будет нарушена, то при ручном способе формования это не повлечет за собой необратимой потери качества формуемой детали. Максимум, что может произойти – некоторое возрастание массы итогового изделия из-за увеличенного количества «неотжатой» вакуумом из ламината смолы. При инфузионном формовании малейшее нарушение герметичности мгновенно приведет к всасыванию в ламинат не смолы, а окружающего воздуха и, как следствие, к появлению больших (заметно больших по площади по сравнению с размерами самого места нарушения герметичности) непрочных мест. Результат – абсолютно негодная деталь, которая может отправляться в помойку. Для поиска неплотностей в вакуумном мешке можно (при скромном бюджете) применять разнообразные стетоскопы, для серьезного промышленного производства предназначены специальные ультразвуковые детекторы, способные уловить и точно позиционировать практически неслышимые звуки, издаваемые в местах утечки.

Поэтому фирмы, производящие оборудование, предназначенное для инфузионного формования, строго рекомендуют провести несколько тестов, прежде чем приступать к собственно выпуску изделий. Впрочем, на верфи «Dufour» автору этих строк назвали несколько иной порядок временных величин: порой до полугода уходит на наладку и отпра-



Слева – фланец матрицы, предназначенной для инфузионного процесса, должен иметь большую ширину («Alliaura Marine»)

Расположение вакуумных трубок – особая головная боль технологов (на снимке – главный инженер «Sunreef Yachts»)

ботку всех технологических составляющих (важнейшим в процессе отладки специалисты этой компании считают тщательнейшее отслеживание и документирование всех этапов работы, позволяющее в дальнейшем избежать «хождения по граблям»). Позволить себе подобные расходы (особенно в случае крупных судов) могут лишь немногие верфи.

Достаточно сложным представляется и процесс выбора правильной вязкости смолы, используемой для инфузионного процесса. Большинство изготовителей рекомендуют ориентироваться на связующий материал такой вязкости, которая позволит ему поступать в матрицу со скоростью 200–400 см³/с, хотя, в принципе, допустимо использование скоростей подачи от 50–60 см³/с до 800–1000 см³/с. При этом надо отметить следующие закономерности: смола с излишне высокой вязкостью (низкой текучестью) может затруднить или даже сделать полностью невозможным заполнение матрицы со сложными формами или нормальное пропитывание ламината, имеющего в своем составе трудно пропитываемые волокна типа кевлара или угля (а также ткани повышенной толщины и плотности). При подаче же смолы с очень высокой скоростью некоторые участки ламината могут остаться непропитанными. Чаще всего в инфузионном процессе применяют маловязкие винилэфирные смолы, ставшие своеобразным стандартом для этой технологии. Полиэфирные изофталевые смолы имеют уже примерно вдвое более высокую вязкость (меньшую скорость подачи), еще выше вязкость эпоксидных связующих. Следует помнить, что, чем выше вязкость смолы и ниже скорость ее поступления, тем короче должна быть длина трубки, подающей смолу из резервуара в матрицу. Для винилэфирных смол максимальная длина трубы подачи не должна превышать 80–90 см, для остальных типов смол трубы должны быть короче. (Довольно оригинальный вариант подачи смолы в формуемую деталь автор этих строк видел на французской верфи «Amel» – резервуар для смолы, имеющий отверстие в своей нижней части, располагался прямо над внутренней поверхностью формуемой детали на короткой жесткой трубке. Проблемой при такой схеме является обеспечение герметичности вакуумного мешка вокруг трубки, зато короткий, безо всяких изгибов путь свя-

зующего к ламинату позволяет без проблем использовать высоковязкие смолы.)

Для улучшения процесса пропитки применяются специальные быстросмачиваемые материалы – своеобразные «проводники» смолы, располагаемые между слоями ткани (особенно рекомендуется располагать подобный «проводник» между слоями трудно пропитываемых тканей типа кевлара). Некоторые материалы такого типа (например, особая тонкая нейлоновая ткань «EnkaFusion») служат лишь для быстрого распространения смолы внутри ламината, другие могут выполнять и конструкционные функции: как силовые, так и обычного наполнителя. В случае применения высоковязких смол с малой скоростью подачи (например, эпоксидных композиций) рекомендуется использовать большее количество тонких «проводников» и/или больше трубок для подачи смолы. При этом, располагая стеклоткань по поверхности матрицы, нужно стараться по максимуму избегать морщин на ткани – при инфузионной методике именно в этих местах могут оказываться непроклеи. Чтобы избежать морщин при укладке материала по сложной поверхности, следует использовать (как мы уже писали ранее) специальный клей-распылитель для временной «прихватки» ткани (для лучшего визуального контроля его окрашивают в яркий цвет).

Опять же, нет никаких заранее готовых формул и методов расчета требуемой вязкости смолы (и иных важных параметров процесса), так что необходим практический их подбор. Впрочем по словам известного конструктора Германа Фрерса, интервью с которым читатели смогут прочесть в следующем номере «КиЯ», первые образцы промышленного программного обеспечения, позволяющего быстро подобрать необходимые технологические параметры, уже находятся в разработке. Возможно, в ближайшем будущем расчет всех составляющих инфузионного процесса будет вестись в визуальном режиме на экране компьютера, показывающего распространение фронта смолы, пропитывающего ламинат.

Следующий по важности фактор – подбор мощности вакуумной помпы. Здесь все обстоит более или менее просто: специалисты того же «Dufour» рекомендуют подбирать ее

Эта матрица для формования пера руля предназначена для гибридного процесса: руль формируется в закрытой матрице, но смола подается инфузионным методом. Высокие нагрузки требуют массивной матрицы, усиления в перо закладываются заранее («Amel»).



Справа – на верфях с широким использованием инфузионных процессов разводке пневмосистемы уделяется столь же большое внимание, как и электропроводке («Dufour»)



так, чтобы нужное давление разрежения создавалось под вакуумным мешком примерно через 6–8 мин после ее включения. Если требуемое разрежение создается лишь через 10 мин или более, то существует большой риск того, что всасываемая смола начнет полимеризоваться ранее, чем заполнит всю матрицу. Хотя надо отметить, что для инфузионного процесса мощность помпы имеет существенно меньшее значение, чем для ручной укладки с последующим вакуумированием – ведь помпу можно включить задолго до момента начала подачи смолы. Но это в любом случае удлинит время всего технологического цикла, что на предприятии, производящем серийную продукцию, крайне невыгодно.

Очень важно при инфузионном процессе применять для лучшего распространения смолы специальный слой-«податчик», служащий своего рода местным аккумулятором смолы при начале процесса. Это особый синтетический мат шириной порядка 10–12 см, укладываемый вдоль продольной оси формуемого изделия. Податчик следует положить так, чтобы от его торцов до оконечностей формуемого изделия было примерно такое же расстояние, как и до боковых сторон последнего. В податчик вводятся Т-образные оконечности трубок подачи смолы. Всасываемая за счет вакуума смола поступает по трубе в податчик. Дальше она начинает распространяться по всему внутреннему объему податчика, который не позволяет смоле выходить наружу до тех пор, пока не будет полностью заполнен весь внутренний объем мата. Только после этого смола начинает поступать в ламинат из податчика сразу по всему периметру последнего. Благодаря этому смола распространяется быстрее и равномернее по всему ламинату. В ряде случаев (особенно при формовке больших деталей и секций) применяют несколько податчиков, расположенных отрезками или по ДП изделия, или в разных частях последнего.

Правильно определить взаимное расположение элементов подачи смолы и вакуумных трубок – непростая задача. Следует отметить, что смола будет стремиться распространяться по кратчайшему расстоянию между точками наивысшего давления (местами подачи смолы) и наинизшего – входами вакуумных трубок. Наиболее распространенный и логичный вариант, применяемый на многих верфях – это

так называемая О-образная схема, при которой вакуумные трубки располагаются по внешнему периметру будущего изделия (матрица должна иметь мощный фланец шириной не менее 12–15 см), а подача смолы ведется в центр формуемой детали. Довольно часто встречаются еще С-образная схема (в ней вакуумные трубки идут по трем сторонам изделия, а податчик располагается в направлении от четвертой стороны в центр или просто по четвертой стороне), П-образная схема (вакуумные трубки по одной стороне, податчик – по другой) и Ш-образная схема (податчик – в центре, вакуумные трубки – по боковым сторонам). Две последние схемы особенно часто применяются на деталях с большим удлинением. Могут быть и другие, индивидуально подбираемые схемы расположения (особенно на больших деталях сложной формы), важно помнить одно – от оконечностей податчика (если он один) или среза отдельной трубки, подающей смолу, не должно быть направлений, ведущих мимо рабочих срезов вакуумных трубок. Также и расстояние от точек подачи до вакуумных трубок должно быть примерно одного порядка. Иначе по отдельным направлениям смола распространяться будет очень плохо (или вообще не будет), и деталь с высокой степенью вероятности окажется загубленной.

Разумным вариантом представляется схема подбора правильного расположения, рассмотренная, опять же, на «Dufour»: с началом процесса подачи смолы запускается секундомер, и через равные промежутки времени на прозрачной вакуумной пленке специальным широким и мягким фломастером рисуются линии положения фронта смолы. Меняя (от одного опытного цикла к другому) расположение мест подачи смолы и откачки воздуха, добиваются ровного и равномерного продвижения фронта смолы по формуемой детали. Еще одним важным элементом контроля качества является тепловизор или любой другой прибор, предназначенный для дистанционного контроля температуры: в местах затрудненного продвижения смолы она начинает полимеризоваться раньше остальных участков, что приводит к повышению температуры в этих зонах.

Окончание следует