



Проектирование элементов автомобиля из композиционных материалов

Лекция 8

«Технология изготовления конструкций из полимерных композиционных материалов»

Составил доцент кафедры «Колесные машины», к.т.н.

Карташов Александр Борисович



Понятие о конструкторско-технологическом решении



Расширение класса конструкционных материалов и совершенствование их свойств является результатом технического прогресса. Материалы, появление которых, как правило, определяется необходимостью повышения эффективности разрабатываемых конструкций, в свою очередь, открывают возможности для реализации принципиально новых конструкторских решений и технологических процессов. Такая взаимообусловленность процессов развития материалов, конструкций и технологий отчетливо проявляется в настоящее время в связи с разработкой и применением КМ.

Для эффективной реализации КМ в конструкциях требуется решение комплекса задач, которые связаны с

конструированием изделия,

выбором материалов,

определением рациональной структуры материала, соответствующей механическим, тепловым, химическим и другим воздействиям, с учетом существующих технологических ограничений.



Понятие о конструкторско-технологическом решении



В начале 80-х годов был сформулирован основной принцип создания изделий из КМ, согласно которому **вопросы выбора материалов, проектирования конструкции и разработки технологического процесса следует рассматривать как три стороны единой проблемы** и не решать их изолированно один от другого.

Такой подход потребовал на всех этапах создания изделия более тесного взаимодействия подразделений расчетчиков, конструкторов, материаловедов и технологов.

Таким образом, в процесс проектирования оказалось втянуто большое число специалистов различного профиля и квалификации, а сам процесс проектирования превратился в сложную иерархическую систему, работа которой основана на постоянном взаимодействии между специалистами различных подразделений.

В таких условиях обеспечить ускорение процесса проектирования при одновременном улучшении его качества и снижении стоимости можно лишь на основе коренной перестройки самого процесса проектирования.



Понятие о конструкторско-технологическом решении



Процесс проектирования, согласно традиционной схеме, содержит этапы:

- конструирования,
- проектирования и разработки технологии,
- взаимную увязку конструкторско-технологических решений, направленную в основном на поиск подходящей технологии и в меньшей степени на изменение конструкции.

Отличительной особенностью проектирования конструкций с применением КМ, как отмечалось выше, является тот факт что на этапе производства одновременно создаются и сам материал, и конструкция. При этом этапы выбора материалов конструирования, проектирования и разработки технологии изготовления стали различными аспектами единого процесса принятия решений.

Отказ от этого принципа приводит, как показывает анализ, к тому, что создание новых конструкций затягивается, опытные образцы не удовлетворяют требованиям, непрерывно в конструкцию и технологию требуется вносить изменения, многие из которых можно было учесть еще на ранних стадиях проектирования, если бы имелась возможность просмотреть и оценить все альтернативные варианты изделий.



Понятие о конструкторско-технологическом решении



Практически вся последующая деятельность специалистов после принятия проектного решения направлена на анализ новых решений, что приводит к потере времени и удорожанию изделий. Подобная ситуация не является виной конструктора. Это результат принципиального несоответствия традиционных методов проектирования и сложности современных конструкций.

Конструирование изделий из КМ начинают с анализа его формы, назначения и действующих на него внешних и внутренних воздействий. В зависимости от этого выбирают конструкторско-технологическое решение.

В общем случае КТР представляет собой совокупность:

конструкционных элементов проектируемого объекта, изготавливаемого из определенных материалов или собираемого из определенных компонентов (деталей, агрегатов и т.п.)

+

и конкретных технологических процессов или операций, обеспечивающих реализацию заданных требований, которые предъявляются к данному объекту.



Структурная схема конструкторско-технологического решения





Понятие о конструкторско-технологическом решении



Например, применительно к автомобильным конструкциям выбор конструкторско-технологических решений для каждого агрегата определяется следующими факторами:

- формой изделия - тела вращения, тела сложной формы, включая поверхности двойной кривизны, балочные конструкции и др.;
- видом и характером внешнего воздействия – температурно-влажностный режим окружающей среды, интенсивность общего силового внешнего нагружения;
- видом и характером внутреннего воздействия – характер приложения местных сосредоточенных сил и влияние вырезов в силовой оболочке, необходимая степень герметичности, температурно-эрозионное воздействие, требования, предъявляемые к распределению внутренних сил.

Форма изделия в основном определяет схему укладки армирующего материала в конструкции и габаритные размеры технологического оборудования, применяемого при изготовлении изделий (размер оправок, полимеризационных печей, станков для механической обработки и др.).



Требования к созданию конструкций



При создании конструкции детали из КМ необходимо правильно выбрать материал с учетом особенностей его поведения в условиях переработки и оценить его работоспособность в эксплуатационных условиях.

Конструкция должна позволять достаточно точно и быстро выбирать технологически осуществимый и наиболее экономически целесообразный вариант изготовления детали.

Процесс конструирования детали связан с анализом различных вариантов технологии ее изготовления, тем более, что оформление конструкции детали чаще всего происходит в процессе формования материала.

Конструктор выбором материала в значительной степени предопределяет технологию изготовления детали, поэтому он обязан знать основные методы переработки материалов, особенности оформления различных элементов конструкции, производственные возможности предприятия, на котором планируется изготовление деталей.



Требования к созданию конструкций



Кроме того, требуется учитывать серийность изготовления, поскольку конструкция массового выпуска может существенно отличаться от конструкции детали, предназначенной для выпуска в незначительном количестве.

В первом случае может быть оправдана и сложная оснастка, и специальное оборудование.

Во втором случае выгоднее изготавливать детали на универсальном оборудовании с применением простой оснастки.



Общая характеристика технологических процессов



Отличительная особенность изготовления деталей из ПКМ, как уже отмечалось, состоит в том, что материал и изделие в большинстве случаев создаются одновременно. При этом изделию сразу придают заданные геометрические размеры и форму, что позволяет существенно снизить его стоимость и повысить конкурентоспособность по сравнению с изделиями из традиционных материалов, несмотря на то, что полимерные связующие и волокнистые наполнители имеют сравнительно высокую стоимость.

Для широкого использования КМ требуется создавать новые высокопроизводительные технологические процессы, обеспечивающие наивысшее качество изделий при минимальной трудоемкости их изготовления.



Общая характеристика технологических процессов



В отличие от металлообрабатывающих технологий процессы производства изделий из композитов позволяют существенно повысить коэффициент использования материала (КИМ) и довести его до значений 0,8...0,95.

КИМ представляет собой количество материала (объём или массу) в готовом изделии делёную на общее количество материала, пошедшее на изготовление изделия.

Кроме того, по сравнению с металлическими конструкциями удастся сократить количество технологических разъемов в изделиях сложной формы, устранить целый ряд сборочных операций, таких как клепка, сварка, заменив их клеевыми и клеємеханическими соединениями, образуемыми непосредственно при формовании.

В связи с этим может быть достигнуто снижение трудоемкости изготовления изделий по сравнению с металлическими аналогами в 1,5 раза.



Общая характеристика технологических процессов



Изделия из КМ можно классифицировать в соответствии с типовыми технологическими процессами производства и применяемыми материалами.

Элементами типизации технологического процесса являются:

- используемое унифицированное оборудование,
- типовая рецептура связующих, клеев, растворов, расплавов,
- типовые наполнители,
- технологические режимы изготовления композитных конструкций.

В остальном технологии изготовления конструкций из композитов так же неповторимы, как и сами конструкции.

К элементам индивидуализации технологического процесса можно отнести оснастку, программы намотки, выкладки, используемые методы контроля и приемосдаточных испытаний.



Общая характеристика технологических процессов



Процесс производства конструкций из КМ представляет собой сложную многоуровневую систему взаимосвязанных и взаимообусловленных технологических приемов и операций, обеспечивающих в конечном счете весь комплекс проектно-конструкторских и функциональных качеств изделия, физико-механических, теплофизических и специальных свойств материалов в этом изделии.

Каждое качество обретается объектом производства в результате выполнения соответствующей технологической операции, направленной на придание ему того или иного свойства.

Такая операция представляет собой автономную систему (или подсистему) взаимосвязанных технологических приемов и переходов, объединенных единым технологическим методом и решаемой с его помощью задачей.

Иными словами, каждая операция организуется из приемов, реализующих определенный технологический метод производства для достижения частной технологической задачи (например, приготовление связующего, изготовление непрерывной однонаправленной ленты, формирование корпуса намоткой однонаправленной ленты, операция отверждения намотанной заготовки, операция механической обработки и т.п.).



Общая характеристика технологических процессов

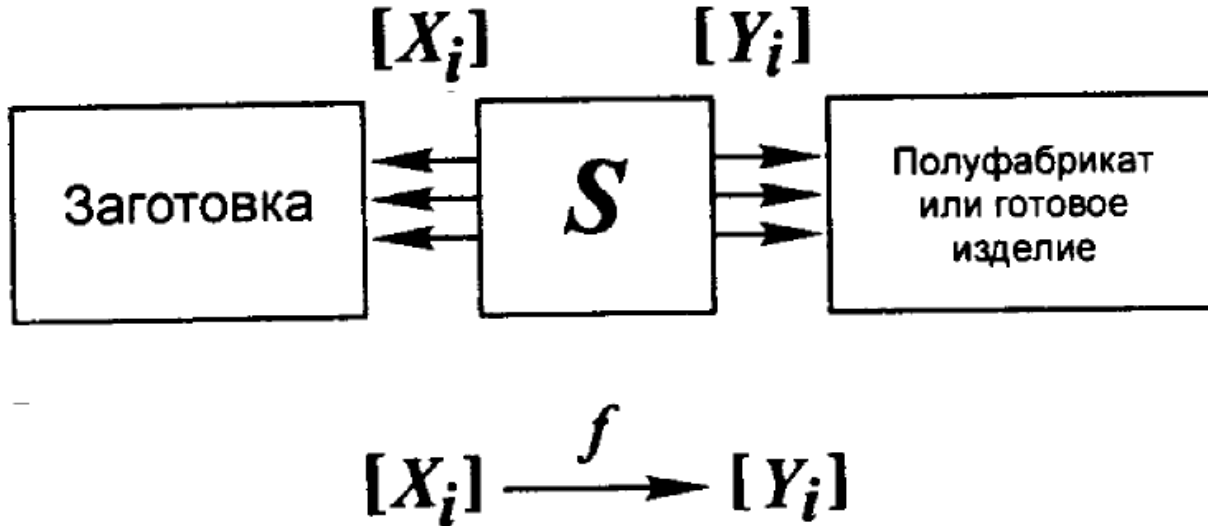


Процесс производства конструкции из композитов – это набор самых разнообразных технологических процессов. Объект производства при этом, проходя по определенному технологическому маршруту от операции к операции, претерпевает количественные и качественные изменения до тех пор, пока по всем показателям не будет соответствовать уровню требований технического задания.

Обычно объект производства на промежуточных этапах технологического процесса называют полуфабрикатом. Полуфабрикат, поступающий на операцию, принято называть заготовкой (для данной операции), а выходящий с этой операции – ее полуфабрикатом (см. рисунок).



Модель операционной системы технологического процесса



Качественные и количественные показатели заготовки, поступающей на операцию, характеризуются массивом величин $[X_1, X_2, X_3, \dots, X_n]$, называемых «входами» $[X_1]$. Соответствующие показатели полуфабриката на выходе с данной операции называют «выходами» $[Y_j]$.



Общая характеристика технологических процессов



Операция (ее технология, приемы, действия) реализуется с помощью технических средств (оборудования, приспособлений, другой технологической оснастки, приборов контроля режимов и качества, средств управления), объединенных в операционные технологические системы, которые характеризуются «составом», т.е. набором элементов, обладающих определенными свойствами. Очевидно, что для решения задач технологического проектирования и постановки изделия на производство следует для каждой операции технологического процесса S иметь модель функциональной взаимосвязи $\psi = f(X_i)$.



Общая характеристика технологических процессов



Для каждой операции технологического процесса, необходимо проанализировать, а при проектировании обосновать:

- заготовку, ее технологические свойства и показатели качества;
- полуфабрикат и его характеристики качества;
- технологическую систему, ее элементы, их технические характеристики, а также структуру системы;
- технологические приемы, действия и последовательность их выполнения;
- математические модели операции и ее элементов;
- режимы функционирования технологической системы при выполнении конкретной операции.



Общая характеристика технологических процессов



Технология изготовления деталей из ПКМ включает в себя следующие основные операции:

- подготовку армирующего наполнителя и приготовление связующего;
- совмещение арматуры с матрицей;
- формообразование детали;
- отверждение связующего в КМ;
- механическую доработку детали;
- контроль качества.



Общая характеристика технологических процессов



Подготовка исходных компонентов заключается в проверке их свойств на соответствие техническим условиям, а также в обработке поверхности волокон для улучшения их смачиваемости и увеличения прочности сцепления между наполнителем и матрицей в готовом ПКМ (удаление замасливателя, аппретирование материала, активирование и химическая очистка поверхности, удаление влаги и т.п.).

Армирующие волокна совмещают со связующим прямыми или непрямыми способами.

К прямым способам можно отнести такие, при которых изделие формируется непосредственно из исходных компонентов КМ, минуя операцию изготовления из них полуфабрикатов.

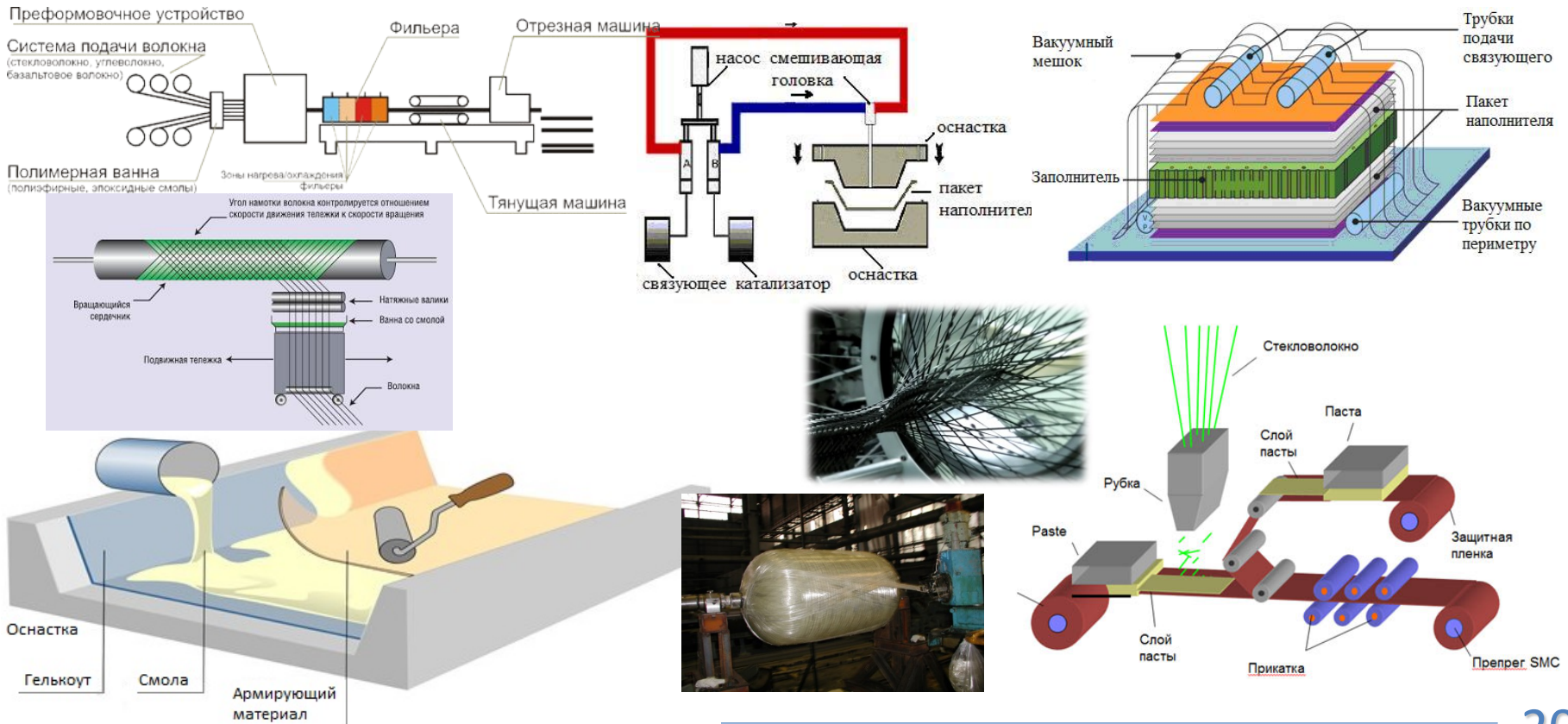
Непрямыми способами изготовления называют такие, при которых элементы конструкции образуются из полуфабрикатов. В этом случае пропитка армирующих волокон связующим — это самостоятельная операция получения предварительно пропитанных материалов (препрегов) — нитей, жгутов, лент и тканей, которые после подсушивания частично отверждаются.



Основные технологические процессы



В настоящее время известно множество технологических процессов переработки ПКМ в изделия различных размеров, конфигурации и целевого назначения. Основные технологические процессы формования, применяемые в производстве изделий из ПКМ, а также рекомендуемые виды армирующих наполнителей и связующих для этих процессов приведены в таблице далее.





Основные технологические процессы формообразования изделий из ПКМ



Технологический процесс	Рекомендуемые компоненты ПКМ	
	Тип армирующего наполнителя	Тип связующего
Контактное формование: ручная выкладка	Короткие волокна, ленты, ткани,	Полиэфирные, эпоксидные, фенольные,
напыление	Маты	фурановые,
автоматизированная выкладка	Ленты	термопластичные
Формование с эластичной диафрагмой: вакуумное	Ткани, маты, ленты	Эпоксидные, полиэфирные,
вакуумно-автоклавное		полиамидные,
вакуумно-пресс-камерное		фенольные, полисульфон
Формообразование давлением: пропитка под давлением	Ткани, маты, ленты, короткие волокна	Полиэфирные, эпоксидные, фенольные,
пропитка в вакууме		фурановые, полиамидные



Основные технологические процессы формообразования изделий из ПКМ



Технологический процесс	Рекомендуемые компоненты ПКМ	
	Тип армирующего наполнителя	Тип связующего
Прессование в формах: прямое	Ткани, ленты, маты	Полиэфирные, эпоксидные, фенольные, силиконовые, термопластичные
литьевое	Короткие волокна	
термокомпрессионное	Ткани, ленты, маты	
Намотка “мокрая”	Нити, ленты, жгуты, ткани, пленки	Эпоксидные, полиэфирные, фенольные, полиимидные, термопластичные
“сухая”	Препреги – нити, ленты, жгуты, ткани	
Пултрузия	Нити, жгуты, тканые ленты, тканые неплетеные заготовки	Термореактивные, термопластичные



Основные технологические процессы формообразования изделий из ПКМ



Технологический процесс	Рекомендуемые компоненты ПКМ	
	Тип армирующего наполнителя	Тип связующего
Предварительное формование заготовок и матов	Короткие рубленые волокна, нитевидные кристаллы	Водные растворы этилового спирта, четыреххлористый углерод, полимерные связующие, органические жидкости

Каждый технологический процесс имеет свои особенности, преимущества и недостатки. Кроме того, каждый процесс обусловлен предельными технологическими возможностями формообразования изделий, параметрами процесса (давление, температура, скорости формования и т.п.), геометрии, формы степенью автоматизации и реализации исходной прочности компонентов и т.д. Эти предельные возможности, с одной стороны, заложены в самом методе формообразования, а с другой стороны, ограничены параметрами технологического оборудования и оснастки.



Контактное формование. Общая характеристика



Процесс контактного формования (КФ) заключается в послойной укладке заготовок из волокнистого наполнителя на форму вручную, напылением или с помощью специальных выкладочных центров. Пропитку заготовок можно осуществлять как на форме, так и предварительно с последующим удалением пузырьков воздуха из межслойного пространства. Этим способом можно изготавливать изделия практически любых размеров, но достаточно простой конфигурации. В США этот метод называют “метод ведра и щетки” (basket and brush).

В настоящее время около 30 % всех изделий из ПКМ, например корпуса лодок, яхт, элементы кузовов автомобилей, мебель, панели, ванны, водяные горки и другие, производят способами контактного формования.

Технологический процесс КФ заключается в том, что на подготовленную поверхность открытой формы укладывают вручную (или с помощью автомата) либо напыляют армирующий наполнитель, затем пропитывают его связующим, уплотняют и отверждают. Рассмотрим особенности способов КФ

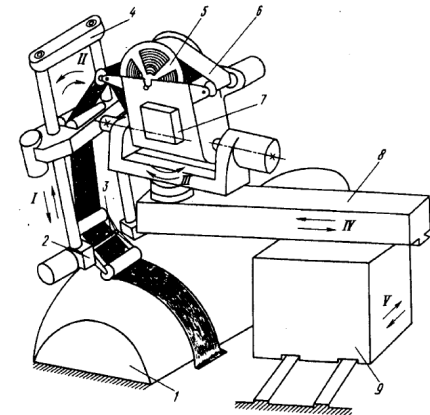
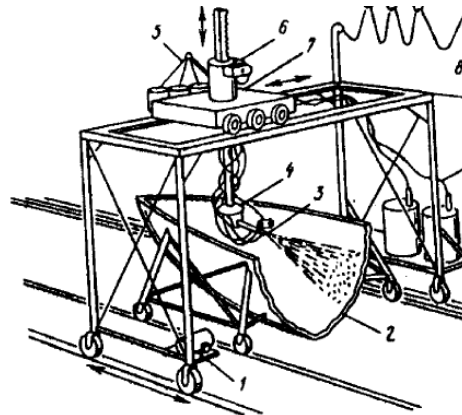
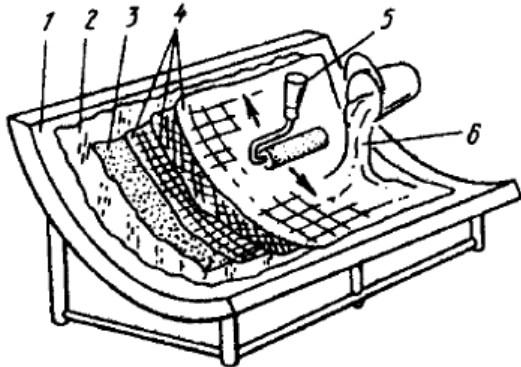
1. Контактное формование. Общая характеристика

Контактное
формование

Ручная
выкладка

Напыление

Автоматизированная
выкладка

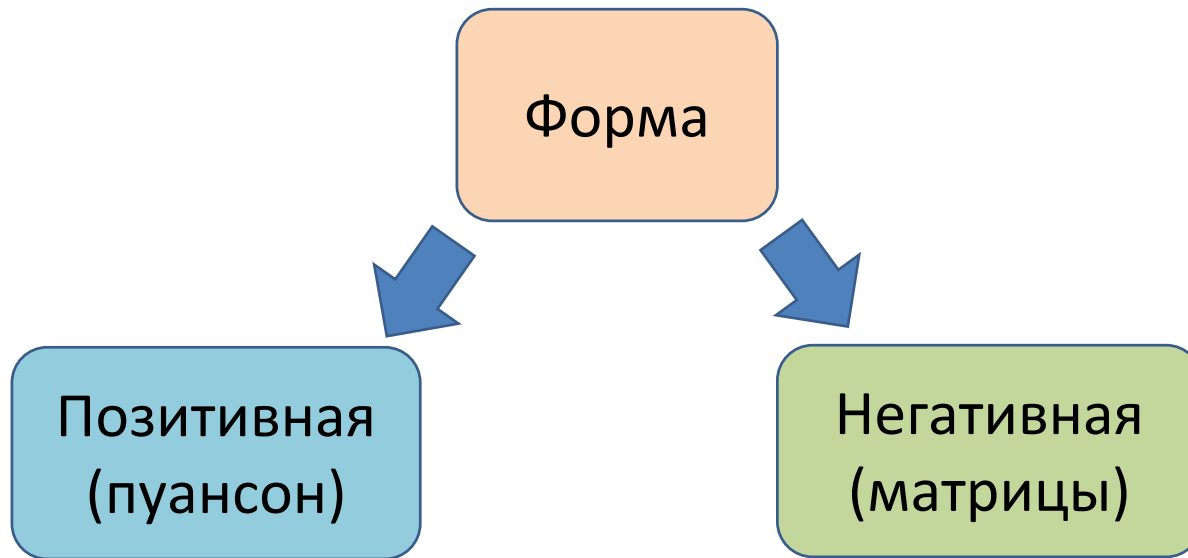




1.1. Ручная выкладка

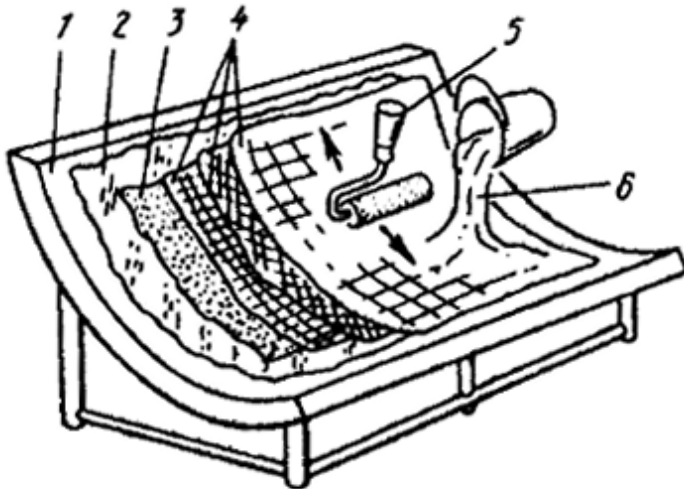


При КФ используют открытую форму без применения давления. Форма может быть позитивной или негативной в зависимости от требуемой гладкости внутренней или внешней поверхности изделия.



Основная характерная особенность контактного формования — получение точных размеров и гладкости только той поверхности изделия, которая непосредственно прилегает к форме в процессе изготовления.

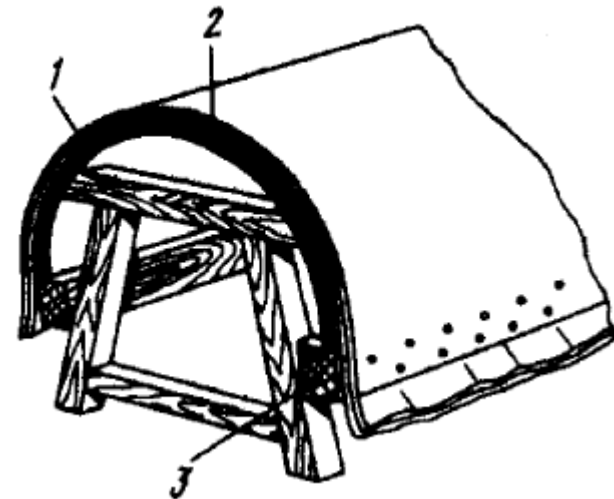
Негативная форма точно воспроизводит наружный контур формуемого изделия, а позитивная – внутренний контур. Типовые способы укладки материала на негативную и позитивную формы показаны на рисунках.



Элементы конструкции формы и изделия при формовании ручной укладкой:

1 – форма; 2 – разделительная пленка; 3 – наружный смоляной слой; 4 – стекловолокно; 5 – ручной валик; 6 – смола в смеси с катализатором

Негативная форма



Типовой способ укладки волокнистого материала на позитивной форме:
1 – форма; 2 – слой волокнистого материала; 3 – деревянный брус, к которому прикрепляется стеклоткань

Позитивная форма



Рабочие место при формовании изделий из ПКМ методом ручной выкладки



Фотография рабочего места при формовании изделий из ПКМ методом ручной укладки.



Контактное формование. Ручная выкладка



Сущность контактного метода формования заключается в следующем. На подготовленную (покрытую разделительным составом) рабочую поверхность формы наносят мягкой кистью декоративный слой связующего.

После полимеризации этого слоя форму покрывают связующим, укладывают первый слой армирующего материала и пропитывают связующим с помощью жёсткой кисти (или ребристого ролика). Затем последовательно укладывают и пропитывают последующие слои до получения необходимой толщины.

В процессе формования между слоями могут быть помещены закладные детали (металлические, деревянные, пластмассовые); при необходимости можно делать местные утолщения путём увеличения числа слоёв армирующего материала.

После этого материал либо остается на форме до отверждения связующего, либо подвергается подпрессовке с помощью вакуумного мешка, мешка под давлением, в автоклаве или на прессе (упрощенного типа).

Для ускорения процесса отверждения связующего его можно нагревать с помощью ламп инфракрасного света или помещать формы в термокамеру. После отверждения связующего изделие снимается с формы (или форма разбирается и снимается с изделия) и подвергается механической обработке (обрезка обля, сверление отверстий и т. д.).



Контактное формование. Ручная выкладка



Контактный метод изготовления многочисленных кузовных конструкций с успехом может быть использован для создания любых изделий в единичном производстве, особенно для получения сложных и крупногабаритных изделий (типа оболочки корпуса плавающей машины, оболочки многоместной кабины и т. д.), а также в мелкосерийном и среднесерийном производствах.

При эксплуатации пластмассовых изделий, изготовленных контактным методом, в условиях повышенных температур наблюдается образование вздутий на поверхностях, длительное время подверженных действию солнечной радиации (температура поверхности при этом достигает значения 80 °С).



Формы



Для получения формы можно использовать любой материал, обладающий достаточной жесткостью и обеспечивающий получение необходимой геометрии изделия в процессе изготовления. Основное условие заключается в том, чтобы материал формы не подвергался химическому воздействию смолы и не оказывал вредного влияния на скорость отверждения последней.

Для изготовления формы можно применять:

- дерево,
- фанеру,
- гипс,
- бетон,
- металлы.

Цветные металлы можно использовать для изготовления форм только в облуженном или хромированном состоянии, так как они чувствительны к действию некоторых катализаторов, входящих в связующие, и оказывают отрицательное воздействие на скорость отверждения.

При использовании связующего горячего отверждения формование изделий происходит на формах, изготовленных из стеклопластика, песочно-полимерных смесей, алюминия.



Подготовка форм для метода контактного формования



Пористые материалы обычно гигроскопичны (т.е. способны поглощать водяные пары из воздуха). Об этом нужно помнить, так как присутствие влаги замедляет отверждение связующего.

Гипс и бетон необходимо предварительно высушивать при нагревании.

Дерево, фанера также должны быть тщательно высушены.

В формах из пористого материала необходимо заполнить и изолировать поры поверхности формы парафином, воском, грунтом, шпаклевкой независимо от наличия разделительной пленки или смазки.



Требования к формам для контактного формования



При подготовке формы необходимо реализовать следующие требования:

- геометрия формы должна соответствовать геометрии изделия с учетом усадки материала и допуска на размеры;
- формы должна быть такой, чтобы отформованное изделие можно было извлекать без больших усилий;
- форма должна давать возможность обеспечения контроля равномерности и полноты нанесения наружных покрытий, а также качества пропитки армирующего материала по цвету формы.



Первой стадией при получении любого изделия в открытой форме является нанесение на ее поверхность антиадгезионного покрытия. На практике применяют различные типы антиадгезионных покрытий (см. табл.)

Выбор и эффективность разделительных покрытий определяются тремя факторами:

- 1) типом материала применяемой формы и связующего, которое может быть холодного или горячего отверждения;
- 2) степенью гляцевитости готовой поверхности изделия, наличием или отсутствием вторичных отделочных операций (например, окрашивания);
- 3) периодом времени, требуемого для сушки пленки разделительного слоя, по отношению к общему времени цикла формования.



Типы антиадгезионных покрытий



Тип покрытия	Форма при нанесении	Особенности покрытий
Парафин	Пастообразная или жидкая	Глянцевая поверхность, воспроизводит все детали формы; большие партии изделий
Поливиниловый спирт (ПВС)	Жидкая, напыляемая	Водорастворимое, одноразового использования, смывается с изделия и формы, превосходный антиадгезионный материал; позволяет получить легко окрашиваемую поверхность
Фторированные углеводороды: силаны силоксаны	Жидкая, напыляемая	Низкий коэффициент трения Не дают хорошего глянца Дорогие
Прокладочные бумаги и антиадгезионные пленки	Бумага с покрытием, целлофан, пленка из ПВХ	Одноразового использования Формование плоских листов
Внутренние антиадгезионные смазки	Жидкая (проникает в наружный смоляной слой)	Глянцевая поверхность; сохраняет форму всех деталей, отпадает необходимость в парафинировании формы; позволяет получать легко окрашиваемую поверхность



Антиадгезионные покрытия формы



При КФ положительные результаты можно получить при использовании не одного, а двух антиадгезионных материалов, например парафина и ПВС.

После каждого цикла формования нужно всегда полировать формы чистой салфеткой. Дополнительный слой парафина следует наносить после каждых 1—5 или более циклов в зависимости от типа парафина и условий формования. Периодически (через каждые 10...20 деталей) форму необходимо чистить для удаления всех остатков парафина и смолы. Тщательная подготовка формы — один из основных этапов цикла формования.

Для получения наружного смоляного слоя (*гелькоата*) обычно используют полиэфирную смолу, содержащую минеральные наполнители и пигменты, но без армирующих добавок. Эту композицию наносят на поверхность формы, а затем в процессе формования она попадает на формуемое изделие, образуя наружный слой. Тем самым обеспечивается образование декоративной глянцевой окрашенной поверхности с хорошими защитными свойствами, практически без последующей отделки.

Гелькоат (жидкое пальто) представляет собой желеобразное покрытие, которое наносят на поверхность из пульверизатора, кистью или малярным валиком.

При выкладке волокнистых материалов на гелькоат, необходимо обеспечить хорошую адгезию, для этого гелькоат должен оставаться гибким и незагрязненным.





Укладка армирующего материала



Для устранения воздушных включений между слоями следует тщательно разгладить первый выкладываемый слой, так как из-за наличия даже небольших воздушных включений на поверхности формируемого изделия могут возникать вздутия.

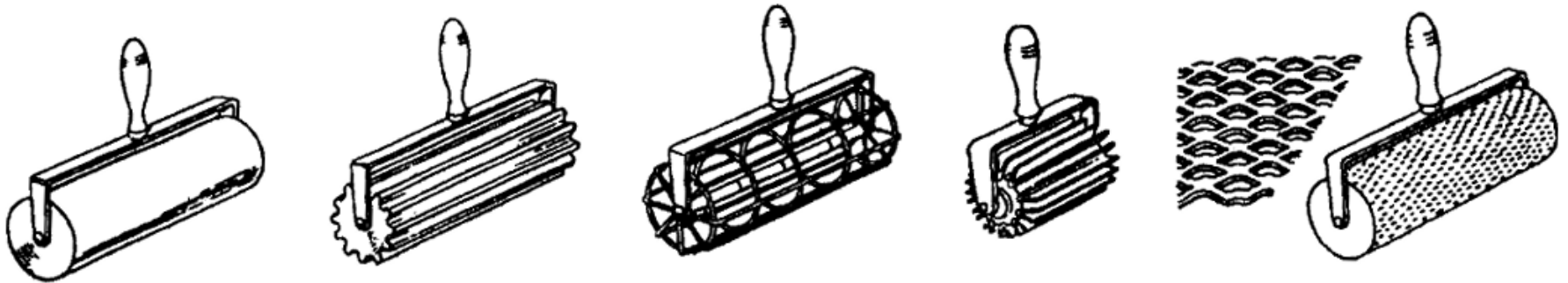
После правильной подготовки формы и нанесения наружного смоляного слоя (гелькоата) приступают к укладке армирующих материалов и их пропитке.

Все типы армирующих материалов – маты из рубленой стеклопряжи, ткани и тканый ровинг – поступают на производство в виде больших рулонов различной ширины. Лист нужной длины вырезают из рулона, а затем, при необходимости, обрезают его по шаблону с помощью универсального бритвенного ножа, больших ножниц или электрической машины для резки тканей, аналогичной применяемым в швейной промышленности.

Затем тщательно смешивают заранее отмеренные количества смолы и катализатора.

Композицию можно наносить на волокно как вне формы, так и внутри нее. Для полного удаления воздуха и обеспечения равномерной пропитки смолу в первую очередь наносят на участки волокна в верхней части формы.

Для уплотнения материала и удаления пузырьков воздуха используют щетки, резиновые и зубчатые валики (см. рисунок)



Валики, применяемые для обкатки волокнистого материала

Как уже отмечалось, смесь катализатора со смолой можно наносить на волокно распылителем, который автоматически дозирует и смешивает компоненты.



Укладка армирующего материала



Особое внимание следует уделить нанесению первого слоя (часто это «кожица» из тонкой вуали или мата с развесом 229 г/м^2), чтобы не допустить образования воздушных пузырьков между армирующим волокном и наружным смоляным слоем (гелькоатом). После этого уже можно наносить необходимое число слоев мата и (или) тканого ровинга до получения расчетной суммарной толщины (и, следовательно, прочности).

Слои мата и тканого ровинга следует чередовать для обеспечения хорошей межслойной прочности сцепления, предотвращения появления воздушных включений и получения максимальной прочности. Во всех случаях основной задачей на данной стадии производства является наиболее полное вытеснение воздуха, задержанного слоями наполнителя.

В зависимости от типа армирующего материала в изделиях, полученных способом контактного формования, содержание волокна в материале составляет 35...50 %.



Укладка армирующего материала



При формировании изделий на основе терморезактивных связующих после завершения процесса выкладки изделие остается на форме до тех пор, пока не закончится отверждение связующего. На этой стадии трогать формируемое изделие не следует. Отверждение можно ускорить за счет нагревания самой формы. После извлечения изделия из формы оно еще должно «дозреть» в течение некоторого времени при комнатной температуре для окончательного отверждения.

Следует иметь в виду, что выкладка в открытую форму может быть одной из подготовительных операций, за которой обязательно следует самостоятельная операция формирования — вакуумного, прессового, автоклавного и др.

При использовании термопластичных КМ, в отличие от терморезактивных, можно совмещать выкладку с формированием готового изделия. Смысл совмещенного процесса заключается в последовательном приформовывании каждого последующего слоя с одновременной его монолитизацией вплоть до достижения заданной толщины листа.

Выкладочные устройства

Схемы выкладочных устройств в процессе роликовой и прессовой выкладки термопластичных полуфабрикатов представлены на рисунке.

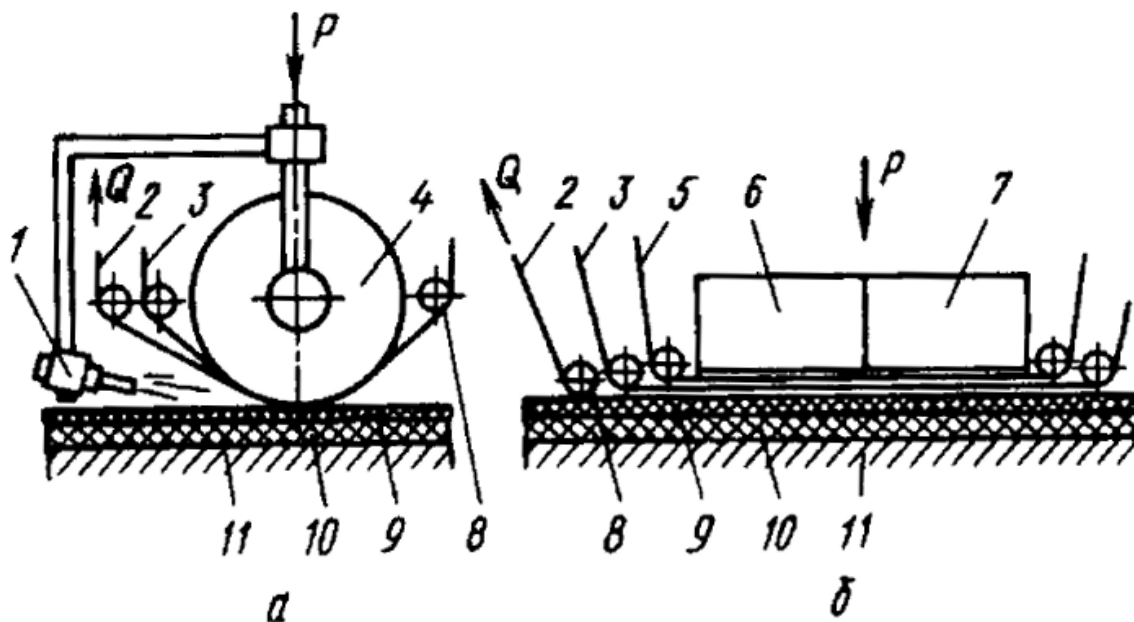


Схема выкладочных устройств при роликовой (а) и прессовой (б) выкладке термопластичных полуфабрикатов:

1 – нагревательное устройство; 2 – полуфабрикат; 3 – антиадгезионная разделительная пленка; 4 – прикаточный ролик; 5 – металлическая лента; 6 – нагретый инструмент; 7 – холодный инструмент; 8 – направляющие ролики; 9 – пакет; 10 – теплоизолирующая подложка; 11 – стол; P – сила нагружения ролика; Q – натяжение полуфабриката



Достоинства и недостатки ручной выкладки



Достоинства метода:

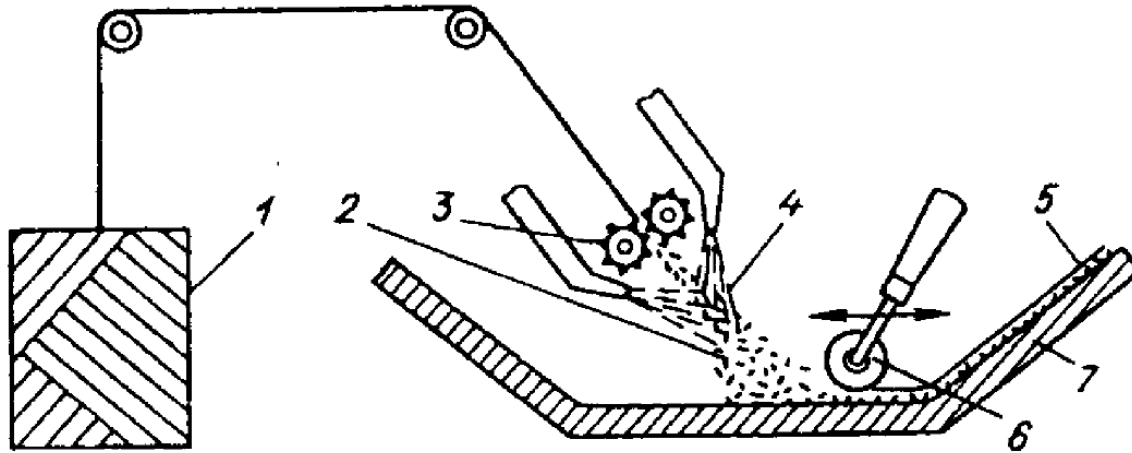
- простота осуществления;
- возможность использования односторонних форм облегчённого (упрощённого) типа;
- отсутствие сложного оборудования (вакуумные насосы, компрессоры и т.д.).

Недостатки метода:

- малая производительность;
- зависимость качества изделий от навыков формовщиков;
- сложность обеспечения безопасности труда.

Метод напыления представляет собой фактически механизированный вариант формирования ручной выкладкой, поэтому к нему полностью можно отнести все рекомендации, касающиеся подготовки формы, нанесения разделительных слоев и гелькоата.





Безвоздушная система напыления с двумя емкостями:
1 – ровинг; 2 – смола с катализатором; 3 – рубильное устройство; 4 – смола с ускорителем; 5 – уплотненный слой; 6 – валик; 7 – форма

Измельченное волокно и смола одновременно вводятся в открытую форму или на нее. Ровинг волокна проходит через рубильное устройство и вдувается в поток смолы, который направляется в форму распылительной системой с наружным (случай 1) или внутренним (случай 2) смешением компонентов.



Варианты смешивания компонентов при напылении компонентов связующего



1. Наружное смешивание компонентов

Первая распылительная головка впрыскивает смолу, предварительно смешанную с катализатором, или только катализатор, в то время как вторая головка впрыскивает заранее полученную смесь смолы с ускорителем.

2. Внутреннее смешивание компонентов

Смола и катализатор подаются в смесительную камеру распылителя позади единственной распылительной головки.

В обоих случаях полимерная композиция предварительно покрывает волокно, и объединенный поток равномерно распыляется в форме в соответствии с заданной схемой.

После введения в форму смеси смолы с волокном образовавшийся слой в обоих случаях прикатывают вручную для удаления воздуха, уплотнения волокон и получения гладкой поверхности.



Катализатор и ускоритель



Отверждение смолы – процесс, который в естественных условиях может занять неопределенное время. Ускорить полимеризацию позволяют два дополнительных компонента – акселератор (или ускоритель) и катализатор (также известный как «отвердитель»).

Оба вещества работают в паре, увеличивая скорость отверждения смолы и не образуя при этом никаких побочных продуктов.

Катализатор выступает в роли ресурса для внутреннего теплообразования, из-за которого и происходит затвердевание.

Акселератор позволяет проводить этот процесс при естественной температуре 21–30 °С без использования внешних источников тепла.

Соотношение, в котором применяются эти компоненты, определяет то, как быстро смола начнет отвердевать и сколько времени понадобится для ее полной полимеризации.



Состав установки для напыления

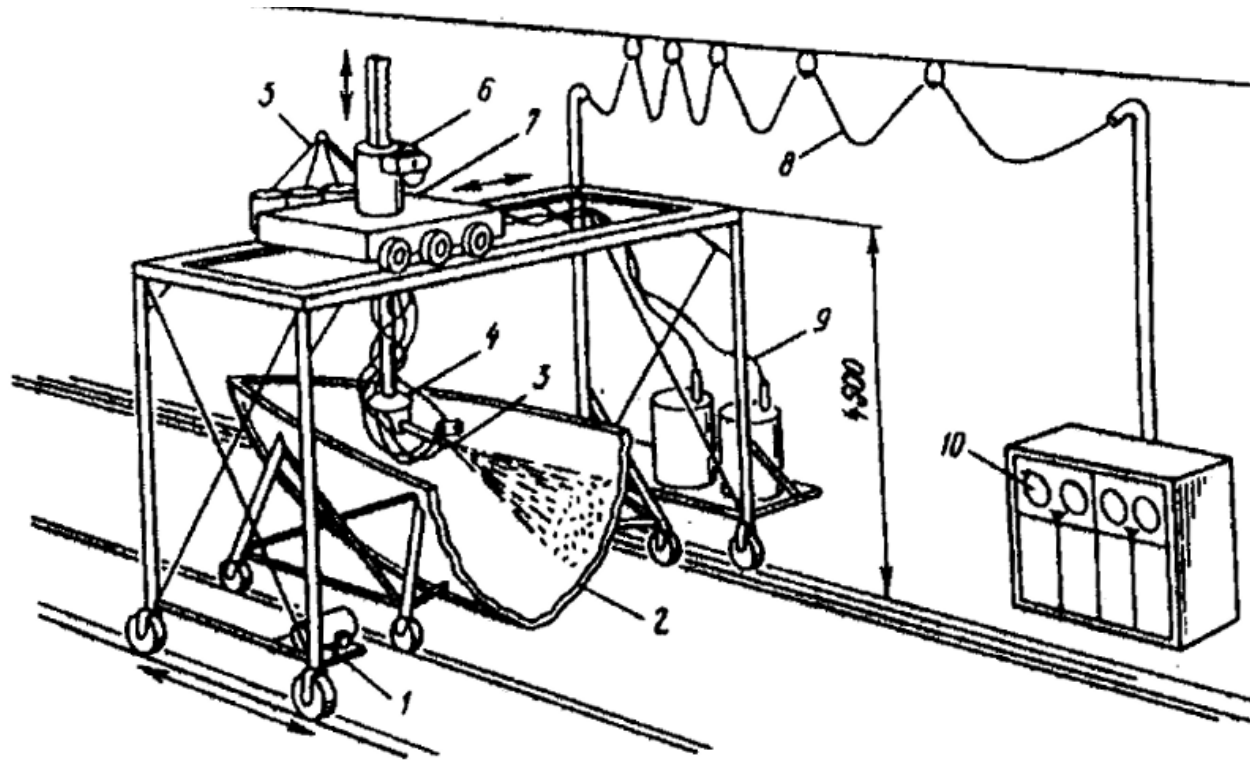


В состав установки для напыления входят:

- устройства для подачи смолы и катализатора по шлангам к распылителю, включающие насосы, нагнетательные бачки;
- рубильное устройство для армирующего материала;
- распылительное устройство;
- регуляторы подачи воздуха и измерительные приборы.

При массовом производстве изделий методами ручной укладки и напылением обычно применяются роботы. Преимущество робота состоит в том, что его применение при формовании напылением позволяет выполнить жесткие требования по охране здоровья и безопасности труда на производстве. Схема трехкоординатного роботизированного автомата для напыления показана на рис.

Схема трехкоординатного роботизированного автомата для напыления



Трехкоординатный роботизированный автомат для напыления:
1 – привод продольного перемещения; 2 – форма; 3 – распылительное сопло; 4 – поворотная головка; 5 – подача волокна; 6 – привод вертикального перемещения; 7 – привод поперечного перемещения; 8 – кабель; 9 – подача смолы; 10 – ленточные программные носители



Характеристика процесса напыления



Производительность установки достаточно высокая и составляет 300...350 грамм массы материала в минуту. Однако плотный материал можно получить только при 60...70 % связующего в нем, поэтому прочность его невелика.

При уменьшении количества связующего композит получается рыхлым даже после тщательной прокатки ребристым роликом. Вообще прикатка роликом обязательна и чем толще деталь, тем чаще ее надо делать (т. е. исключить ручной труд полностью не удастся).



Роботы от компании «Matrasur Composites» для напыления композиционных материалов



Уплотнение материала можно обеспечить вакуумным мешком, мешком под давлением, в автоклаве или с помощью пресса.

Подпрессовка с помощью вакуумного мешка заключается в следующем. После окончания контактного формования или пульверизации компонентов и прикатки материал закрывается мешком из полимерной пленки (или прорезиненной ткани), который по периметру приклеивается к фланцам формы или прижимается струбцинами или специальными пневматическими зажимами. С помощью вакуумного насоса из-под мешка откачивается воздух и под действием атмосферного давления мешок прижимает к форме (давление до 0,05 МПа).



Уплотнение материала вакуумным мешком





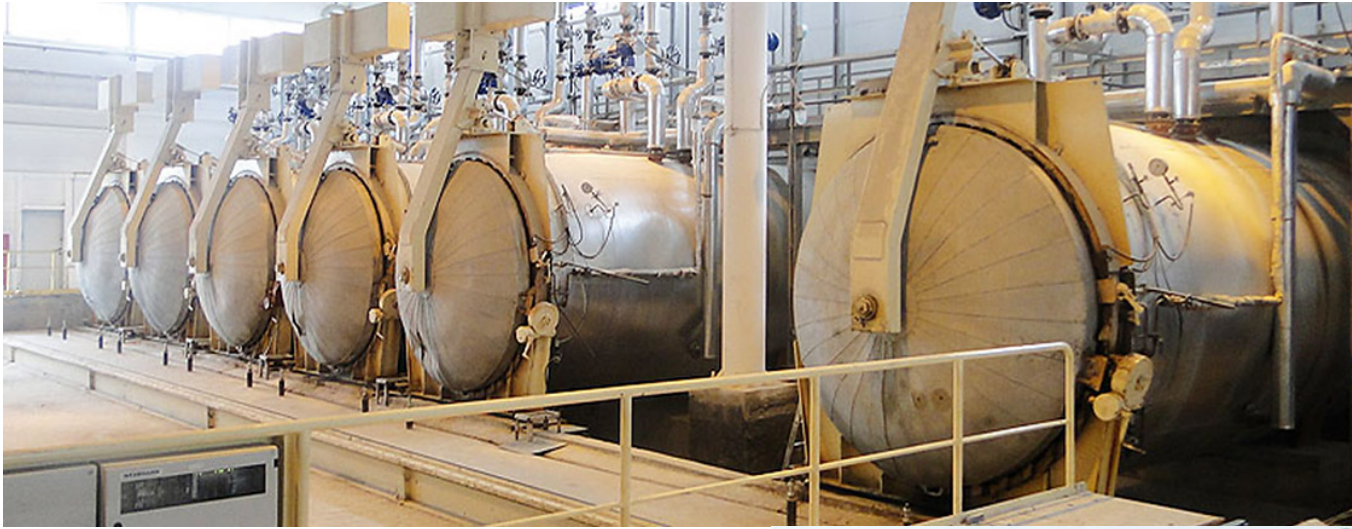
Если используется способ мешка под давлением, то форма накрывается колпаком, в который нагнетается воздух (давление до нескольких десятых долей МПа). Однако при этом увеличивается нагрузка на форму, поэтому она должна быть более прочной и жесткой.

Если вместо колпака использовать автоклав, то форма будет испытывать равномерное давление со всех сторон, следовательно, требования к ее прочности и жесткости уменьшаются.

Уплотнение материала с помощью прессы возможно при использовании прочных и жестких пресс-форм.



Уплотнение в автоклавах



Автоклав

Аппарат в виде герметически закрывающегося сосуда или камеры, используемый для обработки чего-либо при помощи нагревания под давлением выше атмосферного



Пульверизация компонентов применяется в серийном производстве крупных изделий простой конфигурации на специальной установке. При этом используются преимущественно односторонние формы облегченного типа.

Достоинства метода:

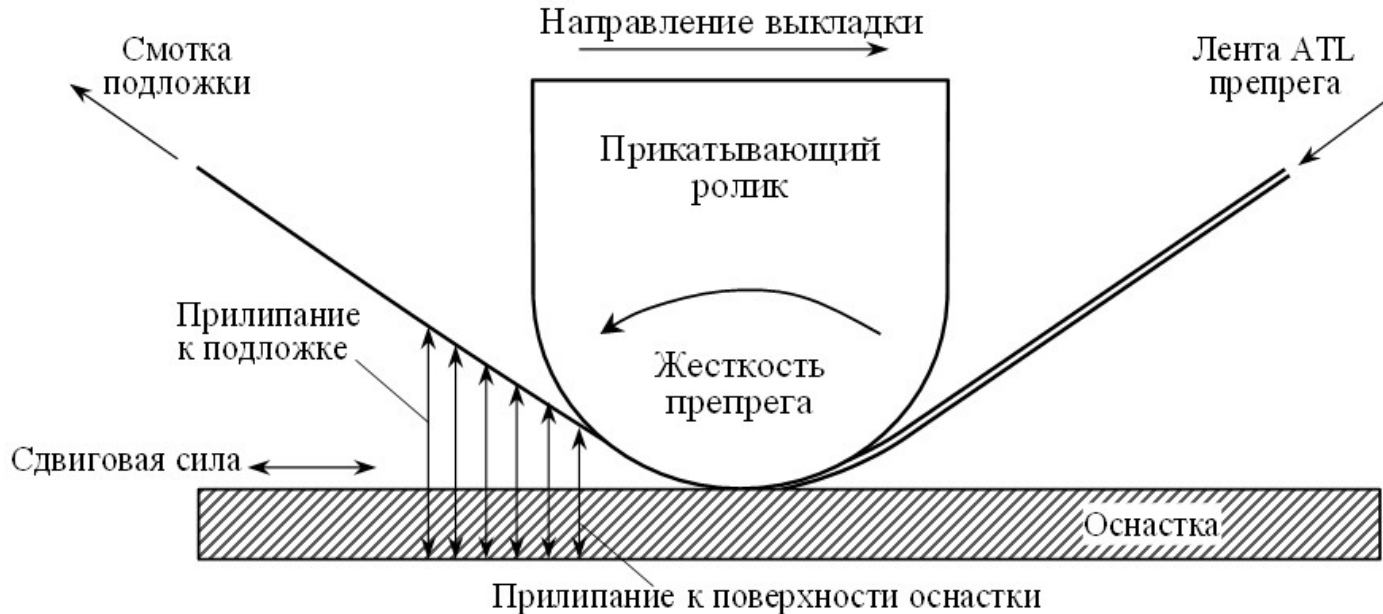
- метод пульверизации отличается большей, чем при ручной выкладки, производительностью;
- возможностью использования наиболее дешевого армирующего материала (жгута) и быстро отверждающегося связующего, так как окончательное смешивание компонентов происходит вне установки на поверхности формы, что может значительно ускорить процесс получения изделия.

Недостатки метода:

- дозирование вручную компонентов (хотя в принципе можно использовать для этой цели компьютер);
- трудности обеспечения равномерной толщины материала в изделиях;
- трудности в создании безопасных условий труда;
- невозможность применения направленной арматуры.

Для получения открытых оболочек сложной формы с произвольной образующей используют технологию автоматизированной выкладки препрега, которая состоит в укладке препрега по заданным в схеме армирования направлениям на оправку.

Автоматизированную выкладку препрега осуществляют в соответствии с программой перемещения головки выкладочного станка. Выкладку проводят в направлениях, обеспечивающих равновесие укладываемого препрега на оправке и не являющихся геодезическими.





Установка автоматизированной выкладки



Установка автоматизированной выкладки лент препрега для конструкций из композиционных материалов.



Контактное формование. Автоматизированная выкладка



Для устранения неплотного прилегания слоев укладываемого препрега выкладку обычно сопровождают прикаткой препрега нежесткими роликами. При выкладке препрега достаточно большой ширины необходимо рационально раскраивать полуфабрикат с целью повышения коэффициента использования материала.

Препрег из однонаправленной ленты может выкладываться автоматом без образования складок только по линейчатым поверхностям, образуемым движением прямой линии по произвольным траекториям. Если поверхность изделия нельзя аппроксимировать линейчатыми поверхностями, то при выкладке используют однонаправленный препрег минимальной ширины или тканый препрег полотняного плетения.

Подогрев укладываемого препрега повышает его деформативность в плоскости армирования, и при определенной ширине ленты удастся выкладывать однонаправленный препрег на пологие поверхности двойной кривизны.

Контактное формование. Автоматизированная выкладка

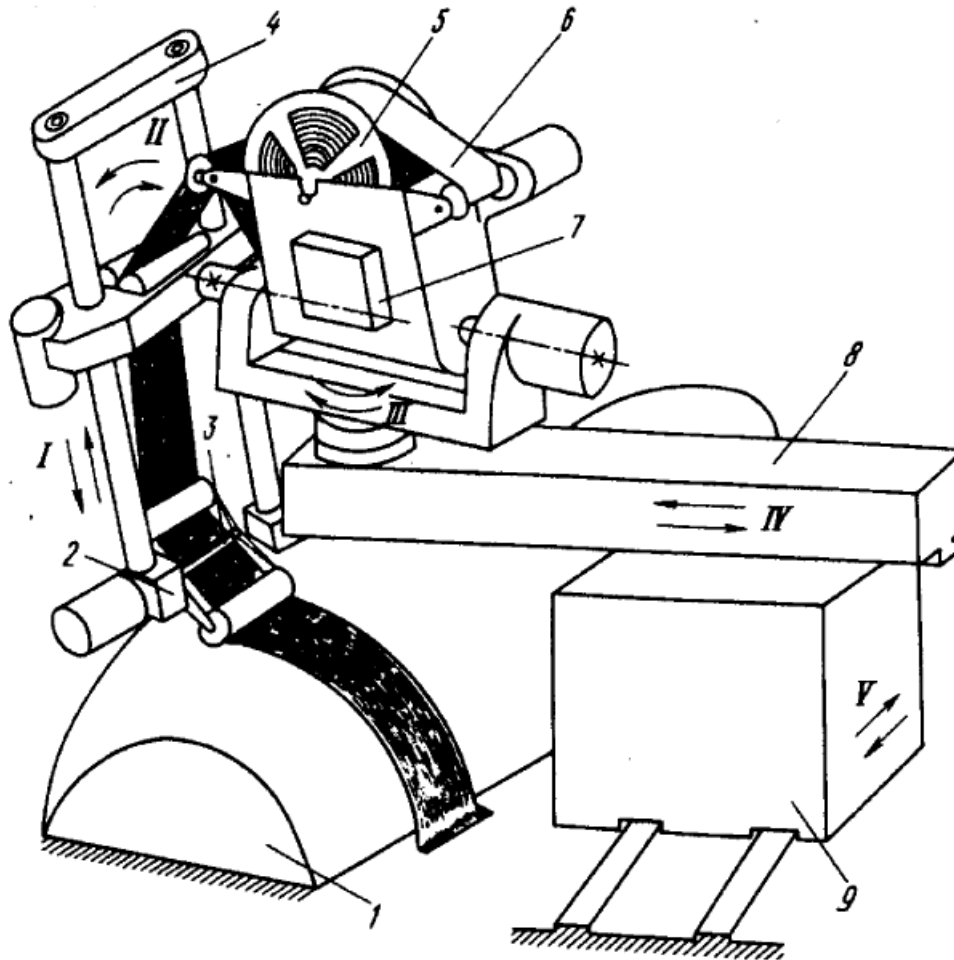


Схема автоматизированной выкладки препрегом оболочки двойной кривизны:

1 – оправка; 2 – головка; 3 – устройство обрезки; 4 – рама; 5 – бобина с препрегом; 6 – разделительная пленка; 7 – нагреватель; 8 – суппорт; 9 – каретка; I...V – степени подвижности станка



2. Формование с эластичной диафрагмой

Процессы формования в эластичном мешке заключаются в выкладке заготовок на плоскую или криволинейную форму и последующем формообразовании за счет разности давлений внутри и снаружи мешка по всей формируемой поверхности.

Формующее давление может приближаться к атмосферному, когда внутри мешка создается разрежение (вакуумный метод), или превышать его, если формование осуществляется в автоклаве под давлением сжатых газов на заготовку, вакуумированную внутри эластичного мешка (вакуумно-автоклавный метод).

Рассмотрим эти методы подробнее.



2.1 Вакуумный метод



Вакуумное формование применяют для изготовления изделий с различными габаритными размерами.

Приложенное внешнее давление, воздействуя на материал заготовки через эластичную диафрагму, должно выполнить следующие функции:

- уплотнить последовательные слои армирующего материала, выложенные на форме;
- обеспечить качественную глубокую пропитку волокна связующим;
- выдавить из пустот летучие побочные продукты реакции и пузырьки воздуха;
- выдавить избыток смолы из слоев материала.

Поэтому в качестве матрицы выбирают связующие холодного или горячего отверждения, при полимеризации не выделяющие побочных газообразных продуктов, которые могут создать в материале значительно большее противодавление, чем давление формования, и вызвать тем самым расслоение материала детали.



2.1 Вакуумный метод (2)



В последние годы в качестве матрицы используют термопластичные связующие типа полисульфон, полиамид, поликапроамид и другие.

Вследствие невысокого давления формования существенно ограничивается выбор армирующих материалов. В основном это стекловолокнистые материалы, так как их плотность и прочность сравнительно мало зависят от давления прессования. Тем не менее возможно применение любых волокнистых материалов.

Схемы вакуумного формования на внутренней (позитивной) и внешней (негативной) формах представлены на рисунках.

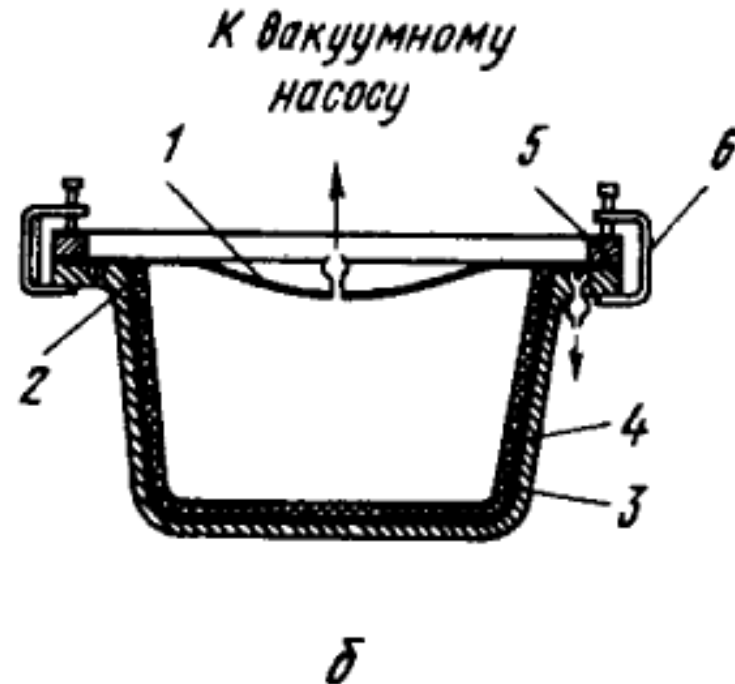
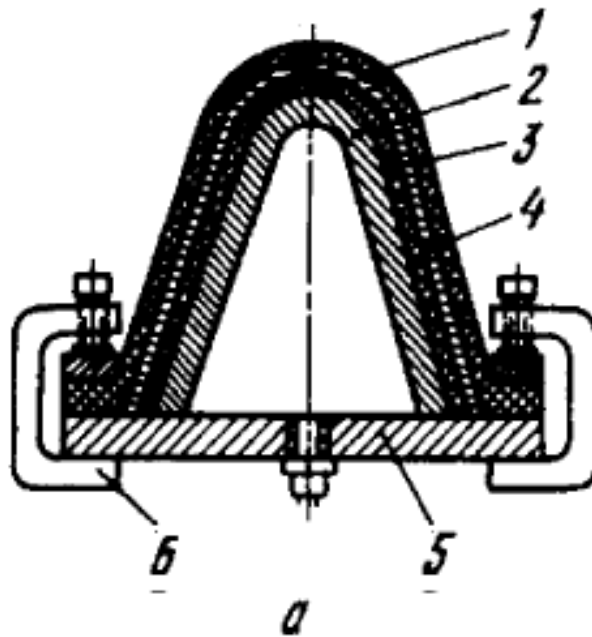


Схема установки прессования композитов вакуумным методом:
a – с внутренней формой; *б* – с наружной формой; 1 – резиновый чехол; 2 – форма; 3 – заготовка; 4 – цулага или целлофан; 5 – основание; 6 – прижим



Характеристики форм для вакуумного метода



Выбор материала для формы обусловлен объемом производства изделий, габаритами и формой изделия, тепловыми характеристиками материала формы.

При использовании термореактивных связующих горячего отверждения и термопластичных связующих формы изготавливают в основном из металлов и реже из гипса и слоистых пластиков.

Для связующих холодного отверждения в случае небольшой партии изделий (5—10 формовок) применяют деревянные формы.

Алюминиевые формы относят к наименее дорогой оснастке, но они менее долговечны, чем стальные, и обладают большим относительным линейным удлинением Δl при изменении температуры оснастки, что отражается на точности изделий (см. табл.).



Относительные удлинения материалов, применяемых для оснастки при температуре до 204 °С изготовления



Относительные удлинения материалов, применяемых для изготовления оснастки при температуре до 204 °С

Материал	$\Delta l = \frac{l_{T_H} - l_{T_K}}{l_{T_H}} 100 \%$
Стеклопластик	0,12
Керамика	0,015
Инструментальная сталь	0,20
Никель	0,23
Сталистый чугун	0,24
Литой гипс	0,25
Эпоксидная смола	0,35
Алюминиевые сплавы	0,42

Примечание: l_{T_H} , l_{T_K} – начальная и конечная длина образца при изменении температуры от T_H до T_K .



Характеристики форм для вакуумного метода



Перед использованием формы покрывают антиадгезионным покрытием. В качестве антиадгезионных смазок, как и при контактном формовании, используют пастообразный парафин (до температуры 121 °С).

Фторированные углеводороды образуют на поверхности оправки сплошную пленку. Их эксплуатируют до температуры 177 °С, поскольку при более высоких температурах выделяется фтор, вредный как для здоровья, так и для материала формы.

Хорошим разделителем является политетрафторэтилен (тефлон). Частицы тефлона, перешедшие в композит, легко удаляются с его поверхности растворителем.

При использовании термопластичных связующих (типа полиимидных), которые требуют высоких температур отверждения (до 300 °С), используют смазку на основе силановой смолы, которая стабильна до температуры 482 °С.

Силиконовые смазки можно использовать только до температуры 204 °С, но они загрязняют отформованный композит.



Характеристики форм для вакуумного метода



Смазки антиадгезивом обычно возобновляют после 4-5 запрессовок. Во избежание прилипания изделия на поверхность формы можно наносить смазку на основе ПВС или пленку целлофана. Целлофан рекомендуется укладывать полосами, чтобы получить хорошее прилегание к поверхности, имеющей кривизну. Обычно целлофан приклеивают раствором ПВС в смеси воды с этиловым спиртом, после чего его смачивают водой. При высыхании вследствие усадки целлофана последний натягивается и плотно облегает форму.

На подготовленную таким образом поверхность наносят поочередно слои предварительно пропитанной ткани или мата, которые тщательно прикатываются роликом к форме и между собой с целью создания контакта и удаления оставшегося воздуха.

На уложенную поверхность заготовки изделия выкладывают разделительные дренажные ткани или пленки, которые могут выполнять функции наружной поверхности отформованного изделия или абсорбировать избыток смолы из материала в процессе его отверждения. В некоторых случаях на разделительный слой помещают пористые впитывающие слои стекломатов или стеклотканей, а поверх них — перфорированные слои пленки или грубой ткани, выполняющие вентиляционные функции и обеспечивающие неприлипаемость эластичного мешка к пакету.



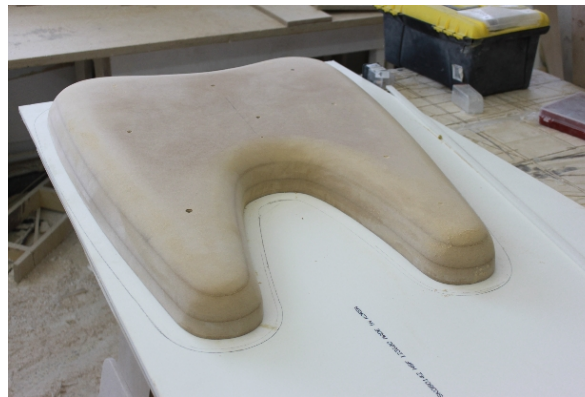
Цулага



Иногда в качестве разделительного слоя используют цулагу.

Цулага представляет собой тонкую обшивку (0,5... 1,5 мм) из алюминиевого сплава типа АМЦ, у которой поверхность соответствует контурам формуемого изделия. Для цулаги возможно также применение текстолита или стеклотекстолита толщиной 0,8...2 мм.

Собранную таким или иным образом форму с заготовкой помещают либо в эластичный мешок, либо закрывают чехлом, прижимая его по периферии на плите формы, обеспечивая герметичность собранного пакета.



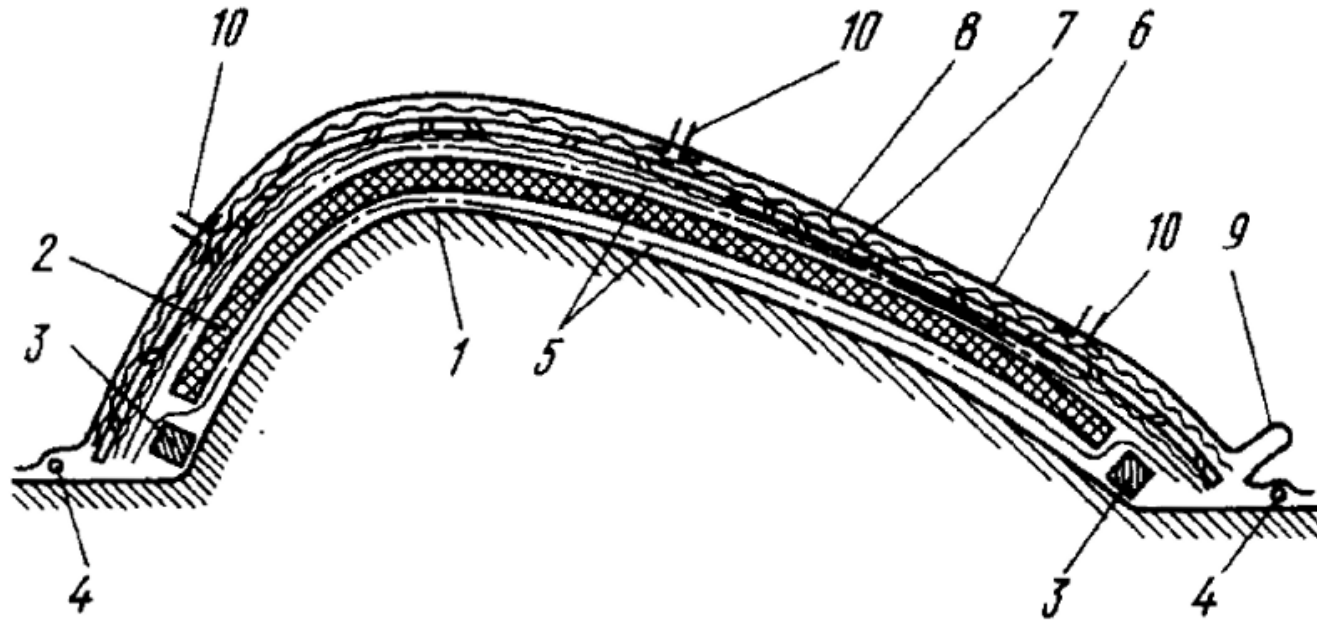


Схема вакуумирования формируемого изделия:

1 – оправка (вакуумный стол); 2 – формируемое изделие; 3 – ограничивающие бобышки; 4 – герметизирующий жгут-паста; 5 – разделительные дренажные пленки; 6 – вакуумный мешок; 7 – цулага с дренажными отверстиями; 8 – дренажный слой; 9 – компенсирующая складка; 10 – клапан вакуумной системы



Вакуумный мешок



Вакуумный мешок — это многослойная система, которая обеспечивает равномерное распределение давления во всех зонах формуемого изделия и исключает образование застойных зон, вызывающих недопрессовку материала.

Материал диафрагмы прежде всего должен выдерживать температуру горячего отверждения и обладать невысокой газопроницаемостью для обеспечения постоянства давления при формовании и в конечном счете качества изделия.

Наиболее пригодными материалами для эластичной диафрагмы являются резины, однако их срок службы небольшой, так как они разрушаются под воздействием смол и высоких температур. Особенно важна проблема создания термостойких вакуумных мешков для формования термопластичных ПКМ, так как их температура формования находится в диапазоне от 250 до 340 °С.



Вакуумный мешок



На практике для изготовления эластичных диафрагм применяют резины особых марок, прорезиненные ткани, силоксановый каучук, армированный стекловолокном, которые выдерживают температуру в диапазоне до 200 °С.

В качестве материалов вакуумных мешков и чехлов можно использовать различные термостойкие пленки: полиимидные (до температур 316 °С), пленки полиамидные (до температур 230 °С), пленки из нейлона (до температуры 204 °С), пленки из поливинилового спирта (до температуры 121 °С).

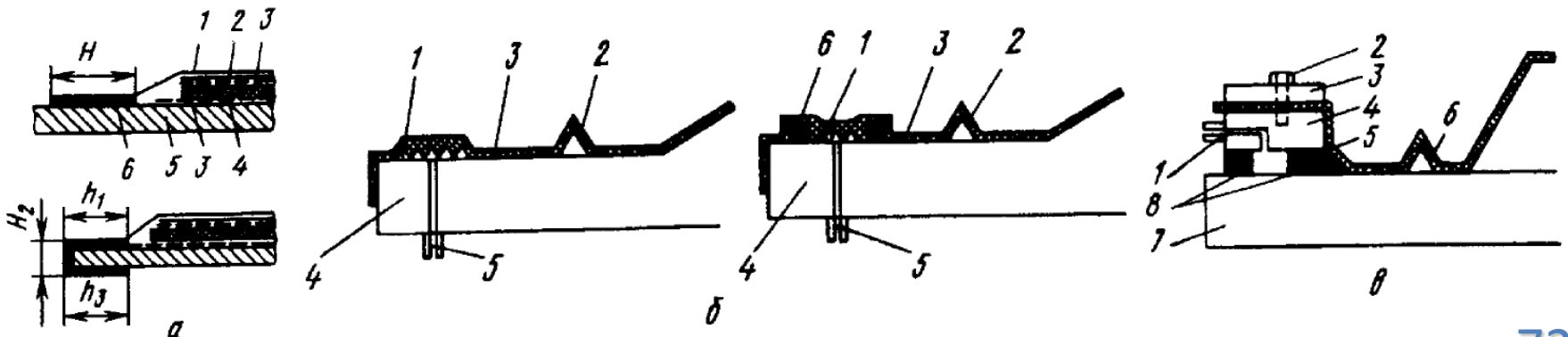
Указанные пленки имеют низкую газопроницаемость даже по гелию (не более 0,7 м³/сут).

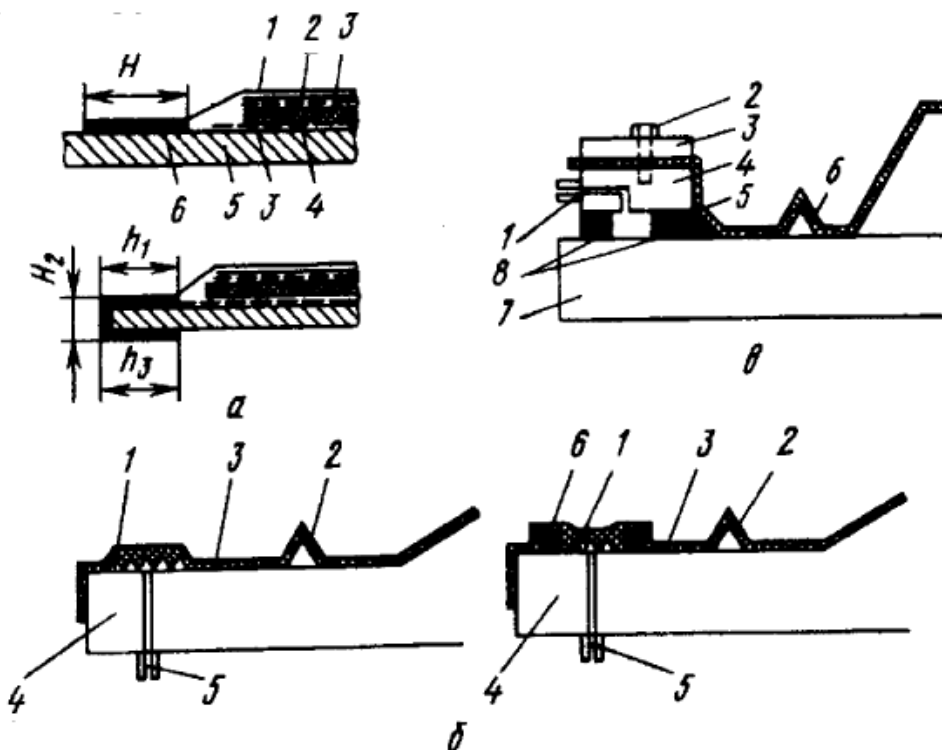
Применение пленочных мешков обеспечивает:

- стабильность параметров формования ПКМ;
- надежную герметичность мешка при формовании;
- целостность вакуумного мешка;
- достаточно высокую технологичность при демонтаже вакуумного мешка;
- высокую технологичность при изготовлении вакуумного мешка.

Для обеспечения герметизации заготовки, собранной под вакуумным мешком, разработано несколько конструктивно технологических схем. Необходимое уплотнение диафрагмы, обеспечивающее герметичность, реализуется вследствие применения герметизирующих жгутов и лент:

- с двусторонней липкой основой (рис. а);
- многоканавочных уплотнений (рис. б);
- наружной уплотняющей рамы (рис. в).





Конструктивно-технологические схемы обеспечения герметичности вакуумного мешка:

a – приклеивание с помощью жгута: 1 – вакуумный мешок; 2 – материал пористый; 3 – ткань разделительная; 4 – изделие формуемое; 5, 7 – плиты; 6 – жгут герметизирующий; *б* – многоканавочное уплотнение: 1 – взаимосвязанные канавки; 2 – компенсационный сальник; 3 – диафрагма из армированного стекловолокном силиконового каучука; 4 – оснастка; 5 – вакуумная линия; 6 – вкладыш из мягкого силиконового каучука; *в* – уплотняющая рама: 1 – вакуумная линия; 2 – винт; 3 – верхняя рама; 4 – нижняя рама; 5 – диафрагма; 6 – компенсационный сальник; 7 – оснастка; 8 – резиновые уплотнения



Замечания по методу вакуумного формования



Основное внимание перед формованием следует уделить ликвидации утечек из-под диафрагмы путем герметизации ее по всему периметру термостойкими герметиками или мягкими хомутами.

Штуцера для подсоединения к вакуумной линии обычно вплавляют или клеивают внутрь диафрагмы при ее изготовлении. Количество штуцеров на вакуумном мешке определяется из условия равномерного обжата формуемого изделия.

Для обеспечения равномерного вакуумирования под мешком на прилегающей к формуемому изделию торцевой части штуцера выполняют сквозные перекрестные пазы вакуумные «ручьи».



Замечания по методу вакуумного формования



При формовании под давлением диафрагмы используют в качестве емкости для сжатого газа, который выделяется из композита при отверждении.

Если давление под диафрагмой соизмеримо с действием внешнего давления, диафрагма остается инертной, и уплотнение материала не происходит.

Для создания пониженного давления под формируемым материалом предусмотрена система выпускных отверстий.

Однако применение препрегов при формовании заготовок позволяет отверждать изделие под вакуумом без системы выпускных отверстий, что значительно снижает сложность и стоимость форм.

Для повышения качества изделий используют способ вакуумно-автоклавного формования. Процесс формования осуществляется под действием высоких давлений сжатых газов или жидкости на формируемое изделие, вакуумируемое на форме эластичным мешком и помещенное в автоклав.

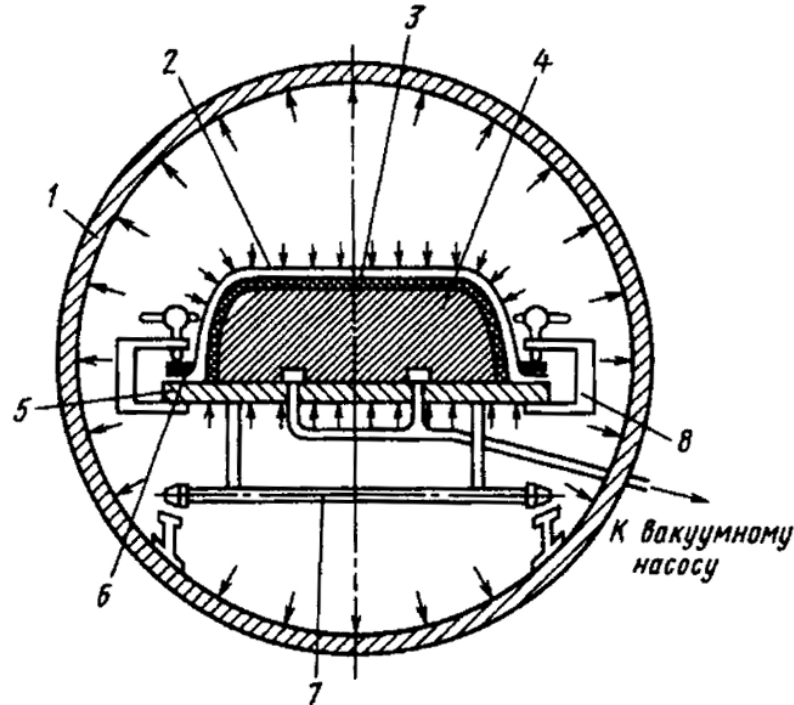


Схема формования в автоклавах и гидроклавах:

1 – автоклав; 2 – резиновый чехол; 3 – формируемое изделие; 4 – форма; 5 – плита; 6 – прижимное устройство; 7 – тележка; 8 – винтовой зажим



Характеристики автоклавов, применяемых в отечественной промышленности,



Автоклавы являются наиболее универсальным оборудованием при изготовлении изделий из композитов. Автоклав - герметичный сосуд большого объема, в котором можно создавать значительные избыточные давления рабочего тела (воздуха, инертного газа, азота) в диапазоне от 1 до 3,0 МПа при температурах 150...380 °С.

Технические характеристики автоклавов

Модель автоклава	Диаметр изделия, загружаемого в автоклав, мм	Длина изделия, загружаемого в автоклав, мм	Рабочее давление, МПа	Максимальная рабочая температура, °С
A25.576	800	1000	3,0	450
A25.578	2000	6000	1,6	380
A25.580	3000	8000	1,6	380
A25.582	3000	16000	1,6	380
A25.584	4500	26000	1,6	250

Автоклав включает в себя системы подачи рабочего тела в камеру, разогрева до требуемой температуры, регулирования рабочего давления, вакуумную, аварийную для сброса давления, систему автоматизированной записи параметров, а также противопожарную систему.

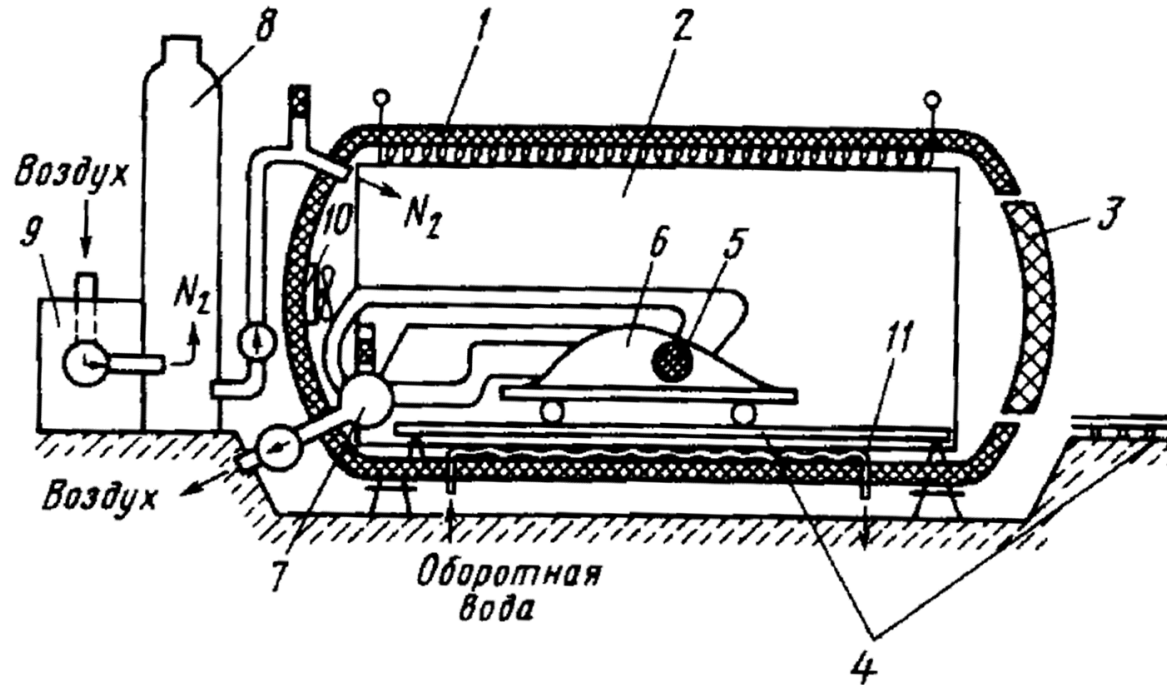


Схема автоклава:

1 – теплоизолирующий тепловой корпус; 2 – электронагреватель; 3 – крышка загрузочного люка; 4 – рельсовый путь; 5 – формируемое изделие; 6 – вакуумный мешок; 7 – вакуумная система; 8 – ресивер с азотом; 9 – азотная станция; 10 – вентилятор системы теплообмена; 11 – теплообменник



Вакуумно-автоклавное формование. Замечания



Наличие теплоизоляции корпуса позволяет в процессе работы избежать его разогрева, обеспечивает необходимый запас прочности стенок и нормальную температуру производственных помещений.

Температуру в автоклаве повышают после откачки воздуха и заполнения его рабочим телом.

Давление в автоклаве снижают только при охлаждении изделия до температуры 60...70 °С.

Автоклав охлаждается за счет принудительного теплообмена рабочего тела и водяного теплообменника.

Температуру отверждаемого изделия измеряют в необходимых точках с помощью хромель-копелевых термопар.

Для равномерной передачи необходимого давления на формируемый пакет материала используют вакуумные мешки, герметично закрывающие формируемое изделие на оправке и соединенные вакуумной системой автоклава.

Этот способ основан на передаче давления прессования воздуха через эластичную диафрагму к заготовке, уложенной на жесткую матрицу-форму. Внутренняя поверхность изделия оформляется матрицей, а внешняя - резиновым мешком и цулагой.

Эластичный мешок закрепляют на основании формы, при этом образуется герметично замкнутый объем. Цулагу жестко скрепляют с формой накладными прижимами. Прессование осуществляется при подаче в мешок сжатого воздуха. Под давлением мешок растягивается в камере и плотно прижимается с одной стороны к уложенной на форме заготовке, а с другой стороны — к поверхности цулаги. После чего матрицу подвергают нагреву, и изделие отверждается.

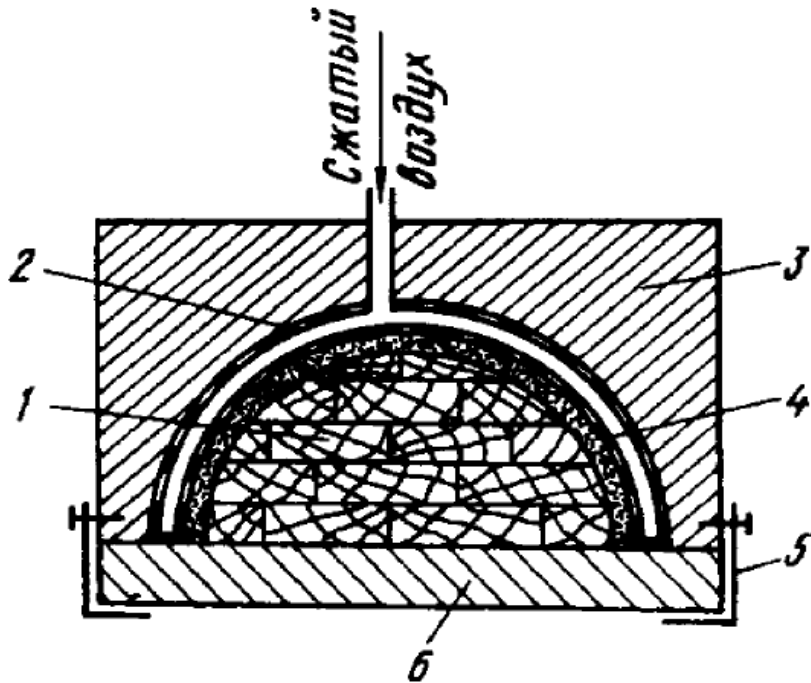


Схема вакуумно-пресс-камерного формования:

1 — форма; 2 — резиновый чехол; 3 — цулага; 4 — прессуемая заготовка; 5 — зажимы; 6 — основание формы



Вакуумно-пресс-камерное формование. Замечания



Режимы термообработки и прессования определяются свойствами компонентов ПКМ, конструкцией и габаритами изделия.

Обычно давление прессования в камере не превышает 0,5 МПа.

Во избежание изменения формы готовое изделие охлаждают под давлением, а затем снимают с формы.

Из-за разности давлений внутри эластичного мешка и окружающего воздуха форма испытывает значительные нагрузки. Поэтому формы для пневматического формования делают более прочными и жесткими, чем при вакуумном формовании.

Этим способом можно формовать практически любые волокнистые и слоистые материалы.



2.4. Особенности конструирования деталей с учетом технологии контактного формования и формования с эластичной диафрагмой



Может показаться, что изменить конфигурацию или толщину нового изделия достаточно просто. Однако при формовании деталей в открытой форме эти изменения необходимо осуществлять с учетом всех возможных последствий.

1. Перед формованием детали материал необходимо уложить в форму строго в соответствии с ее очертанием. При наличии острых углов (угол 90° без закруглений) маты не закрывают всю поверхность формы, и за наружным смоляным слоем около углов образуются пузырьки воздуха. При наличии внутренних прямых углов, выполненных без закругления, материал не будет прилегать к поверхности формы. Если же форма имеет наружные прямые углы, КМ также не сможет их плотно охватить.

Для предотвращения этих явлений рекомендуется закруглять внутренние и наружные углы по радиусу 3,00...10,00 мм. В этом случае КМ будет полнее следовать очертанию формы, т.е. драпируемость будет лучше. Места резких переходов поверхности являются зонами концентрации высоких напряжений, где может происходить расслоение и растрескивание материала. Очевидно, что в конструкциях следует избегать таких мест и предусматривать самоупрочняющиеся переходные участки умеренного изгиба.



Особенности конструирования деталей с учетом технологии контактного формования и формования с эластичной диафрагмой

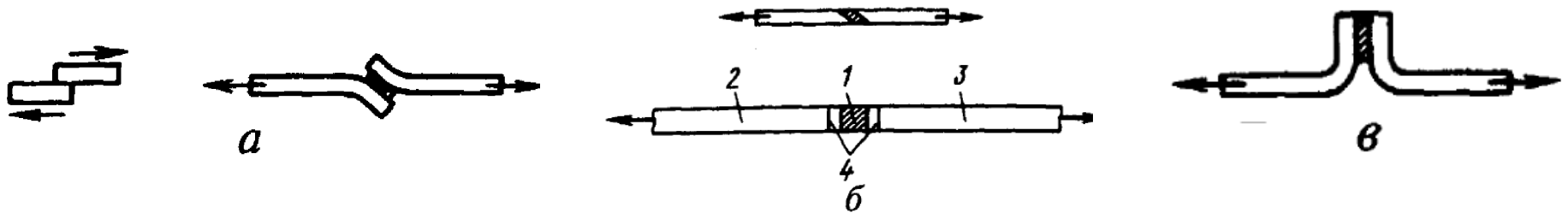


2. Для изменения толщины изделия, формуемого в открытой форме, следует увеличить (или уменьшить) число слоев материала. При необходимости резких изменений слои следует тщательно укладывать точно в соответствии с очертанием формы, что, однако, увеличивает затраты на ручной труд. В местах утолщений происходит концентрация напряжений и, как следствие, расслоение материала. Поэтому надо избегать появления таких высоконапряженных зон. С этой целью рекомендуется толщину изделия изменять постепенно, укладывая слои материала ступенчато или как кровельную черепицу.

3. Наиболее удобным для формования следует считать круглое отверстие; самым неудобным – отверстие с острыми незакругленными углами. Для предотвращения роста напряжений рекомендуется увеличивать радиусы закруглений в углах, а толщину изделия в острых углах увеличивать постепенно или предусматривать фланцы вокруг отверстий.

4. Изделия из ПКМ часто получают соединением нескольких отдельных деталей. Поэтому в зависимости от прочности (от большей к меньшей) следует различать соединения:

- нахлесточные, работающие на сдвиг;
- стыковые;
- косые нахлесточные, работающие на раздир (на расслаивание).



Примеры технологических соединений при склеивании материалов:

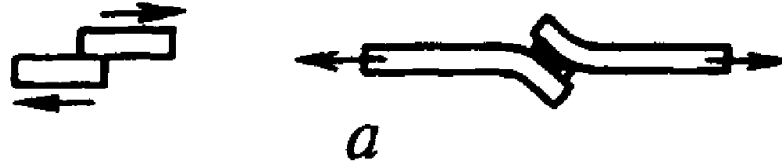
a – нахлесточное; *б* – вскос (в “ус”); *в* – стыковое: *1* – слой клея; *2, 3* – жесткие материалы; *4* – промежуточный слой



Особенности конструирования деталей с учетом технологии контактного формования и формования с эластичной диафрагмой



Нахлесточные соединения являются самыми легкими и широко используемыми при изготовлении деталей из ПКМ (см. рисунок). Их форма и особенности нагружения (на сдвиг) предполагают применение клеев, что обеспечивает максимальную прочность соединения. Разрушение нахлесточного соединения под действием напряжений сдвига происходит тогда, когда при возрастании нагрузки оно начинает работать на раздир.



При увеличении нагрузки происходит поворот места соединения, при этом действующие силы располагаются на одной оси (см. рисунок). Этот поворот приводит к изгибанию материала и расслаиванию его на концах нахлеста. Если нагрузки продолжают расти, расслаивающие напряжения могут превысить адгезионную прочность, и соединение быстро разрушится. Однако если края нахлеста скошены, жесткость конструкции уменьшается и в результате повышается прочность соединения без увеличения площади его поверхности.



Особенности конструирования деталей с учетом технологии контактного формования и формования с эластичной диафрагмой



Более того, при надлежащей подготовке материалов можно получить еще более высокие значения прочности при той же поверхности сдвига, выполнив соединение деталей вскос («в ус») (см. рисунок б).

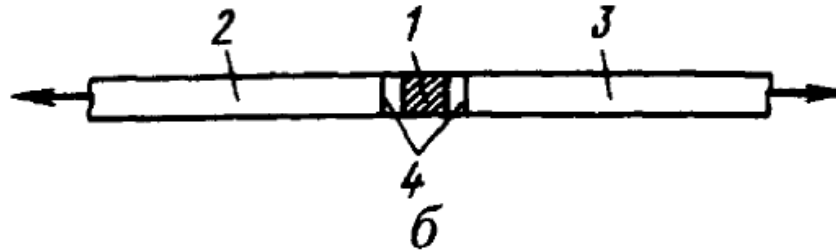




Особенности конструирования деталей с учетом технологии контактного формования и формования с эластичной диафрагмой



Стыковое соединение со слоем клея и промежуточными слоями используют при склеивании жестких материалов, оно работает только на растяжение (рисунок в). Прочность его обычно колеблется от низких до средних значений, и ее легко рассчитать.



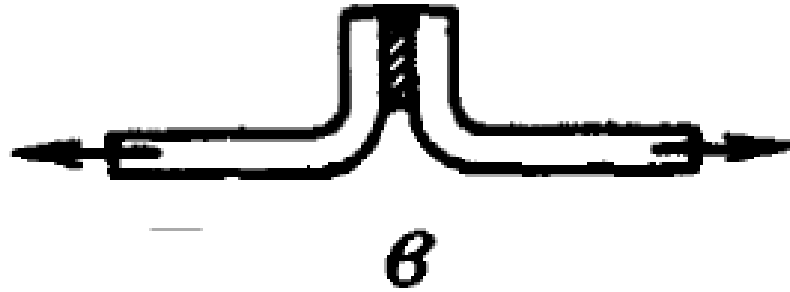
В реальных конструкциях такие соединения встречаются редко.



Особенности конструирования деталей с учетом технологии контактного формования и формования с эластичной диафрагмой



Соединение, работающее на раздир, представляет собой конструкцию, в которой напряжения концентрируются вдоль линии, по которой один склеиваемый материал отгибается от другого, в результате чего в материалах возникают неуравновешенные растягивающие напряжения (см. рисунок в).



В таком соединении под нагрузкой оказывается только тот участок клеевого шва, который находится в точке расслаивания, а остальные участки шва остаются ненагруженными до тех пор, пока до них не дойдет зона расслаивания.



Особенности конструирования деталей с учетом технологии контактного формования и формования с эластичной диафрагмой



5. Минимальный угол технологического уклона должен составлять 2° (нулевой уклон - только в разъемных формах). Поднутрения не желательны, допускаются только в разъемных и резиновых формах.

6. Минимальную реальную толщину изделий при формовании ручной укладкой слоев следует задавать 0,8 мм, при напылении - 1,5 мм.

Максимальная реальная толщина, в принципе, не ограничивается, но с учетом отверждения должна составлять 8... 10 мм.

Стандартная разнотолщинность:

- при формовании ручной укладкой слоев – от +0,8 до -0,4 мм;
- и при напылении — от +0,64 до -0,64 мм.

Максимальное увеличение толщины не ограничивается.



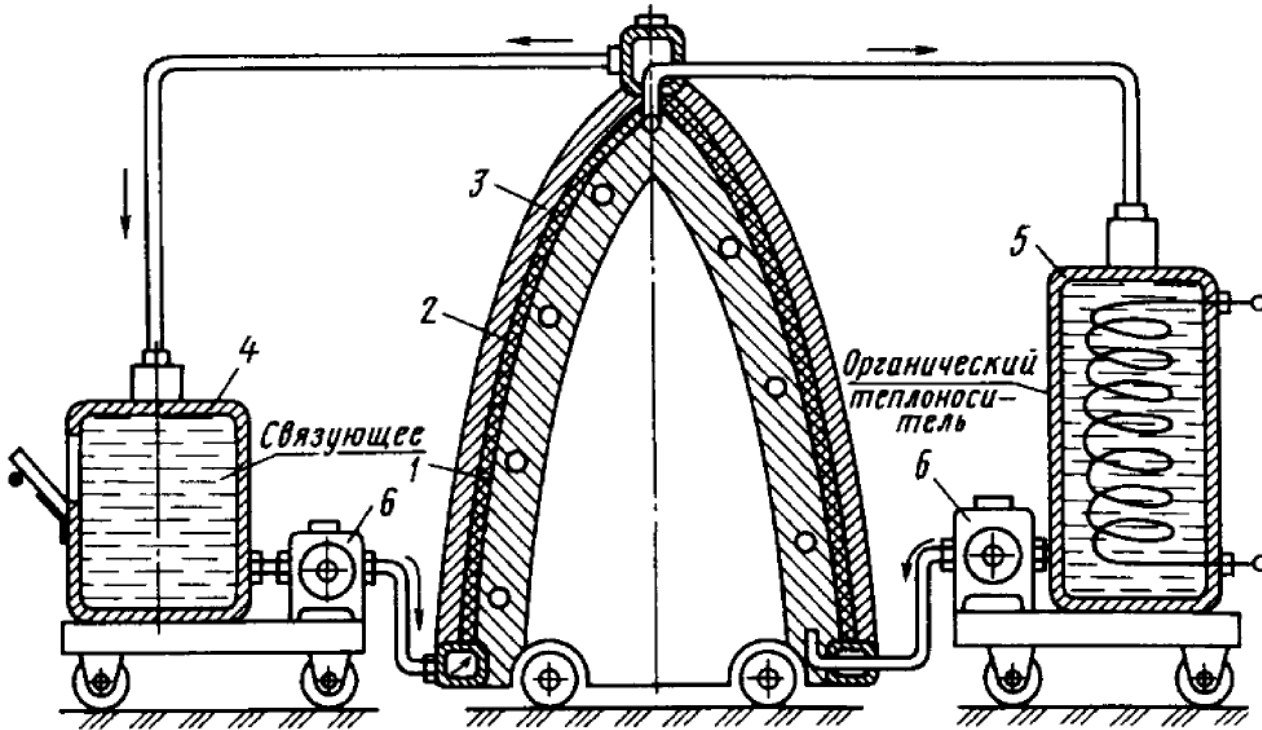
3. Формообразование давлением



Способность смолы растекаться в замкнутом объеме формы под действием давления используют для изготовления изделий с простой симметричной формой.

Этот способ формообразования позволяет получать конструкции с высокой точностью геометрических размеров, постоянной плотностью по объему материала стенки, при этом стенка практически не будет иметь пустот или местных расслоений.

Такие требования необходимо выполнять, например, при изготовлении различных типов обтекателей. В этой области метод и получил наиболее широкое применение.



Сущность этого метода формования заключается в том, что связующее подают под давлением к нижнему отверстию формы и постепенно оно заполняет пространство между матрицей и пуансоном, вытесняя воздух из материала, уложенного на матрицу.

Схема пропитки пакета материала под давлением:

1 – пуансон; 2 – пакет материала; 3 – матрица; 4 – бачок со связующим;
5 – установка для подогрева органического теплоносителя; 6 – компрессор



Формы для метода пропитки под давлением



Способ изготовления форм для пропитки отличается от способа изготовления форм для контактного формования, он более трудоемкий, поскольку требуется обеспечить с высокой точностью зазор между матрицей и пуансоном, равный толщине стенки изделия.

Поэтому для изготовления металлических и неметаллических форм, применяют модель из того же материала и с такой же толщиной стенок, как и у изделия. Эту модель обычно формуют на гипсовой оправке, и она является точным объемным макетом поверхности изделия. Одновременно модель служит технологической оснасткой для изготовления нижней части формы (матрицы) и верхней части (пуансона).

Толщины стенок матрицы и пуансона для конкретного изделия определяют экспериментальным путем.

Подготовка поверхностей матрицы и пуансона заключается в нанесении антиадгезивных смазок или разделительных пленок так же, как и в случае контактного формования. Сухой армирующий материал выкладывают на матрицу до закрытия ее верхней частью формы и свинчивания.

Перед пропиткой материал, уложенный между позитивной и негативной формами, следует высушить. Для сушки через форму пропускают поток горячего воздуха, подаваемый от калорифера.

В некоторых случаях для малогабаритных изделий осуществляют «промывку» армирующего материала той же смолой, которая входит в состав связующего. Таким образом удаляют пузырьки воздуха из материала и тем самым устраняют опасность образования в изделии незаполненных смолой участков. Однако для крупногабаритных изделий операция «промывки» экономически не выгодна.

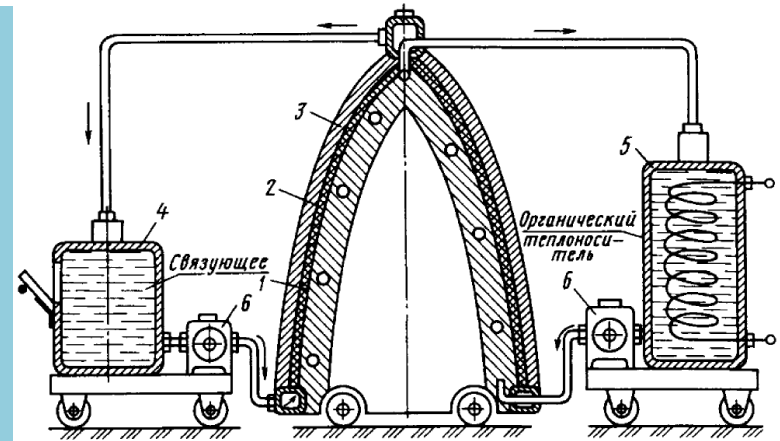


Схема пропитки пакета материала под давлением:
1 – пуансон; 2 – пакет материала; 3 – матрица; 4 – бак со связующим;
5 – установка для подогрева органического теплоносителя; 6 – компрессор

Давление связующего в процессе пропитки, воздействуя на стенки матрицы и пуансона, расширяет зазор между ними и способствует равномерному заполнению связующим армирующего материала. Поэтому в данном случае небольшая неравномерность при укладке материала на матрицу не имеет существенного значения.

Скорость подъема связующего по форме ограничена условиями качественной пропитки.

Если эту скорость превысить, то связующее залетит воздушные пузырьки до того, как они отделятся от волокна. Тогда пузырьки можно удалить только путем «промывки» новой порцией чистой смолы; такая промывка настолько длительна, что полностью обесценивает все другие преимущества процесса.

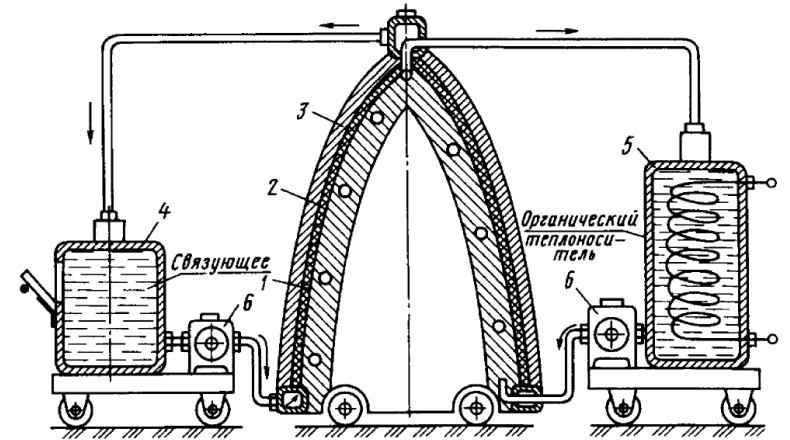


Схема пропитки пакета материала под давлением:
1 – пуансон; 2 – пакет материала; 3 – матрица; 4 – бачок со связующим;
5 – установка для подогрева органического теплоносителя; 6 – компрессор

Для качественной пропитки следует:

- регулировать и контролировать температуру,
- вязкость и скорость, с которой поднимается связующее.

После того, как связующее появляется в выводных отверстиях в верхней части формы, подачу связующего прекращают, и с целью ускорения процесса отверждения форму начинают обогревать.

В некоторых случаях пропитку материала осуществляют в уже разогретой форме, для чего используют соответствующие обогревательные устройства. Иногда в качестве нагревателя используют медную проволоку, обмотанную вокруг формы. В ряде случаев отверждение изделий проводят в печах, в которые помещают форму. Параметры отверждения определяются типом применяемого связующего.

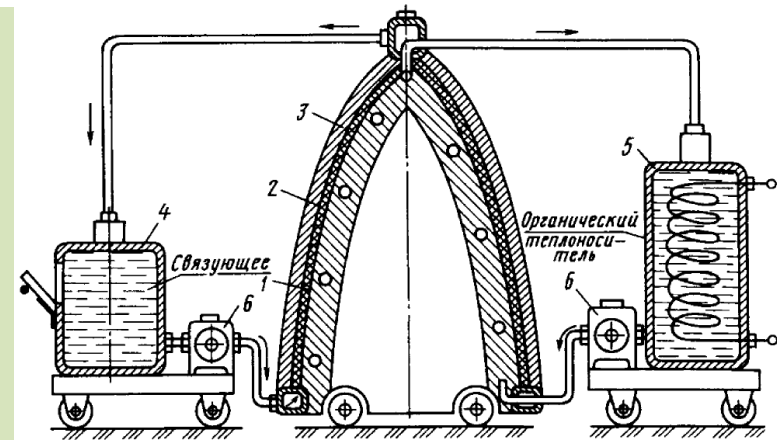


Схема пропитки пакета материала под давлением:
1 – пуансон; 2 – пакет материала; 3 – матрица; 4 – бачок со связующим;
5 – установка для подогрева органического теплоносителя; 6 – компрессор

В том случае, когда требуется обеспечить высокую производительность процесса, применяют короткие рубленые волокна (50...70 мм), предварительно отформованные по форме изделия. Однако в этом случае невозможно получить высокопрочный материал.



Достоинства метода:

- позволяет получать конструкции с высокой точностью геометрических размеров, постоянной плотностью по объему материала стенки, при этом стенка практически не будет иметь пустот или местных расслоений;
- получение качественных гладких поверхностей с обеих сторон изделия.

Недостатки метода:

- более трудоемкий, поскольку требуется обеспечить с высокой точностью зазор между матрицей и пуансоном, равный толщине стенки изделия;
- для качественной пропитки следует регулировать и контролировать температуру, вязкость и скорость, с которой поднимается связующее.

Процесс формования изделий пропиткой в вакууме (технология подготовки формы, укладки материала заготовки) аналогичен процессу формования пропиткой под давлением.

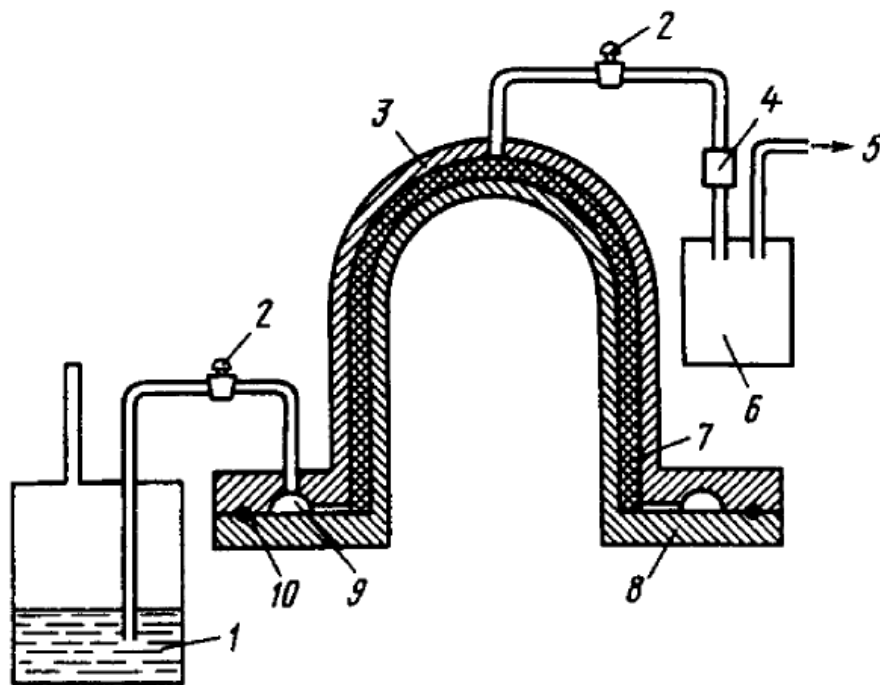
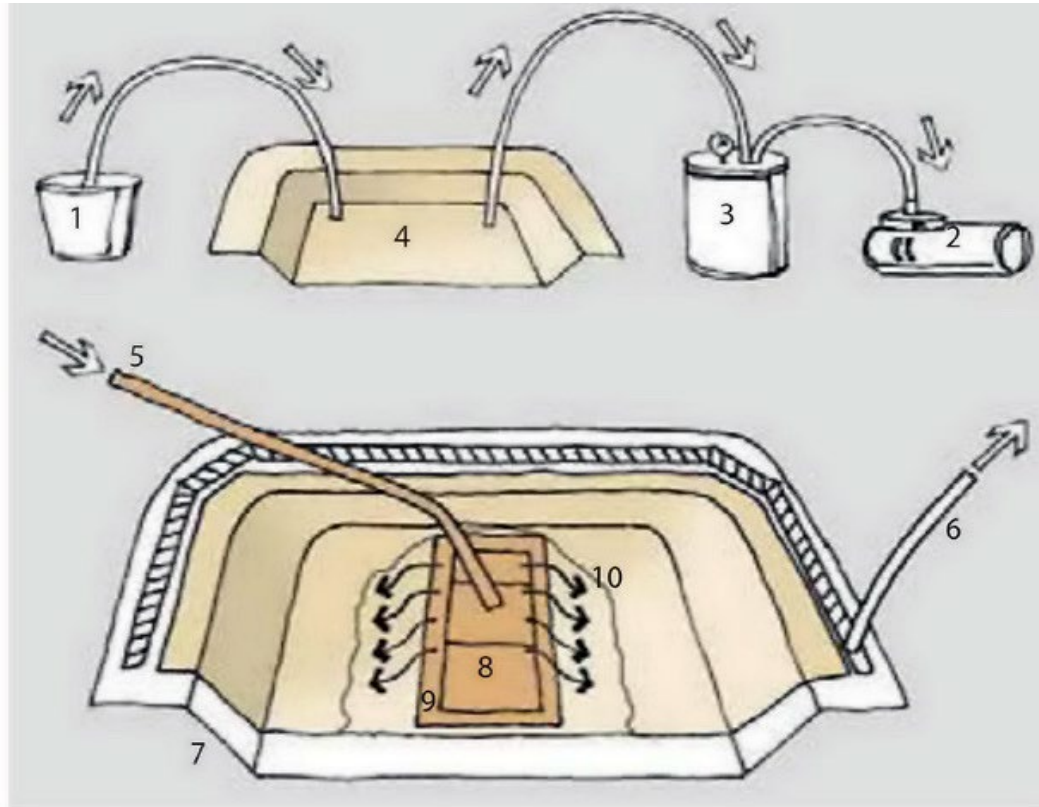


Рис. 2.18. Схема формования:

1 – связующее; 2 – запорное устройство; 3 – пуансон; 4 – смотровое стекло; 5 – вакуумная система; 6 – бачок для излишков связующего; 7 – заготовка; 8 – матрица; 9 – канал для прохождения связующего; 10 – эластичная прокладка



Условная схема организации инфузионного процесса: 1 – емкость со связующим; 2 – вакуумный насос; 3 – емкость для удаления излишков связующего; 4 – формуемая деталь; 5 – трубка для подачи смолы; 6 – вакуумная трубка; 7 – технологическая форма (матрица); 8 – податчик; 9 – подложка; 10 – фронт распространения смолы.

При использовании вакуума элементы формы должны быть достаточно жесткими для предотвращения сдавливания армирующего материала и нарушения свободного протекания смолы при возможном сплющивании матрицы или пуансона.

Если материал по форме расположен неравномерно, то через некоторые уплотненные участки смола проходить не будет, и эти участки останутся непропитанными. По мере приближения смолы к верхнему выводному отверстию необходимо для обеспечения дальнейшего ее движения увеличивать вакуум.

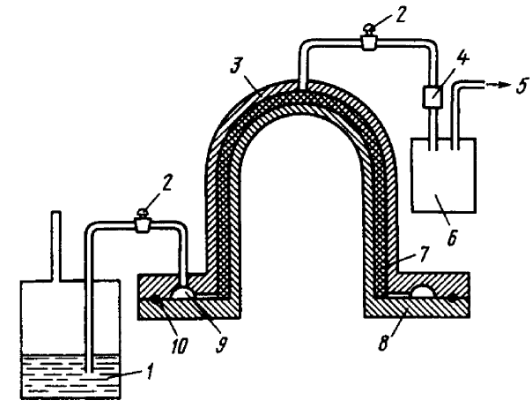
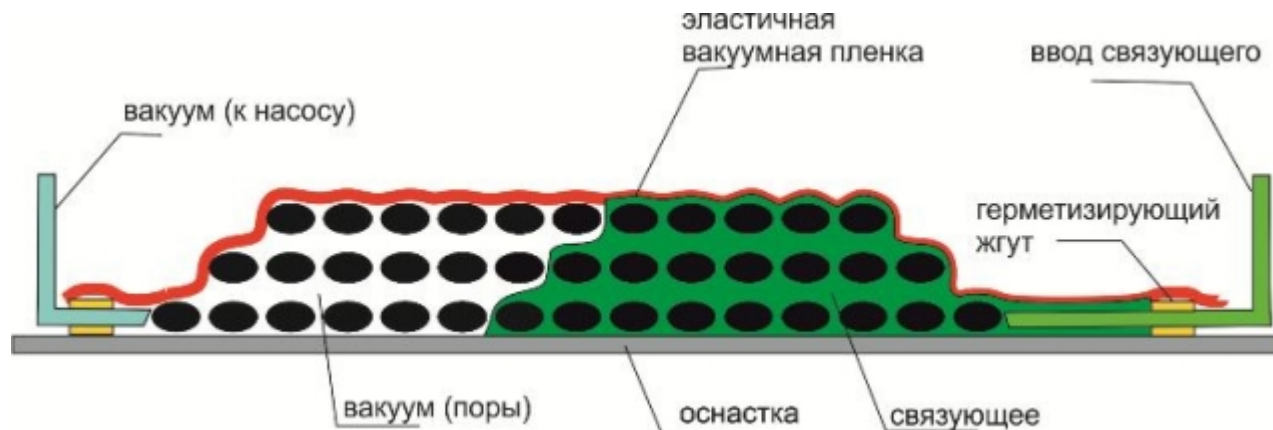


Рис. 2.18. Схема формования:
1 – связующее; 2 – запорное устройство; 3 – пуансон; 4 – смотровое стекло; 5 – вакуумная система; 6 – бачок для излишков связующего; 7 – заготовка; 8 – матрица; 9 – канал для прохождения связующего; 10 – эластичная прокладка

Метод нагнетания связующего в форму отличается от предыдущих прежде всего лучшими условиями труда, так как пропитка армирующего материала связующим осуществляется в герметизированной форме.

С использованием этого метода нагнетания изготавливают крупногабаритные панели кузовов автомобилей, корпуса шлюпок, мелких судов.





Достоинства метода:

- простота оснастки и оборудования;
- хорошие условия труда (токсичные продукты находятся в замкнутых объемах);
- качество материала не зависит от навыков формовщика (как это имеет место при контактном формовании);
- получение деталей, гладких с двух сторон, которые легко окрашиваются в массу, а также монолитных трехслойных панелей;
- большая производительность, чем у методов контактного формования и пульверизации.

Недостатки метода:

- сравнительно малая скорость пропитки армирующего материала;
- необходимость тщательной укладки заготовки в форму;
- увеличение скорости пропитки за счёт повышения давления на связующее приводит к необходимости повышения жесткости.



Метод нагнетания (вакуумной инфузии) (4)



Заготовка в виде сухого пакета из слоистого армирующего материала или полученная с помощью предформовочной машины помещается между спаренными половинами формы, которая затем закрывается и герметизируется (половины стягиваются болтами, струбцинами или специальными пневмозажимами).

Вакуумным насосом из верхней части формы откачивается воздух, а в нижнюю подается связующее (самотеком или под давлением), которое заполняет литниковый канал (обычно по периметру изделия) и пропитывает (точнее, заполняет все зазоры между волокнами) заготовку. По окончании пропитки трубопроводы отсоединяются от формы, и она остается в закрытом состоянии до отверждения связующего. Процесс отверждения можно ускорить, поместив в термокамеру или включив систему ее обогрева.



Метод нагнетания (вакуумной инфузии) (5)



Форма для получения изделий этим методом должна быть герметично закрываемой и достаточно жесткой, чтобы в процессе нагнетания связующего зазор между ее элементами оставался постоянным. В форме должен быть предусмотрен литниковый канал – питатель и штуцеры для подачи связующего и откачки воздуха.

Формы из стеклопластика применяют в мелкосерийном производстве. Они просты в изготовлении, легки и имеют невысокую стоимость. При больших объемах производства применяют формы из легкоплавких цветных сплавов (цинково-алюминиевые, свинцово-цинковые и др.). Наиболее перспективными являются многогнездные формы с обогревом (обычно односторонним).



4.1. Формообразование прессованием в формах



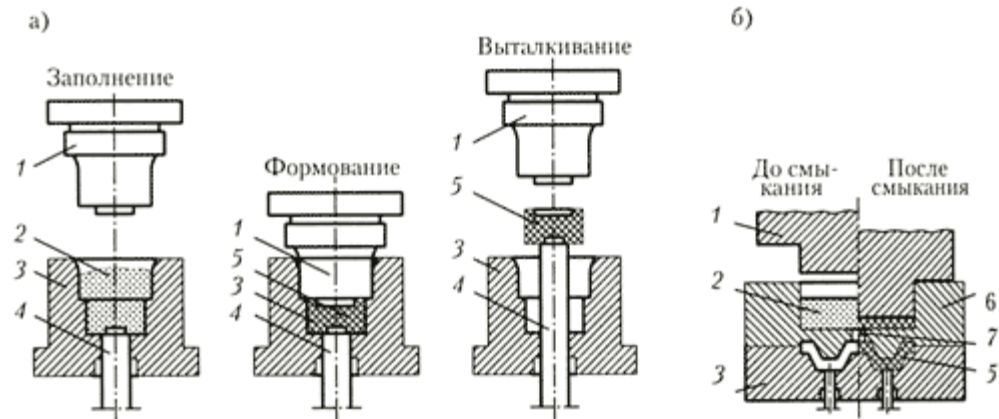
В общем случае метод формования изделий прессованием – это процесс, при котором материал в пресс-форме принимает заданную конфигурацию, определяемую матрицей и пуансоном, причем отверждение его происходит в форме.

В настоящее время около 50% всех изделий из армированных пластмасс получают этим методом. Его применяют в том случае, когда требуются высокая производительность, точность и воспроизводимость деталей. При этом достигается высокое качество изделий при минимальной стоимости. Но даже если объем производства невелик, например при получении деталей аэрокосмических аппаратов и других изделий с высокими эксплуатационными свойствами, требования к точности и воспроизводимости деталей заставляют использовать методы формования в пресс-формах.

Для всех случаев формования используют пресс-формы. Форма или комплект формующих деталей обычно состоит из двух основных частей:

- матрицы;
- пуансона,

причем одна из них входит в другую при смыкании формы с соблюдением заданного зазора между ними, равного толщине формуемой детали.





Метод прессования применяют только в крупносерийном и массовом производствах. Он выгоден только тогда, когда объем производства достигает уровня, при котором амортизационные отчисления на оснастку и оборудование будут экономически оправданы.

Достоинства метода:

- высокая производительность;
- возможность получения изделий с высоким качеством поверхности и отсутствием пор;
- возможность получения анизотропного материала при высокой производительности.

Недостатки метода:

- осуществляется с помощью крупногабаритного, дорогого прессового и вспомогательного оборудования;
- сложность обеспечения равномерного распределения нагревательных элементов на крупногабаритных изделиях сложной формы.



К вспомогательному оборудованию относятся:

- машины для предварительного формования заготовок из стеклянного волокна;
- дозаторы и смесители для приготовления связующего;
- манипуляторы для загрузки и разгрузки;
- шаблоны для охлаждения отформованных изделий (чтобы они не коробились) и т. д.

Чтобы получить крупногабаритные глубокие изделия, используют предварительно отформованные заготовки из рубленого стекловолокна. Предформовочные машины работают по принципу насасывания рубленого стекловолокна на вращающуюся сетчатую форму, соответствующую по конфигурации и размерам будущему изделию, и скрепления его небольшим количеством связки, растворимой в полиэфирном связующем.



Формообразование прессованием в формах



В зависимости от применяемого армирующего материала, конструкции формы, способа загрузки материала в форму различают три основных метода формообразования изделий из ПКМ:

- прямое прессование;
- литьевое прессование;
- термокомпрессионное прессование.

Особенности технологии изготовления деталей этими методами описаны ниже.



Прямое прессование



Метод прямого прессования армированных композиций несущественно отличается от формования пластмасс. Главное различие заключается в природе самого материала, из которого прессуется деталь.

Вместо свободно текущих смол или порошков на формование поступает:

- липкая волокнистая масса,
- таблетированные ПКМ,
- пропитанные маты, ткани или предварительно отформованные заготовки из ПКМ,
- Премиксы.

Премикс — армированная волокном терморезистивная композиция, которая после получения не нуждается в дальнейшем отверждении и может быть отформована при приложении давления, достаточного только для течения и уплотнения материала.



Прямое прессование



Для прессования изделий из ПКМ в большинстве случаев применяют гидравлические прессы, так как они обеспечивают постоянное давление на прессуемую деталь в течение всего времени прессования и, кроме того, они проще и надежней в эксплуатации, чем механические прессы. Гидравлические прессы приводятся в действие давлением жидкости (воды или масла), подаваемой насосом в цилиндр пресса.

Обычно используют гидравлические прессы с одним рабочим цилиндром (с нижним или верхним расположением) или с двумя рабочими цилиндрами (вертикальные и угловые).

На рисунке ниже показана схема устройства гидравлического пресса с нижним расположением рабочего цилиндра.

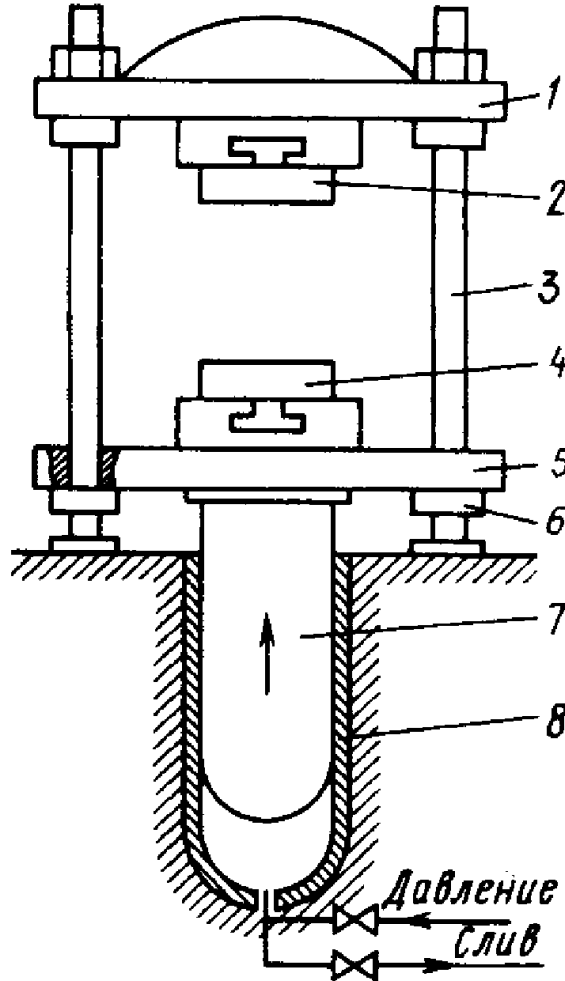


Схема устройства гидравлического пресса нижнего давления:

1 – верхняя неподвижная плита (траверса); 2 – пуансон; 3 – направляющая колонна; 4 – матрица; 5 – нижняя подвижная плита (стол); 6 – станина; 7 – рабочий плунжер; 8 – гидравлический цилиндр



Схема устройства гидравлического пресса с нижним расположением рабочего цилиндра



Верхняя плита и станина пресса, связанные между собой колоннами, воспринимают усилие пресса, развиваемое плунжером рабочего цилиндра.

Установленная на нижнюю подвижную плиту пресс-форма с загруженным в нее материалом при подъеме плунжера прижимается к верхней неподвижной плите и материал в пресс-форме подвергается прессованию.

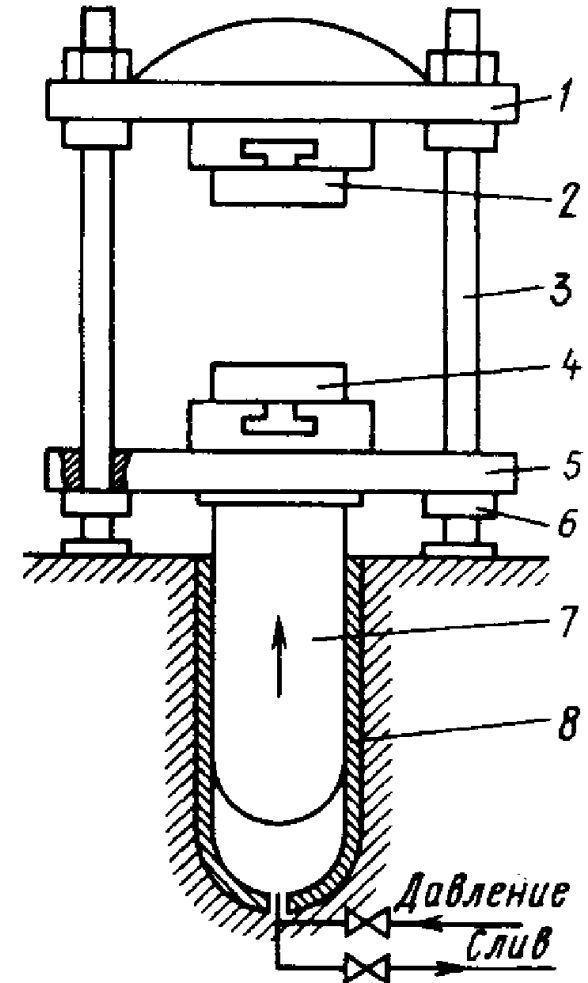


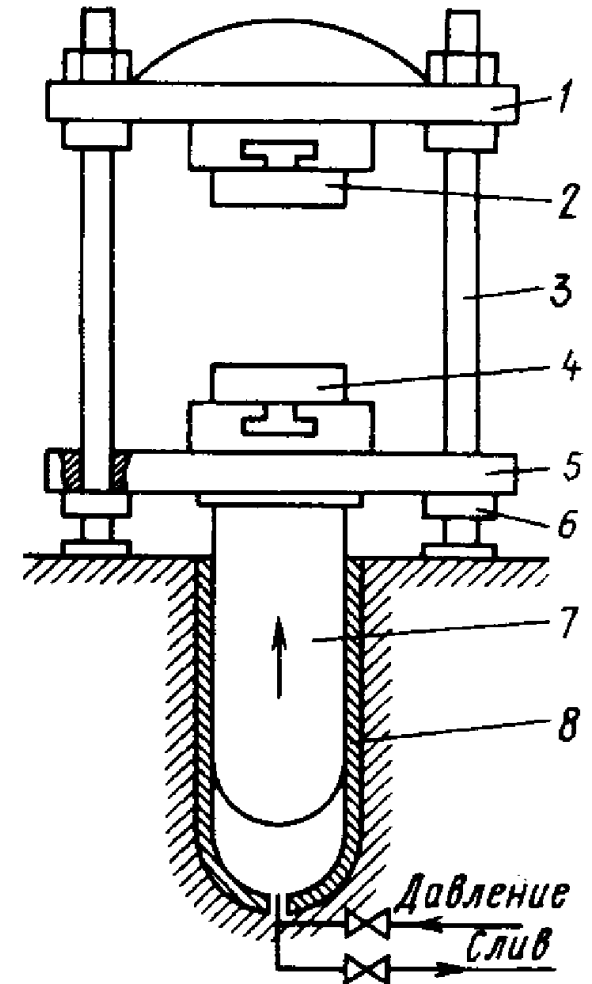


Схема устройства гидравлического пресса с нижним расположением рабочего цилиндра

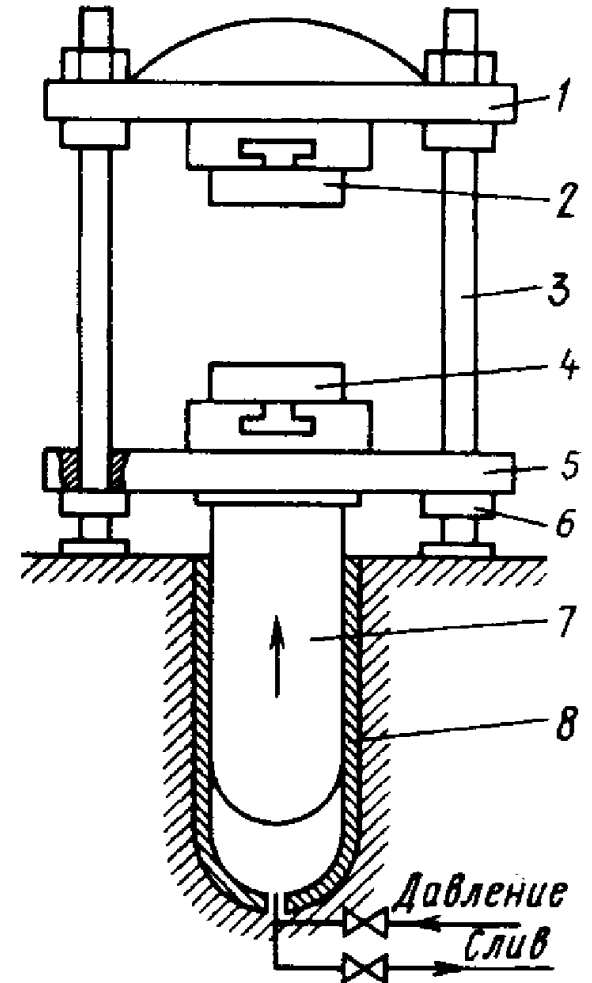


При прекращении подачи воды в рабочий цилиндр и сообщении его со сливной магистралью плунжер пресса и подвижная плита силой своего веса вытесняют жидкость из рабочего цилиндра и опускаются.

Прессы с нижним давлением чаще всего используют для прессования изделий в съемных пресс-формах. Такие прессы иногда имеют промежуточные подвижные плиты, которые называют этажными.



Для нагревания съемных пресс-форм на нижней подвижной плите и верхней неподвижной плите пресса закрепляют обогревательные плиты, изолированные с опорной поверхности теплоизоляционными прокладками. Промежуточные подвижные плиты этажных прессов также имеют обогрев.



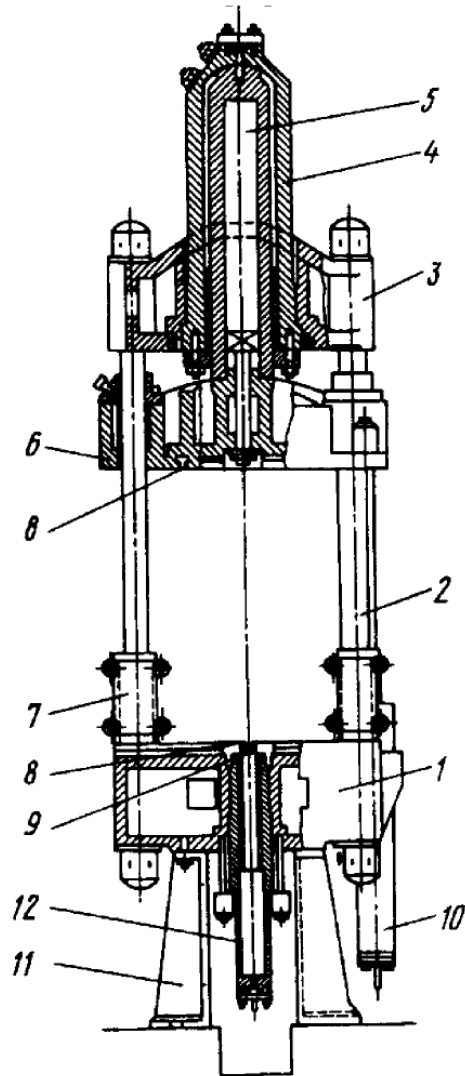


Схема устройства гидравлического прессы с верхним расположением рабочего цилиндра:

1 – станина (нижняя подвижная плита или рабочий стол); *2* – колонна; *3* – верхняя неподвижная плита (головка); *4* – рабочий цилиндр; *5* – плунжер; *6* – верхняя подвижная плита; *7* – упоры; *8* – пазы в верхней подвижной и нижней неподвижной плитах для закрепления пресс-формы; *9* – выталкиватель; *10* – цилиндры обратного хода (ретурные цилиндры); *11* – опорные рамы; *12* – цилиндр выталкивателя

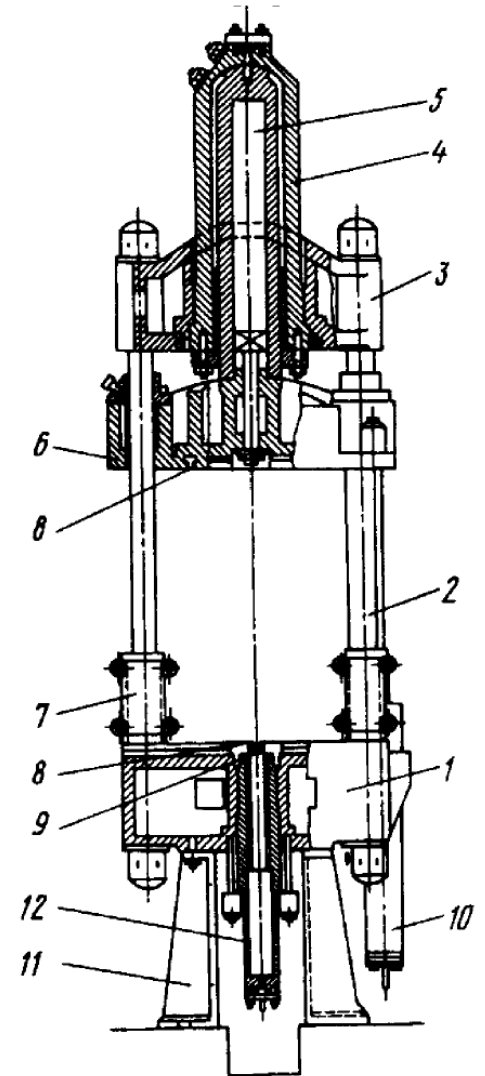


Прессы с верхним расположением рабочего цилиндра



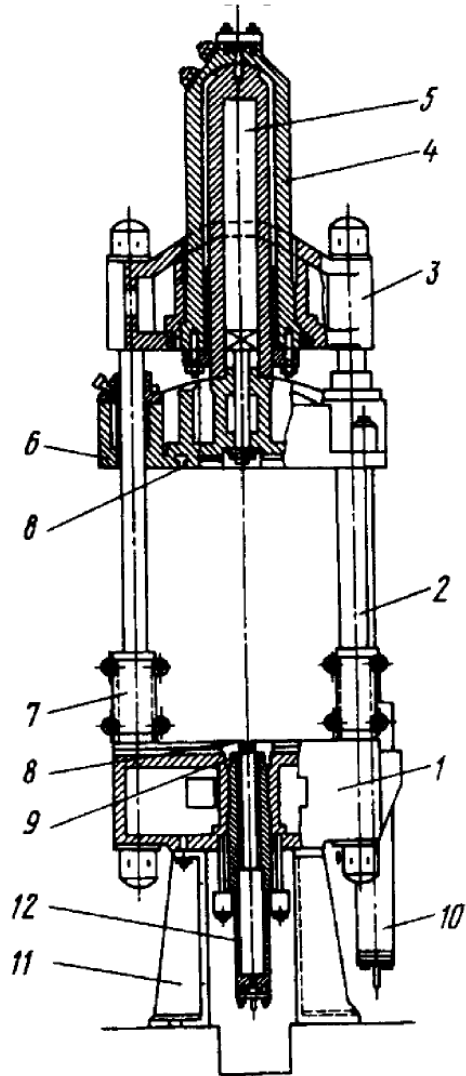
Прессы с верхним расположением рабочего цилиндра, т.е. прессы с верхним давлением, применяют главным образом для прямого прессования деталей из ПКМ в стационарных пресс-формах.

Отличие этих прессов от прессов с нижним рабочим давлением состоит в том, что они имеют вспомогательные цилиндры обратного хода (ретурные цилиндры) и цилиндр выталкивателя, закрепленные на нижнем неподвижной плите.





Прессы с верхним расположением рабочего цилиндра



Ретурные цилиндры служат для подъема подвижных рабочих частей пресса – верхней подвижной плиты и плунжера. Цилиндр выталкивателя обеспечивает извлечение отпрессованных деталей из пресс-формы.

Прессы с верхним расположением рабочего цилиндра, как правило, бывают только одноэтажные.

Основным элементом технологического оснащения процесса прессования является пресс-форма, сложность и стоимости которой определяют качество и себестоимость изделия.



Классификация пресс-форм



Пресс-формы в соответствии с методом прессования подразделяют на:

- пресс-формы для обычного прессования (компрессионные);
- и литые для литьевого прессования.

Пресс-формы по характеру эксплуатации подразделяют на:

- съемные,
- полусъемные;
- стационарные.



Классификация пресс-форм



В зависимости от числа оформляющих гнезд (числа одновременно прессуемых деталей) пресс-формы подразделяют на:

- одногнездовые;
- многогнездовые.

В соответствии с принципом устройства оформляющего гнезда пресс-формы для прямого прессования подразделяют на:

- открытые,
- полузакрытые,
- закрытые.

Рассмотрим эту классификацию более подробно.



Пресс формы открытого типа



Такие пресс-формы не имеют загрузочной камеры, уплотнение прессуемого в них материала достигается за счет трения, которое возникает при вытекании материала из оформляющего гнезда через зазор между пуансоном и матрицей.

Поэтому для прессования в открытой пресс-форме необходим значительный избыток материала (до 10...15 %).

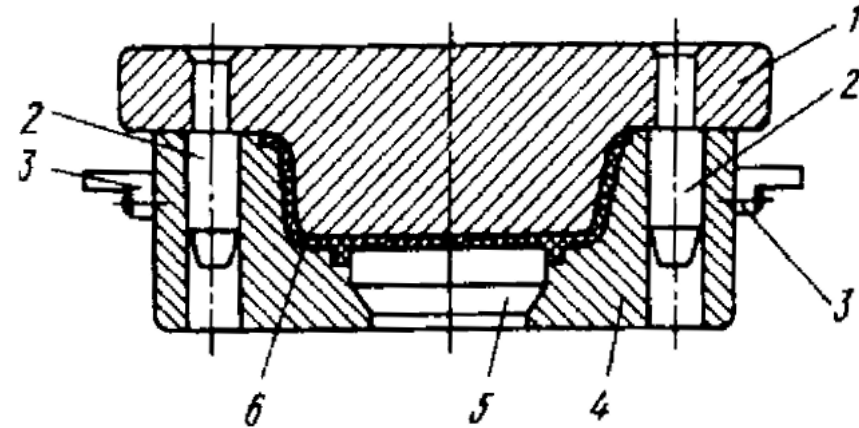


Схема съемной пресс-формы открытого типа:
1 – пуансон; 2 – направляющая колонна; 3 – ручки; 4 – матрица; 5 – выталкиватель; 6 – заготовка

Так как сопротивление вытеканию материала постоянно изменяется по мере уменьшения зазора между пуансоном и матрицей и зависит от свойств материала, то применение открытых пресс-форм для прессования изделий из терморезистивных пластических масс возможно только в случае прессования несложных изделий с небольшой высотой вертикальных стенок.

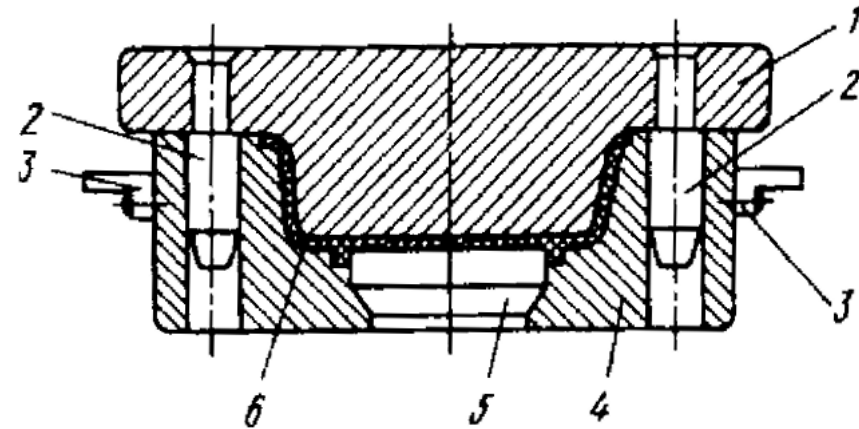


Схема съемной пресс-формы открытого типа:
1 – пуансон; 2 – направляющая колонна; 3 – ручки; 4 – матрица; 5 – выталкиватель; 6 – заготовка

Детали, отпрессованные в открытых прссс-формах, имеют низкую точность по высоте.

Пресс-формы полузакрытого типа, или пресс-формы с перетеканием. В них, как и в пресс-формах открытого типа необходимое уплотнение достигается за счет трения, возникающего при вытекании материала из оформляющего гнезда.

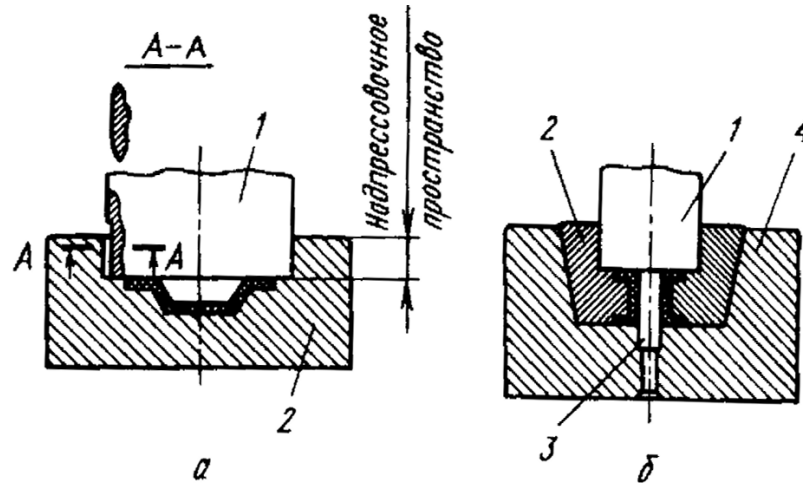


Схема пресс-формы полузакрытого типа:
a – с горизонтальной плоскостью разреза; *б* – с вертикальной плоскостью разреза; 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – вкладыш; 4 – обойма

Однако зазор, через который вытекает материал, регламентирован и остается практически постоянным в течение всего процесса формования.

Такие пресс-формы обеспечивают большую степень уплотнения прессуемого материала, чем пресс-формы открытого типа, что позволяет оформлять в них сложные детали. В полузакрытых пресс-формах матрицы имеют надпрессовочное пространство — загрузочную камеру, являющуюся продолжением оформляющего гнезда.

Загрузочная камера служит для того, чтобы поместить в нее навеску пресс-материала. Для прессования в полузакрытых пресс-формах необходим меньший избыток материала, чем при прессовании в открытых пресс-формах.

Полузакрытые пресс-формы применяют главным образом для прессования изделий из пластических масс.

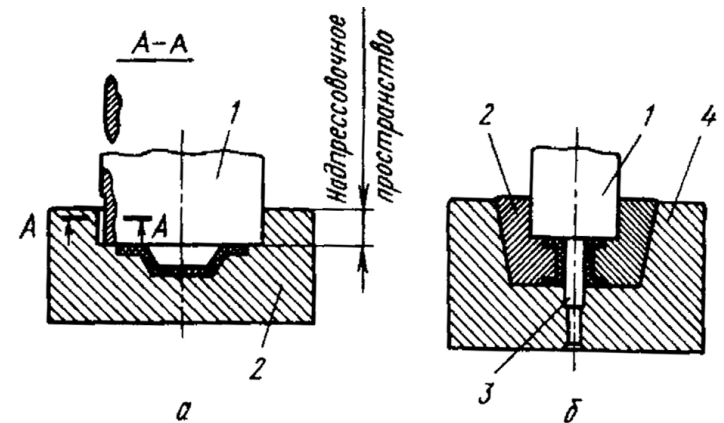


Схема пресс-формы полузакрытого типа:
а — с горизонтальной плоскостью разреза; *б* — с вертикальной плоскостью разреза; 1 — пуансон; 2 — матрица; 3 — вкладыш; 4 — обойма

Закрытые (поршневые) пресс-формы. Характерно, что во время прессования материал практически не вытекает из оформляющего гнезда. Очертания пуансона таких пресс-форм в плане точно соответствуют очертаниям изделия. Это усложняет изготовление пресс-форм и обуславливает их сравнительно низкую эксплуатационную стойкость.

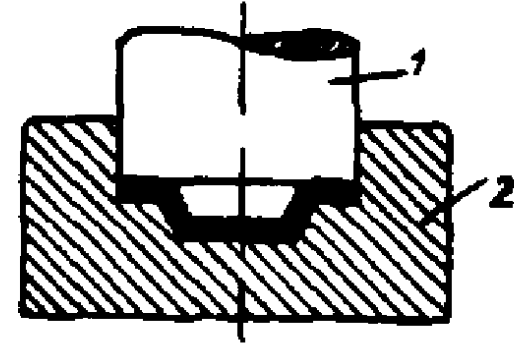


Схема пресс-формы закрытого типа:
1 – пуансон; 2 – матрица

Однако в таких пресс-формах достигается большее уплотнение материала при постоянном давлении на него со стороны пуансона в течение всего времени прессования.

При прессовании в закрытых пресс-формах необходимо точно выбрать навеску прессуемого материала.



Для промышленного производства в основном применяют металлические пресс-формы, изготовленные из износостойкой закаленной стали типа 4X13, У8А, ХВГ, 12ХНЗА, У10А и других.

Качество поверхности пресс-форм для изготовления армированных композиций обязательно должно быть высоким.

Наличие наполнителей накладывает определенные ограничения на шероховатость и глянец прессованного изделия независимо от качества полированной поверхности формы.

Тем не менее для защиты формы от коррозии, лучшего отделения готовых изделий, удаления следов инструментов от механической обработки ее поверхность желательно хромировать (толщина покрытия 10...25 мкм).

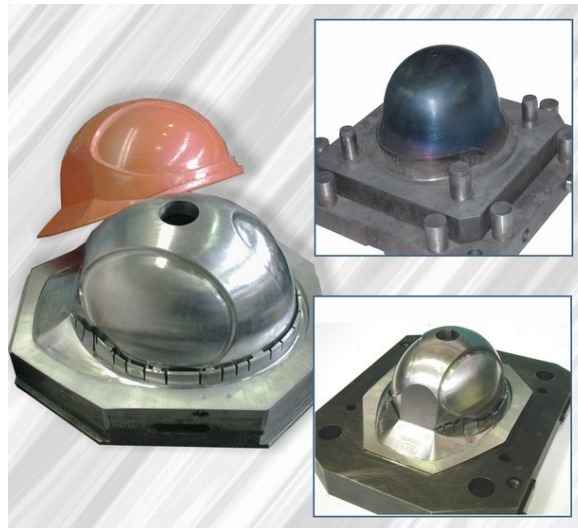


Общие характеристики пресс-форм



Для проведения опытных запрессовок или для прессования нескольких изделий возможно использование деревянных, пластмассовых или гипсовых форм.

При небольших давлениях прессования формы можно изготавливать из цветных сплавов методом литья, но они имеют короткий срок службы, хотя и более дешевы, чем стальные.





Стадия извлечения изделий из формы является самой критической в процессе формования. Для облегчения этой операции:

- во-первых, необходимо на этапе разработки конструкции учитывать технологию ее изготовления;

- во-вторых, применять антиадгезионные смазки или разделительные материалы, которые препятствуют прилипанию изделия к поверхности формы.



Материалы, употребляемые в качестве антиадгезивов, можно подразделить на два типа:

- 1) пленочные материалы или растворы, образующие защитную пленку;
- 2) жидкие или твердые вещества, размягчающиеся при температуре прессования и не образующие непрерывной пленки.

К первой группе относятся растворы поливинилового спирта в воде, растворы альгината натрия, целлофан, лавсан, фторопласт и другие материалы. Во всех случаях пленка оказывает влияние на образование дефектов поверхности отформованного изделия.

Вторую группу составляют смазывающие пленки, более удобные для нанесения на оснастку: воск, парафин, кремнийорганические смазки (типа К.-21), нефтяные остатки и т.п.



При выборе антиадгезивов необходимо учитывать:

- 1) температуру формования;
- 2) воздействие их на связующее формуемого изделия.

Основными параметрами процессов прессования являются:

- температура,
- давление,
- время.



4.2 Прямое прессование



Полуфабрикат в процессе формования необходимо нагревать до определенной температуры, чтобы придать ему требуемую пластичность, т.е. способность к формообразованию.

Для терморезистивных ПКМ нагревание необходимо также и для отверждения. Однако возможность повышения температуры формования всегда ограничена температурой деструкции и разложением связующих.

Нагрев и охлаждение крупногабаритных изделий осуществляется нагревателями, расположенными в пресс-формах. В других случаях нагревательные устройства могут быть расположены как в самих пресс-формах, так и вне: в верхней и нижней плитах пресса. Время отверждения изделий должно быть всегда больше времени, необходимого для заполнения материалом данной пресс-формы.



Прямое прессование



В процессе формования давление необходимо для уплотнения разогретого пластичного материала и придания ему конфигурации изделия. Давление на материал должно оказываться течение всего времени, пока отформованное изделие не потеряет пластичность и не станет твердым в результате нагрева (для терморезактивных композиций) или в результате охлаждения (для композиций на основе термопластов).

Время процесса определяется скоростью разогрева материала до пластического состояния и, главным образом, скоростью отверждения или скоростью охлаждения.



Прямое прессование. Замечания



Указанные три основных параметра процесса формования:

- температура,
 - давление,
 - время,
- являются взаимосвязанными.

Изменение одного параметра влечет за собой изменение других.

Например, повышение температуры формования термопластов улучшает их пластичность и, следовательно, уменьшает необходимое давление и длительность формования.

Основные параметры процесса определяют в каждом конкретном случае в зависимости от компонентов ПКМ, схемы армирования композита, геометрии и формы изделия и отрабатывают опытным путем.

Прямое прессование заключается в том, что тот или иной прессовочный материал помещают в матрицу, нагретую до температуры формования, на который действует давление $P_{пр}$ верхней половины пресс-формы — пуансона, нагретой до такой же температуры. Под воздействием температуры материал приобретает необходимую пластичность и под давлением распределяется по оформляющей полости, заполняя ее.

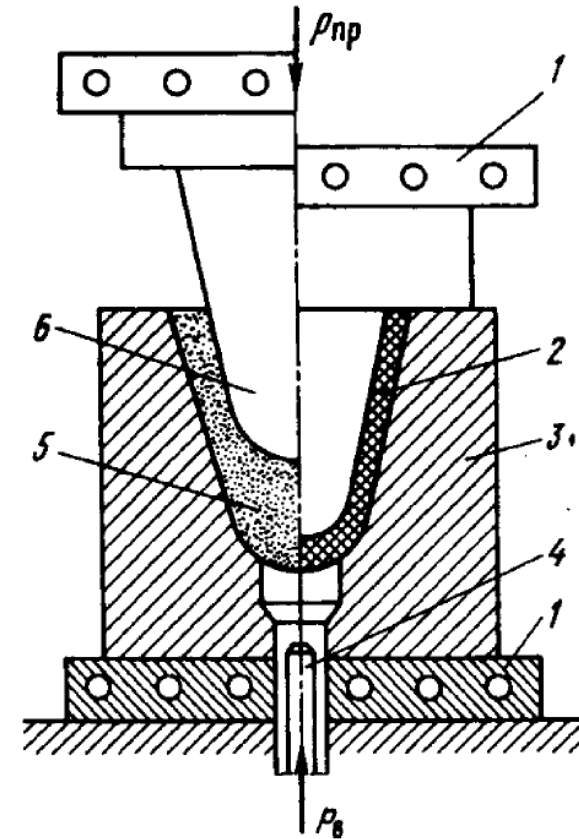


Схема прямого прессования:

1 — плиты обогрева; 2 — прессуемая деталь; 3 — матрица; 4 — выталкиватель; 5 — навеска полуфабриката; 6 — пуансон

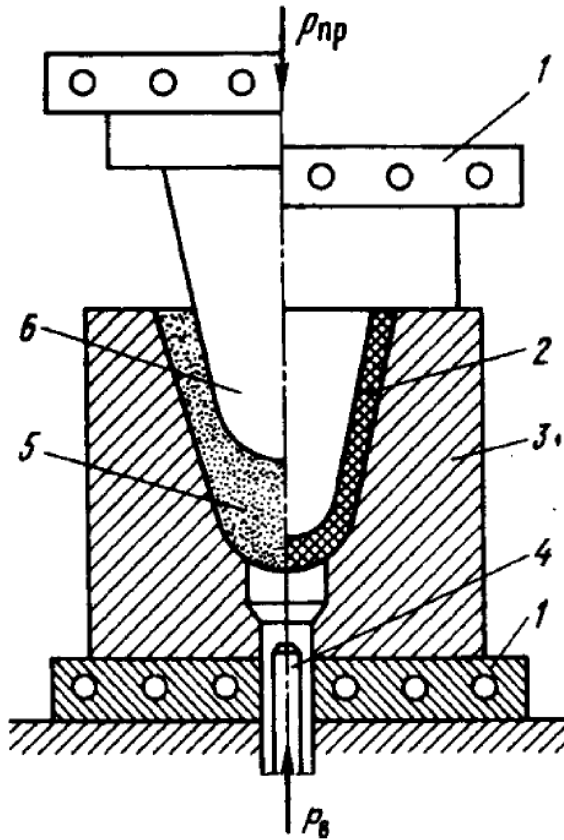


Схема прямого прессования:

1 – плиты обогрева; 2 – прессуемая деталь; 3 – матрица; 4 – выталкиватель; 5 – навеска полуфабриката; 6 – пуансон

Полное закрытие формы (замыкание) происходит в момент окончательного оформления детали. Замыкание пресс-формы осуществляется с малой скоростью, чтобы воздушные включения были вытеснены из полости.

Отформованное изделие выдерживают в пресс-форме под давлением в течение некоторого времени, необходимого для охлаждения термopластичного композита или нагрева терморeактивного материала, после чего пресс-форму открывают, и изделие извлекают с помощью выталкивателя с усилием P_B .



Прямое прессование



При неправильном выборе режимов прессования или некачественных материалах в изделиях могут появиться следующие дефекты:

- пузырьки воздуха вокруг выступающих участков на поверхности детали;
- места, содержащие недостаточное количество связующего из-за избытка армирующего наполнителя;
- растрескивание связующего и места, содержащие его избыток;
- матовая поверхность и пятна на изделии.

Каждый дефект имеет свои причины возникновения; рекомендации по их устранению обычно отражают в таком документе, как технологический регламент.



Особенности прямого прессования



Рассмотрим особенности прямого прессования.

а) При оформлении детали можно запрессовать в нее разнообразную арматуру (винты, гайки, стержни и т.п.), которая будет прочно удерживаться в детали.

б) Прогревание материала происходит постепенно от стенок нагретой пресс-формы вглубь, и, следовательно, в процессе формования изделия различные слои материала могут иметь разную температуру.

в) Разность температуры по толщине изделия приводит к образованию внутренних напряжений и дефектов в результате неравномерного протекания процесса отверждения или вулканизации.



г) Имеется опасность повреждения тонких и малопрочных оформляющих элементов пресс-формы или впрессовываемой в деталь арматуры, так как материал под давлением начинает заполнять оформляющую полость еще до того момента, когда он весь прогреется и приобретет достаточную пластичность. Для устранения этой опасности в большинстве случаев программируют режим давления и применяют несколько предварительных подпрессовок. Кроме того, с помощью подпрессовки удаляют летучие и пары влаги за короткий промежуток времени начальной стадии отверждения материала.

д) На отформованных изделиях всегда образуются заусенцы (град) в плоскости разъема пресс-формы.



Прямое прессование. Замечания



Методом прямого прессования можно изготавливать изделия из любых материалов, как термопластичных, так и терморезистивных.

Практически этот метод применяют главным образом для изготовления деталей из терморезистивных КМ. Использование его для формования деталей из термопластов нецелесообразно, так как в этом случае необходимо попеременно нагревать и охлаждать пресс-форму в течение каждого цикла формования, а это в значительной степени увеличивает длительность процесса.



Примерные режимы прямого прессования деталей, на которые ориентируются при отработке процесса формования, приведены в таблице

Примерные режимы прямого прессования

Наименование материала	Температура, К	Удельное давление min/max, МПа	Время выдержки, мин	Усадка, %
Термопластичные КМ	393-523	2/15	5-15	1-3
Эластомеры	343-473	0,4/25	3-60	1-2
Термореактивные КМ	393-473	3,0/75	3-15	0,2-1,2
Премиксы	393-473	3,5-7,0	1-3	0,5-1,0

Различные методы пропитки армирующего материала и режимы прессования позволяют получить содержание наполнителя в композите от 20 до 50 %.



4.3 Литьевое прессование



Литьевое прессование заключается в том, что прессуемый материал загружают в загрузочную камеру предварительно замкнутой пресс-формы.

Нагреваясь от стенок загрузочной камеры и приобретая при этом необходимую пластичность, материал под давлением литьевого пуансона поступает через литниковый канал в оформляющую полость пресс-формы и заполняет ее.

После выдержки, необходимой для затвердевания, пресс-форму раскрывают и извлекают готовое изделие вместе с литниковым остатком.

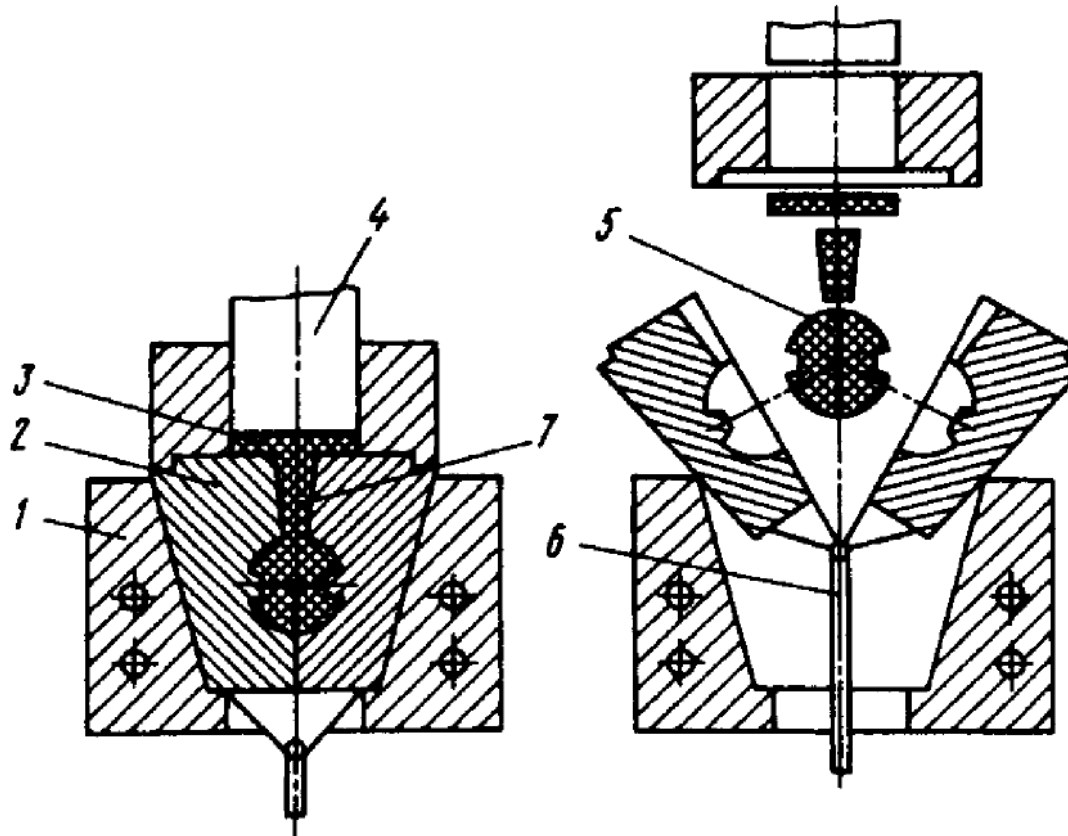


Схема пресс-формы для литейного прессования на прессах с одним рабочим цилиндром:

1 – коническая обойма матрицы; *2* – клиновидная матрица; *3* – загрузочная камера; *4* – литейной пуансон; *5* – отформованное изделие; *6* – выталкиватель; *7* – литниковый канал



а) можно изготавливать детали с малопрочной или сквозной арматурой и детали с глубокими отверстиями малого диаметра, так как материал поступает в оформляющую полость пресс-формы уже в пластичном состоянии и не в состоянии оказать на оформляющие элементы пресс-формы и впрессовываемую арматуру значительных сил деформации;

б) процесс формования материала протекает быстрее, чем при обычном прессовании;

в) в деталях, полученных литьевым прессованием, не возникают большие внутренние напряжения вследствие меньшего перепада температур по толщине стенок детали;



г) на деталях, изготовленных литьевым прессованием, практически не остается грата (заусенцев), так как оформляющая полость пресс-формы, образуемая пуансоном и матрицей, плотно замыкается еще до заполнения ее материалом. Точность соблюдения размеров деталей при этом методе высокая, а механическая доработка деталей сводится только к отрезке литников и зачистке мест сраза;

д) при литьевом прессовании расходуется больше материала, чем при прямом прессовании, так как материал заполняет литниковые каналы и в загрузочной камере запрессовывается его остаток;

е) пресс-формы для литьевого прессования сложнее и дороже пресс-форм для прямого прессования.



Методом литьевого прессования можно изготавливать изделия из резиновых смесей и порошкообразных пластических масс.

Пластмассы с волокнистыми наполнителями теряют до 50 % своей прочности.

Слоистые пластики перерабатывать литьевым методом нельзя, так как материал не в состоянии пройти из загрузочной камеры пресс-формы в ее оформляющую полость через узкие литниковые каналы.



Особенности пресс-форм для литьевого прессования



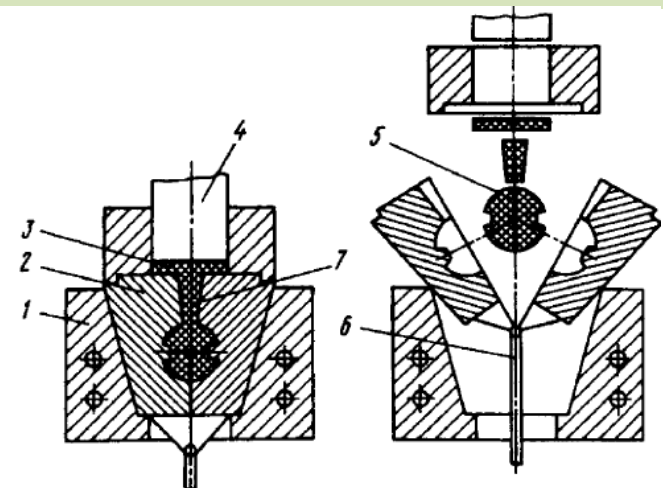
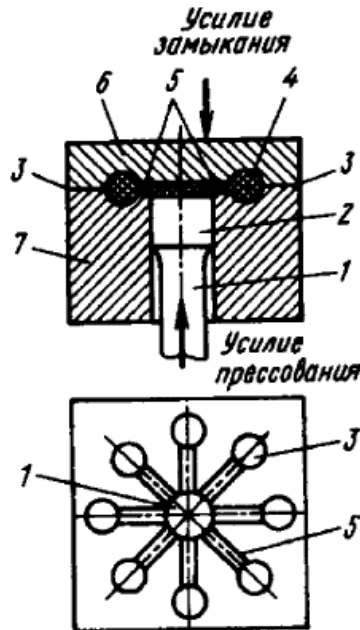
Пресс-формы для литьевого прессования отличаются от пресс-форм прямого прессования тем, что они имеют загрузочную камеру для прессуемого материала, отделенную от оформляющего гнезда и связанную с ним литниковыми каналами.

Оформляющее гнездо литьевой пресс-формы перед прессованием закрывают, а материал в него поступает уже в пластичном состоянии из загрузочной камеры по литникам.

Существует два принципиально различных конструктивных варианта литьевых пресс-форм:

- литьевые пресс-формы для прессования на специальных прессах с двумя рабочими цилиндрами;
- литьевые пресс-формы для прессования на обычных прессах с одним рабочим цилиндром.

Пресс-форма на прессах с двумя рабочими цилиндрами



Пресс-форма на прессах с одним цилиндром

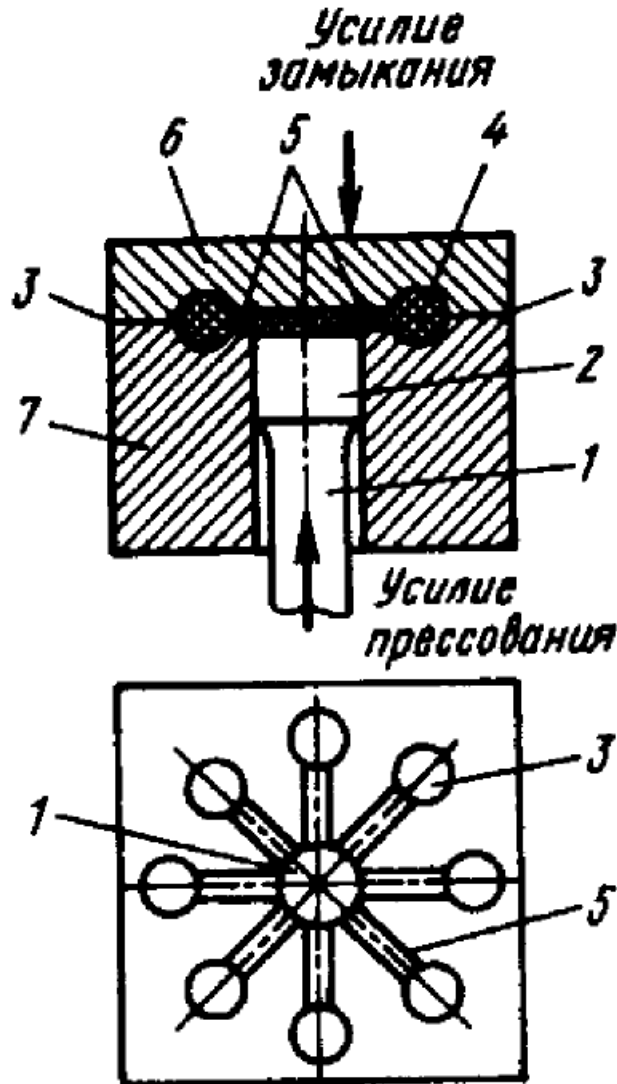


Схема пресс-формы для литейного прессования на прессах с двумя рабочими цилиндрами:

1 – литейной пуансон; 2 – загрузочная камера; 3 – плоскость разъема; 4 – изделие; 5 – литниковые каналы; 6, 7 – верхняя и нижняя части матрицы



Особенности литьевого прессования



Для прессования детали в пресс-форме материал загружают в загрузочную камеру, затем верхнюю половину пресс-формы опускают на нижнюю и удерживают под давлением плунжера верхнего рабочего цилиндра пресса, чтобы пресс-форма не раскрылась при заполнении материалом.

Под действием давления нижнего рабочего плунжера пресса поднимается литьевой пуансон и выдавливает материал из загрузочной камеры по литникам в оформляющую полость.

После окончания прессования пресс-форму открывают и изделия выталкивают дополнительным ходом литьевого пуансона.



Метод позволяет развивать давления прессования до 35...150 МПа для деталей из термопластов и терморектопластов соответственно и получать более сложные и точные по конфигурации детали. Этому способствует и более высокая, по сравнению с прямым прессованием, температура нагрева, снижающая вязкость материала и ускоряющая время формования.

Режим течения размягченного материала через литниковый канал матрицы не только приближает этот процесс к литью, но и способствует более однородному прогреву материала и снижению тем самым уровня остаточных внутренних напряжений в стенках детали.

К недостаткам метода можно отнести небольшие размеры формируемых деталей, сложность изготовления матриц и меньший коэффициент использования материала, чем при прямом прессовании.



7.5 Метод литья под давлением



Метод литья под давлением является наиболее распространенным и производительным, так как его осуществляют с помощью автоматов, развитие которых идет по пути повышения их производительности, обеспечения стабильности параметров литья, разработки самонастраивающихся машин и на их базе – автоматических участков или даже цехов.

Достоинства метода:

- *высокая стабильность технологии;*
- *высокая производительность;*
- *нет необходимости использовать дорогостоящее дополнительное оборудование (таблетирующие машины, установки для предварительного подогрева и т.д.)*

Недостатки метода:

- *осуществляется с помощью крупногабаритного, дорогого основного оборудования;*
- *невозможность получения композитов, армированных непрерывными направленными нитями.*

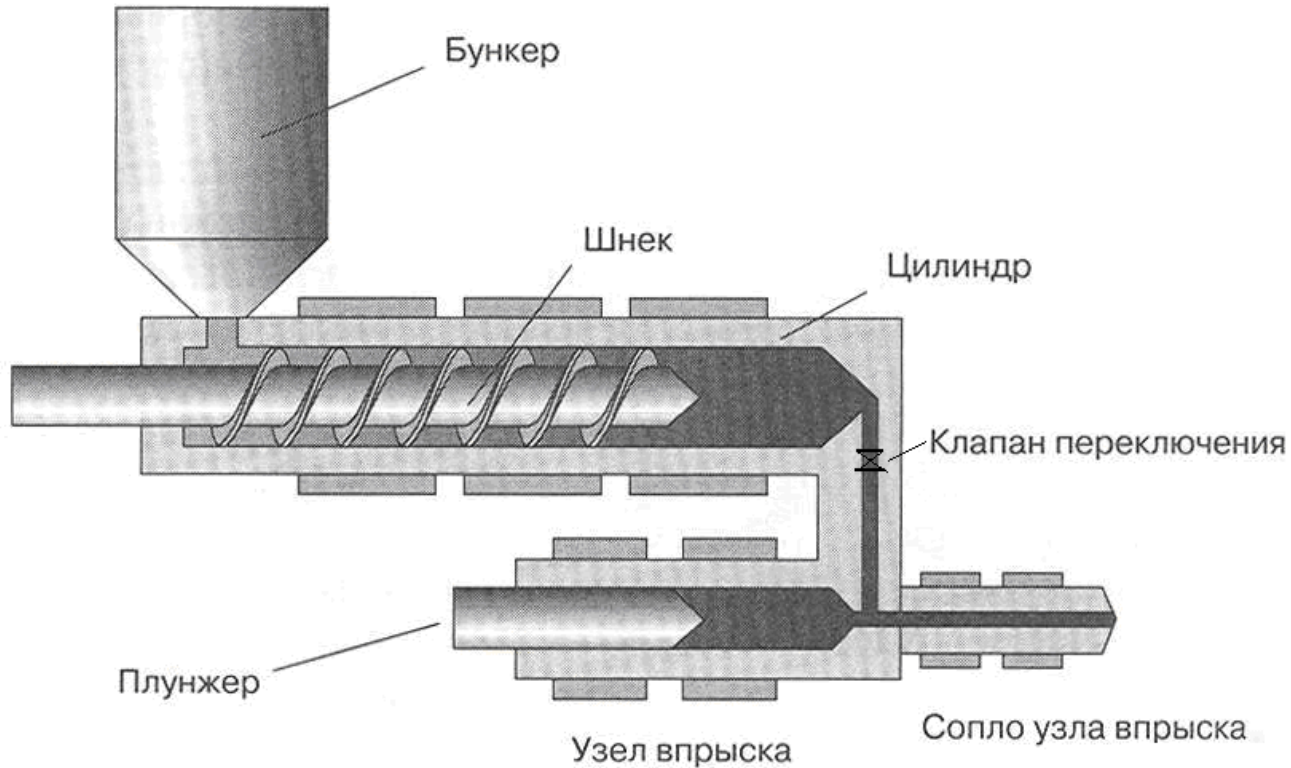


Схема литейной машины со шнековой пластификацией

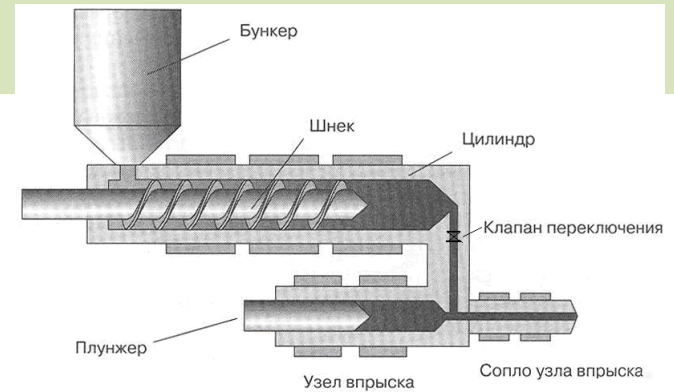


Метод литья под давлением (3)



Отличительной особенностью шнековых литьевых машин для переработки стеклонаполненных полимеров является наличие в их загрузочного бункера с внутренним перемешивающим механизмом и индивидуальным приводом.

Тестообразные стеклонаполненные термореактивные материалы типа премиксов перерабатываются обычно на поршневых литьевых машинах, так как из-за большого тепловыделения при шнековой пластификации происходит преждевременное отверждение связующего в самом цилиндре.





Метод литья под давлением (3)



Для изготовления крупных изделий из стеклонаполненных пластмасс большинство специалистов рекомендуют поршневые машины, так как на них меньше разрушается стекловолокно и получаются более прочные изделия.

Однако некоторые западноевропейские фирмы изготавливают на шнековых машинах довольно крупные изделия (например, детали кузовов), прочностные свойства которых не ниже, чем у полученных методом прессования.

Шнековые машины обеспечивают более быстрый прогрев материала, хорошую гомогенизацию массы, удаление газов из цилиндра пластификации, что повышает качество изделия.



Метод литья под давлением (3)



Давление на расплав должно быть достаточным (60...150 МПа) для того, чтобы он продавливался из нагревательного цилиндра через сопло в пресс-форму и полностью заполнял ее.

Излишне высокое давление сопряжено с повышенным расходом энергии и приводит к ускорению износа машины и формы. Давление на расплав определяется его вязкотекучими свойствами, которые зависят от молекулярного веса и температуры материала, а также от конструкции формы.



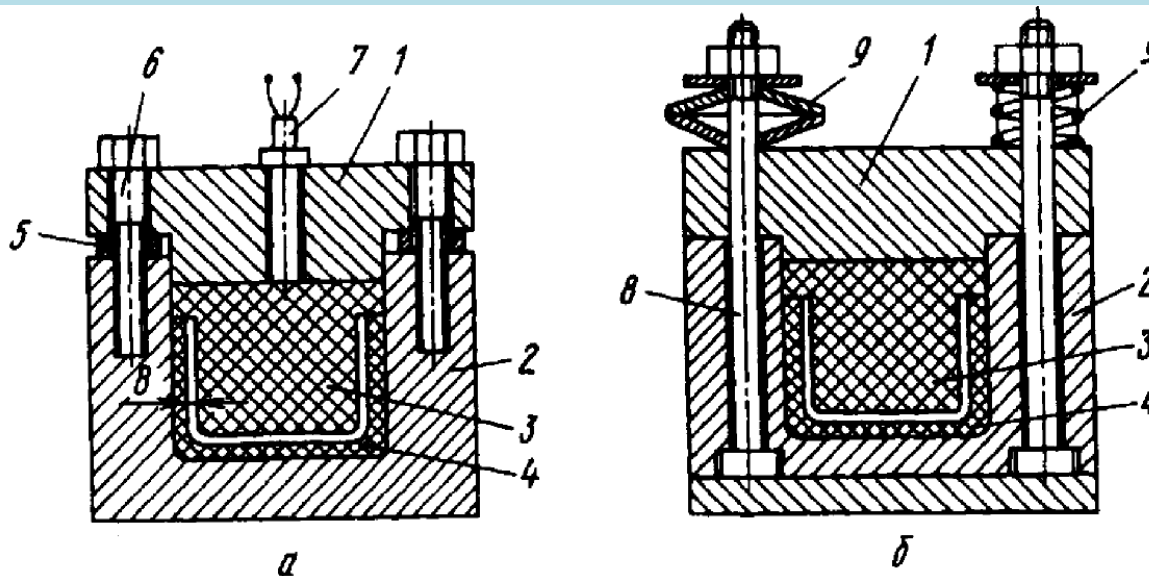
4.4 Термокомпрессионное прессование

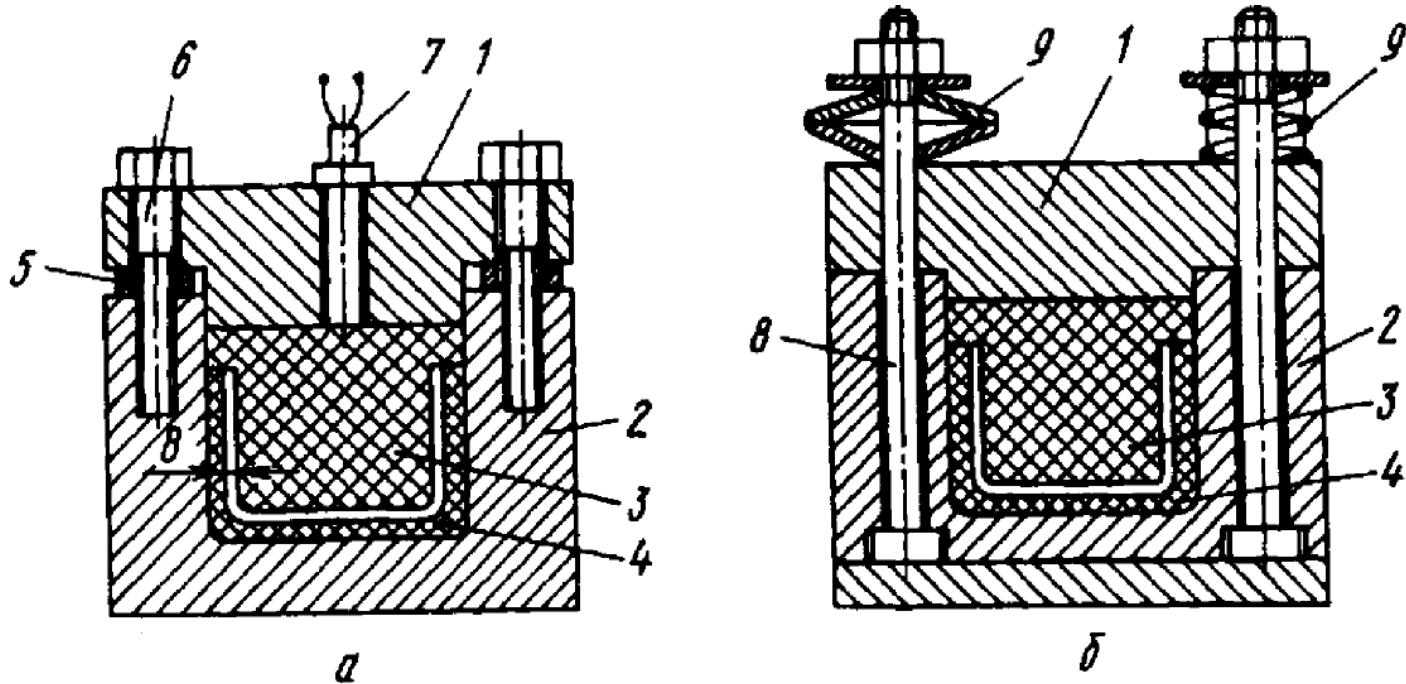


С увеличением размеров или усложнением конфигурации и конструкции изделий из термопластичных композиционных материалов резко возрастают трудности по обеспечению требуемого качества, так как возможности традиционных методов формования и соответствующей технологической оснастки ограничены.

Жесткие пресс-формы с увеличением габаритных размеров изделия становятся не рентабельными, повышаются их стоимость и трудоемкость изготовления, кроме того, зачастую отсутствуют прессы со столами необходимых размеров.

Процесс формования с помощью эластичных мембран при температурах свыше $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ затруднен за счет их недостаточной надежности, ограниченного числа циклов формования (как правило, 1-3 цикла) и, как следствие, увеличения брака. По этим причинам большой интерес представляет термокомпрессионный метод формования изделий из ТКМ.





Оснастка для термокомпрессионного формования с постоянным (а) и переменным (б) объемом:

1 – металлический пуансон; 2 – металлическая матрица; 3 – эластичный формующий элемент; 4 – уплотняемый пакет; 5 – опорные планки; 6 – фиксирующие элементы; 7 – датчик давления; 8 – направляющие колонки-фиксаторы; 9 – упругие тарированные элементы



Технологическая оснастка для осуществления этого метода (см. рисунок) состоит из ограничительной части, изготавливаемой, например, из металлов и эластичного формирующего элемента (ЭФЭ), характеризуемого КЛТР (коэффициентом линейного термического расширения) в диапазоне (250...500) $\cdot 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Собранный пакет формируется в ограничительной части оснастки за счет температурного расширения ЭФЭ при нагревании.

Вследствие значительного различия КЛТР материалов ограничительной части оснастки $(10...25) \cdot 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ и ЭФЭ возникает давление формования, под действием которого пакет из ТКМ уплотняется.



Если ЭФЭ вставлен в ограничительную часть оснастки с некоторым начальным зазором δ , то нагревание оснастки до определенной температуры сопровождается нарастанием давления p , которое можно рассчитать, используя формулу

$$p = k_p \Delta T.$$

Здесь k_p – коэффициент термокомпрессии материала ЭФЭ, характеризующий прирост давления внутри замкнутого объема, в котором находится ЭФЭ, при его нагреве на 1 °С, МПа/°С:

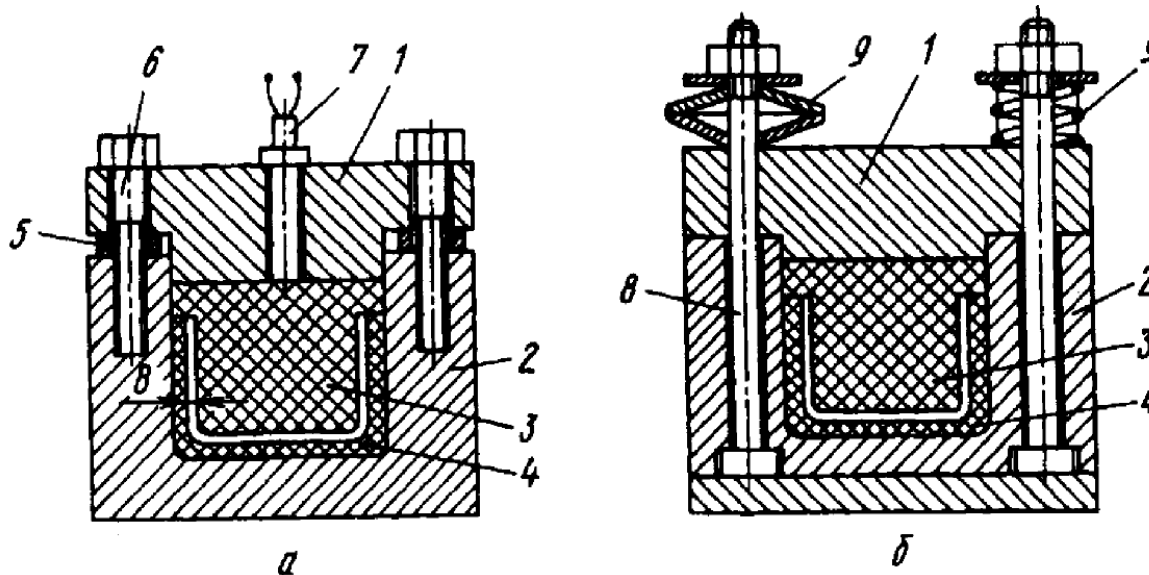
$$k_p = \frac{\alpha E}{(1 - 2\mu)},$$

где α , E , μ – КЛТР, модуль упругости и коэффициент Пуассона материала ЭФЭ; ΔT – разность между текущей температурой T и температурой T_δ , при которой исчезает зазор между ЭФЭ и ограничительной частью оснастки.

Если считать ограничительную часть оснастки абсолютно жесткой, то для резин $k_p = 0,5...0,7$ МПа/°С. Поэтому при нагреве до температуры 300 °С и выше можно создать практически любое давление формования, необходимое для изготовления изделий из ТКМ.

Метод термокомпрессионного прессования можно осуществить с использованием двух основных типов технологической оснастки:

- с постоянным объемом формы (рисунок а);
- с переменным объемом формы (рисунок б).





В первом случае объем оформляющей полости в течение всего цикла формования остается постоянным. Регулируя зазор между ЭФЭ и пакетом ТКМ, можно в широких пределах изменять температуру начала воздействия и конечного уровня давления формования.

В оснастке с переменным объемом один из элементов ограничительной части выполнен подвижным, но подкреплён упругими тарированными элементами. При повышении давления, заданного упругими тарированными элементами, происходит некоторое перемещение пуансона по колонкам, при этом давление формования сохраняется на заданном уровне.



В оснастке с ЭФЭ можно одновременно формовать и собирать изделия интегральной конструкции, например панели различной конфигурации с внутренним силовым набором.

Вследствие эластичности материала ЭФЭ и высоких значений КЛТР извлечение ЭФЭ из различных поднутрений осуществляется без особых затруднений. Одновременно обеспечивается качественное уплотнение всех поверхностей, включая поверхности с малым радиусом перехода.



Повышение температуры переработки конструкционных ТКМ сужает круг выбора материалов ЭФЭ. Особенность эксплуатации заключается в том, что ЭФЭ находятся в условиях всестороннего сжатия в замкнутом объеме при повышенных температурах.

Таким образом, материалы ЭФЭ для переработки ТКМ должны обладать следующими свойствами:

- высокой эластичностью, необходимой для передачи давления равномерно по всем направлениям;
- стабильностью свойств при длительном нахождении в условиях замкнутого объема при температурах эксплуатации;
- значениями КЛТР не ниже $250 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ постоянными в процессе эксплуатации.



Установлено, что из серийно выпускаемых отечественной промышленностью эластомеров только резины на основе силоксановых каучуков обладают свойствами, удовлетворяющими предъявляемым требованиям.

Составы на их основе обеспечивают различные значения КЛТР, обладают хорошей теплопроводностью, высокой стабильностью размеров при многократном использовании. При температурах до 200 °С материалом ЭФЭ может быть резина на основе силиконового каучука СКТВ-1.

При использовании термокомпрессионного метода прессования можно получать равнотолщинные изделия с качественно отформованными стенками. При этом трудоемкость изготовления технологической оснастки снижается, а уровень физико-механических характеристик повышается за счет более равномерного распределения давления формования.



4.5. Особенности конструирования деталей с учетом технологии прессования

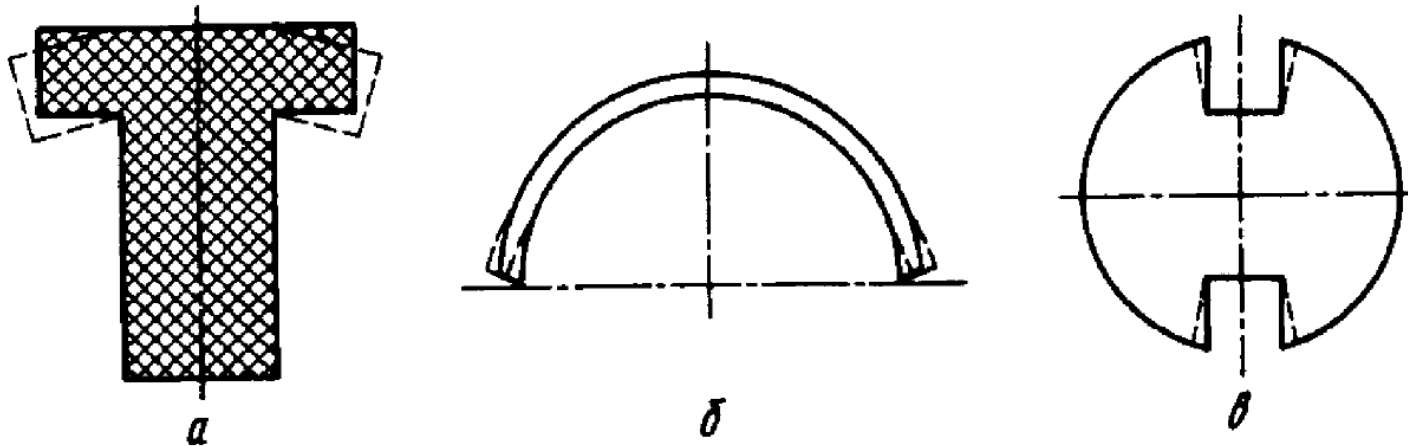


Основные принципы конструирования изделий, получаемых методом прессования, помогают избежать ошибок на стадии проектирования, если учитываются технологические возможности метода формования.

При конструировании детали следует учитывать, что на ее конечную форму и качество оказывают влияние:

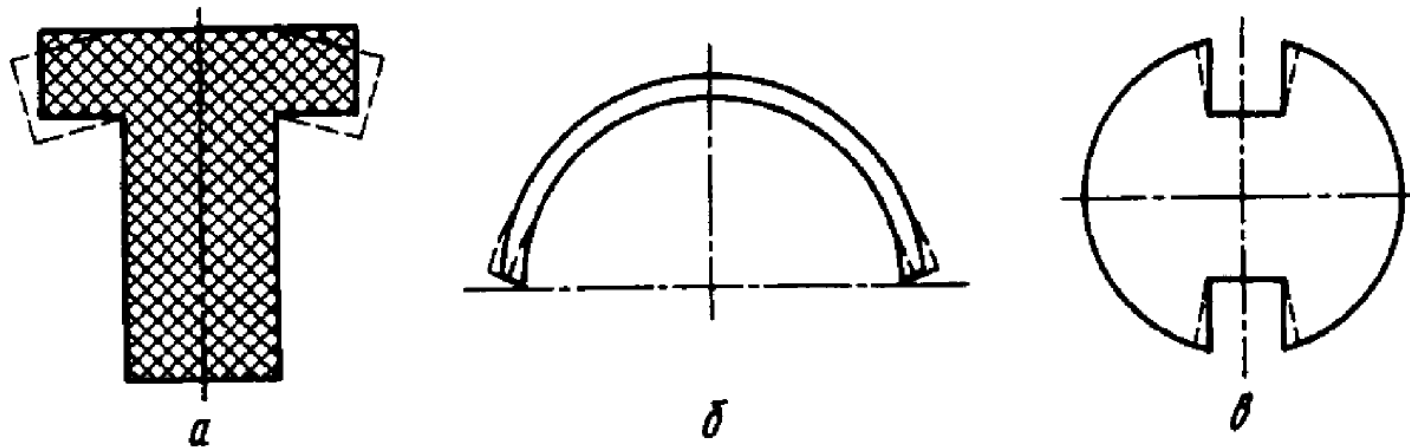
- геометрическая форма детали (габаритные размеры, толщина стенок, наличие выступов, отверстий, арматуры, их взаимное расположение и т.д.);
- технология изготовления деталей (температурные и временные режимы процесса изготовления, применяемые давления, режимы охлаждения и т.д.);
- ориентация материала при заполнении формы и время ее заполнения.

Детали из терморезистивных композиций, имеющие Т-образное поперечное сечение, коробятся с утягиванием к основанию полки Т-образного сечения, так как вследствие разного охлаждения внутренняя часть охлаждается медленнее, чем наружная, что и вызывает соответствующую усадку (рисунок а).



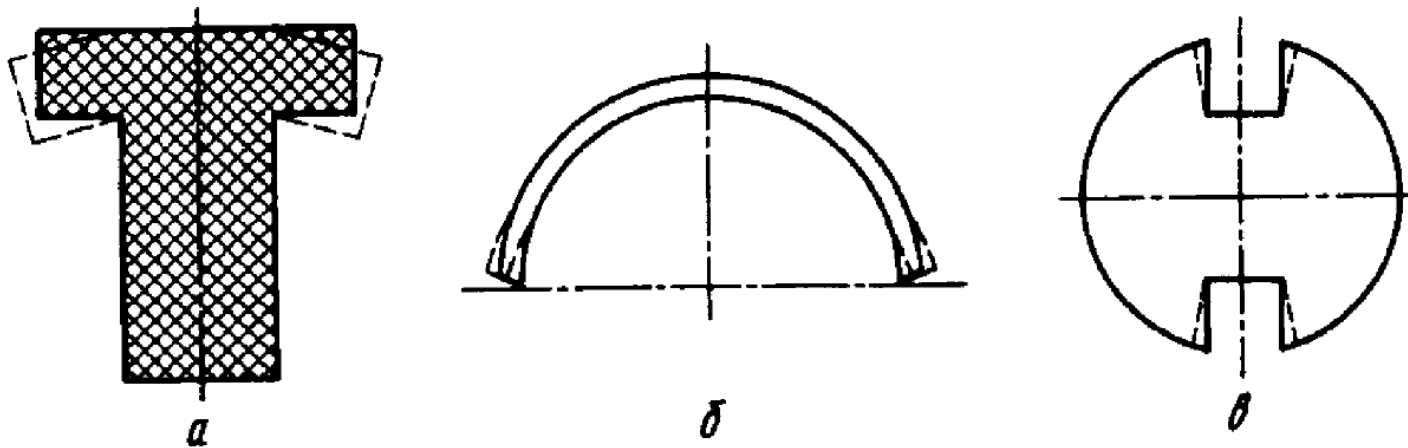
Влияние формы деталей на конечные размеры:
a – усадка; *б* – остаточное пружение; *в* – искажения формы; — по чертежу;
- - - фактическое

Детали, имеющие подковообразное сечение (рисунок б), деформируются в сторону разгибания (эффект остаточного пружинения).



Влияние формы деталей на конечные размеры:
a – усадка; *б* – остаточное пружение; *в* – искажения формы; — по чертежу;
- - - фактическое

Наличие пазов и вырезов на поверхности детали влияет на протекание усадочных процессов, приводящих к овальности деталей и искажению формы паза (рисунок в).

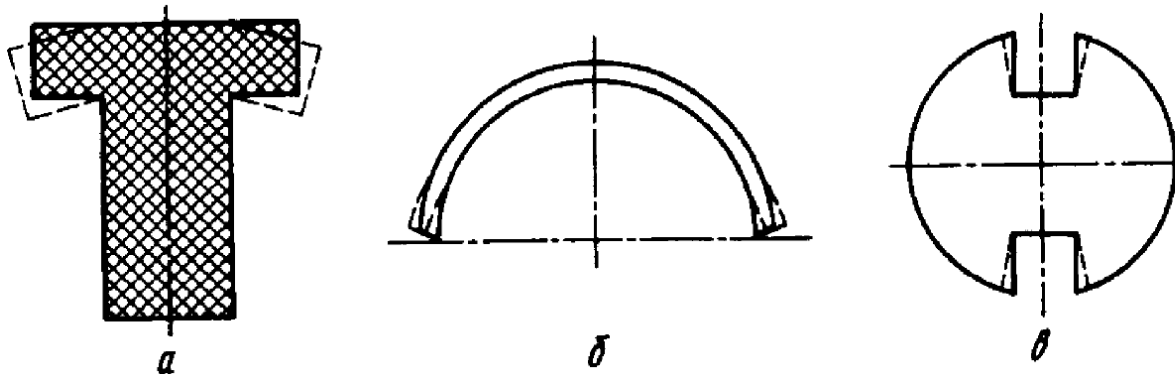


Влияние формы деталей на конечные размеры:
a – усадка; *б* – остаточное пружение; *в* – искажения формы; — по чертежу;
- - - фактическое

Арматура отрицательно влияет на точность детали; размер детали оказывается тем больше, чем больше число армирующих вставок он пересекает.

После извлечения из формы деталь имеет изогнутость, обращенную выпуклостью в ту сторону, где температура формы была больше.

Отклонения от геометрической формы плоских поверхностей непосредственно зависят от площади детали.



Влияние формы деталей на конечные размеры:
a – усадка; *б* – остаточное пружение; *в* – искажения формы; — по чертежу;
- - - фактическое



Уклоны внутренних поверхностей и отверстий следует делать большими, чем уклоны по наружному контуру деталей. При назначении уклонов крупногабаритных и сложнопрофильных деталей необходимо учитывать силы, возникающие при извлечении их из формы и предел прочности материала детали при сжатии. Поэтому детали из материалов с низкими пределами прочности при сжатии должны иметь увеличенные уклоны.

При конструировании прессуемых деталей рекомендуется избегать поднутрений, препятствующих извлечению детали из формы. При наличии поднутрений требуются дополнительные плоскости разъема форм, что приводит к последующей зачистке деталей.



Острые углы у прессованных деталей не рекомендуются, их можно сохранять только на гранях, примыкающих к плоскости разъема пресс-формы. Радиусы скруглений должны составлять не менее 1,5...3,0 мм.

Оформление стенок деталей. В силу особенностей физикомеханических процессов при прессовании стенки детали должны иметь равномерную толщину. В случаях, когда по условиям прочности толщина стенок не может быть одинаковой, рекомендуется избегать резких переходов от одного сечения в другое.



Разнотолщинность деталей допускается не более 2:1 при прямом прессовании и не более 2,5:1 — при литьевом.

Толщину стенки сложных сечений, за исключением отдельных случаев, не рекомендуется назначать свыше 10... 12 мм. Минимальные значения толщины стенки определяют исходя из прочностного расчета детали. Для ее уменьшения предусматривают ребра жесткости.



Технологические уклоны, радиусы



Толщина ребра жесткости не должна превышать толщину стенки детали или ее элемента, к которому они примыкают. Оптимальная толщина ребер жесткости должна быть не более 0,6...0,8 толщины сопрягаемой стенки.

Ребра жесткости рекомендуется располагать на прямых участках элементов детали.

При конструировании ребристых панелей, днищ и крышек с плоской поверхностью необходимо стремиться к диагональному, диаметральному или шахматному расположению ребер, причем форма их сечения должна быть постоянной по всей длине.



Оформление резьб



В деталях, получаемых прессованием, резьбы можно оформлять в процессе формования армированием и механической обработкой. Наиболее технологичны резьбы, получаемые непосредственно формованием.

Силовые резьбы, а также резьбы на деталях, которые подвергаются частой сборке и разборке, рекомендуется армировать металлом. Наиболее прочной является метрическая резьба с шагом 1,5 мм.

Резьбу малого диаметра (менее 2,5 мм) не рекомендуется использовать так же, как и мелкую резьбу с шагом менее 0,5 мм.



Оформление резьб



Оформление отверстий. Отверстия в прессуемых деталях можно получить:

- полным оформлением в пресс-форме;
- частичным оформлением в пресс-форме с последующим сверлением;
- сверлением и другими способами.

Отверстия в деталях по форме должны быть простыми.



Оформление резьб



Сквозные отверстия являются более технологичными, чем глухие.

Перемычку между соседними отверстиями или отверстием и краем детали назначают не менее диаметра отверстия для термопластичных композитов, а для терморезистивных выбирают по табл. 2.6.

Максимальное отношение глубины вертикального отверстия к диаметру зависит от метода прессования и диаметра отверстия. Для диаметров от 3 до 50 мм это отношение находится в диапазоне (2,5...5,0) для прямого прессования и в диапазоне (5,0...15) - для литьевого прессования. Максимальная длина горизонтальных отверстий не должна превышать двойного диаметра.



Оформление резьб



Размеры перемычек между отверстиями или от отверстия до края детали

Размер отверстия, мм	Перемычка между отверстиями, мм	Перемычка от края изделия до отверстия, мм
Свыше 3 до 4	2,5	3,5
"- 4 до 5	3,0	4,0
"- 6 до 8	4,0	5,0
"- 10 до 12	5,0	6,0
"- 12 до 14	6,0	7,0
"- 14 до 30	8,0	9,0
"- 30 до 50	10,0	11,0



5.1. Формообразование намоткой



Получение конструкций методом намотки явилось в 60-х годах подлинным прогрессом в технологии производства изделий из ПКМ. Это закономерно, поскольку метод намотки позволил получить высокопрочные материалы в конструкциях аэрокосмической и ракетной техники и заключал в себе огромные возможности совершенствования, многие из которых сегодня реализованы.

Намотка — технологический процесс, при котором непрерывный армирующий наполнитель в виде нитей, лент, жгутов, тканей, пленок пропитывается полимерным связующим, подается на оправку, имеющую конфигурацию внутренней поверхности изделия и укладывается по ее поверхности в заданном направлении. После получения необходимой схемы армирования, заданной толщины и структуры материала производится отверждение изделия тем или иным способом и удаление оправки. Иногда оправка может быть элементом наматываемой конструкции, например, герметизирующей оболочкой.



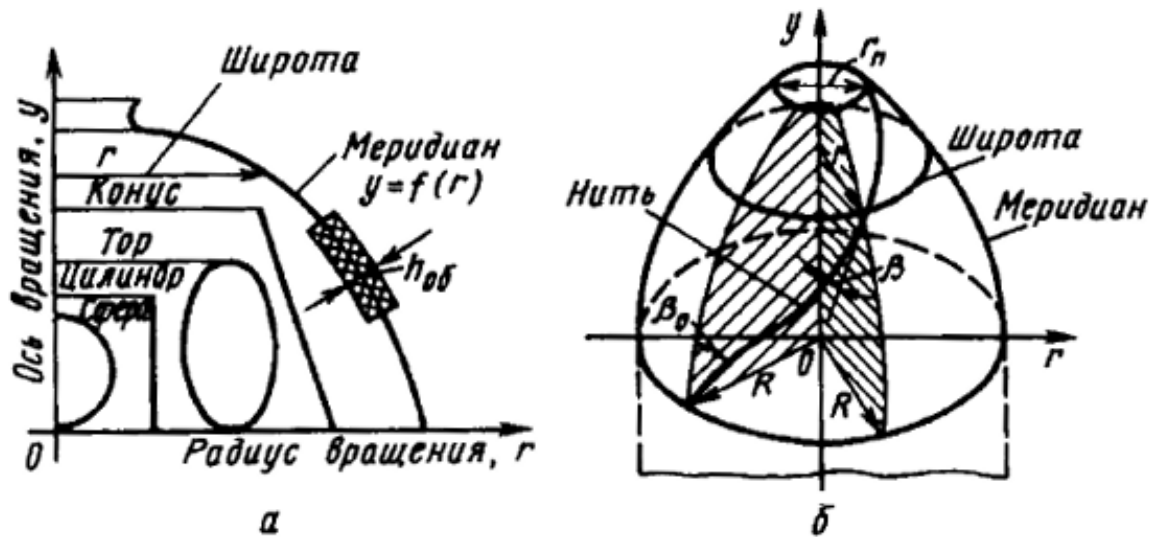
Формообразование намоткой



Методом намотки изготавливают изделия, имеющие форму тел вращения:

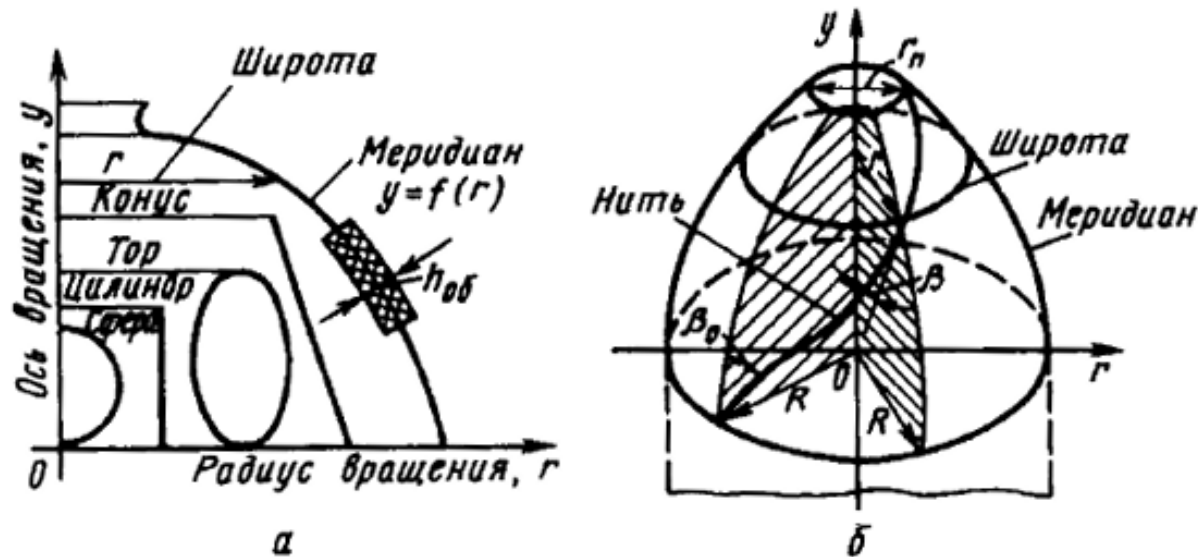
- баллоны давления,
- баки,
- корпуса ракетных двигателей,
- головные части,
- отсеки ракет,
- транспортно-пусковые контейнеры,
- корпуса подводных аппаратов,
- стволы орудий и корпуса снарядов,
- жидконаливные цистерны,
- трубопроводные магистрали,
- коробчатые шпангоуты,
- воздухозаборники самолетов,
- лопасти винтов вертолетов,
- различные профили,
- пространственно изогнутые трубы и т.д.

Основным элементом перечисленных конструкций является тонкостенная силовая оболочка. Геометрически она образована вращением двух плоских кривых вокруг неподвижной оси, лежащей в плоскости этих кривых. Расстояние между кривыми называют толщиной оболочки $h_{об}$, а среднюю кривую $y = f(r)$ – образующей или меридианом (рисунок а).



Геометрическое представление оболочки вращения:
а – основные геометрические формы; б – геометрические параметры и положение нити на поверхности вращения общего вида; r_n – радиус полюсного отверстия

Структура материала оболочки создается в результате набора (намотки) n -го количества слоев, которые образуют узор намотки или схему армирования оболочки. При этом основным элементом намотки является форма витка нитей, укладываемого на поверхность. В зависимости от формы витка различают спиральную и планарную (плоскостную) намотки.

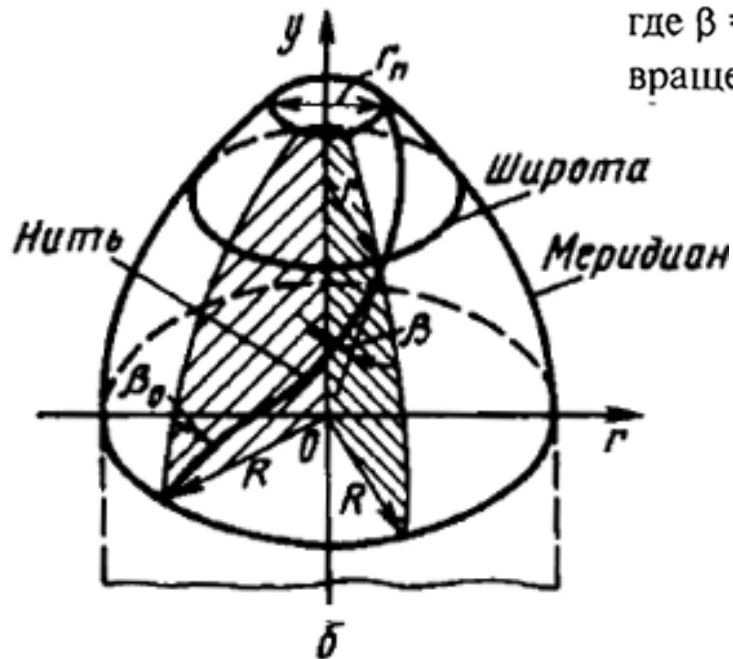


Геометрическое представление оболочки вращения:
 a – основные геометрические формы; **b** – геометрические параметры и положение нити на поверхности вращения общего вида; r_n – радиус полюсного отверстия

Спиральный виток представляет собой замкнутую (или разомкнутую) пространственную кривую. Главная разновидность спирали - геодезическая кривая или линия, которая определяется уравнением Клеро (рисунок б).

$$r \cdot \sin \beta = R \cdot \sin \beta_0 = \text{const} ,$$

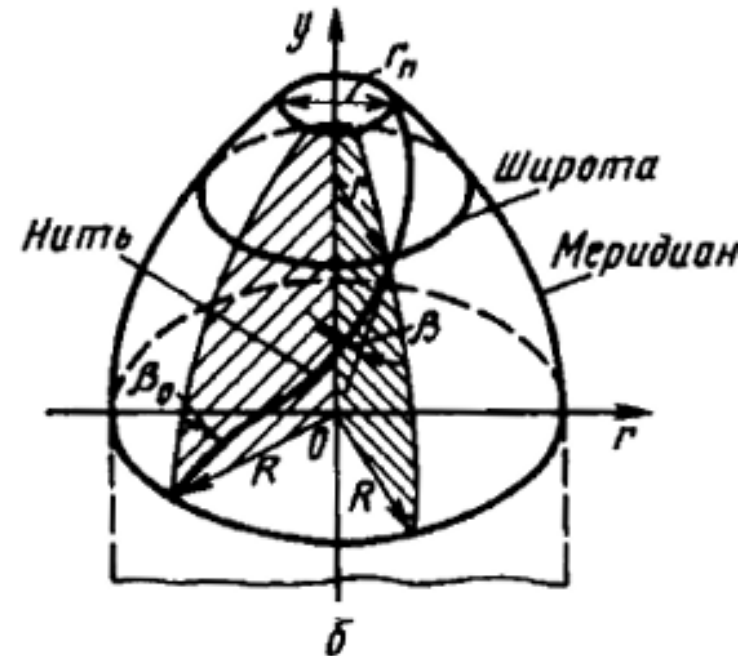
где $\beta = f(r)$ – текущий угол намотки; R – максимальный радиус вращения; β_0 – расчетный угол намотки.



Геодезическая линия – это кратчайшее расстояние между двумя точками на поверхности, например прямая линия на плоскости, винтовая линия на цилиндре, окружность большого диаметра на сфере, все меридианы оболочек вращения.

При планарной намотке (например, при намотке по меридианам и широтам) форма витка нитей представляет собой плоскую замкнутую кривую.

Технология изготовления изделий из КМ методом намотки имеет ряд преимуществ по сравнению с другими известными методами переработки композитов в изделия.





Важнейшими из этих преимуществ являются:

- во-первых, возможность наиболее полной реализации в изделиях высокой прочности на растяжение волокон, составляющих намоточный материал;
- во-вторых, возможность обеспечения высокой степени автоматизации подобного технологического процесса изготовления изделий на станках с программным управлением.

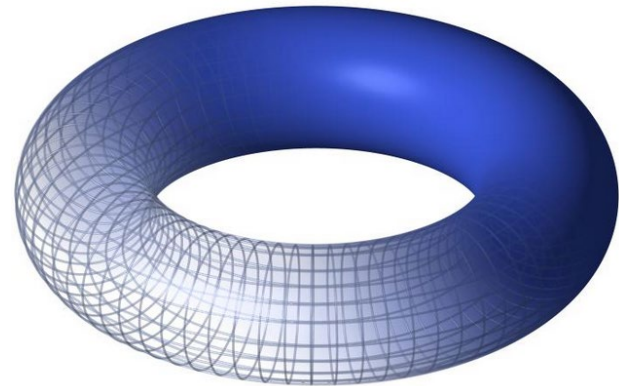
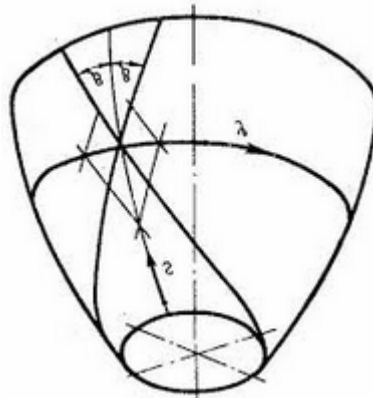
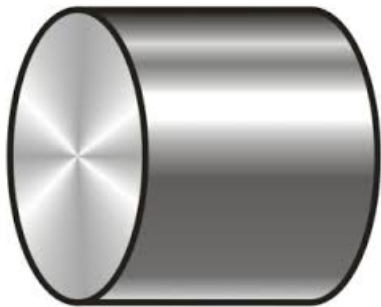
Наиболее эффективна укладка волокон и нитей в направлении действия главных напряжений, появляющихся в материале вследствие действия силовых нагрузок, а также, если эти волокна одинаково натянуты и прочно склеены между собой.



Формообразование намоткой



Одинаково натянутыми волокна оказываются лишь при намотке нитей на тела, имеющие выпуклую поверхность типа цилиндра, сферы, овалоида, изотензоида, тора и других им подобных, называемых телами вращения. Поэтому технология намотки изделий композиционными материалами и является наиболее применимой для этого класса изделий.





Для изготовления изделий, имеющих форму тел вращения, обычно используют метод намотки.

Достоинства метода:

- *высокая производительность;*
- *высокое качество поверхности;*
- *нет необходимости использовать дорогостоящее дополнительное оборудование (таблетирующие машины, установки для предварительного подогрева и т.д.);*
- *возможность получения направленно армированных изделий.*

Недостатки метода:

- необходимо специальное оборудование, обеспечивающее вращение оснастки;
- часто используется разрушаемая оправка;
- невозможность получения композитов, армированных дискретными частицами;
- возможность получения изделий только цилиндрической или призматической формы без вогнутых поверхностей.

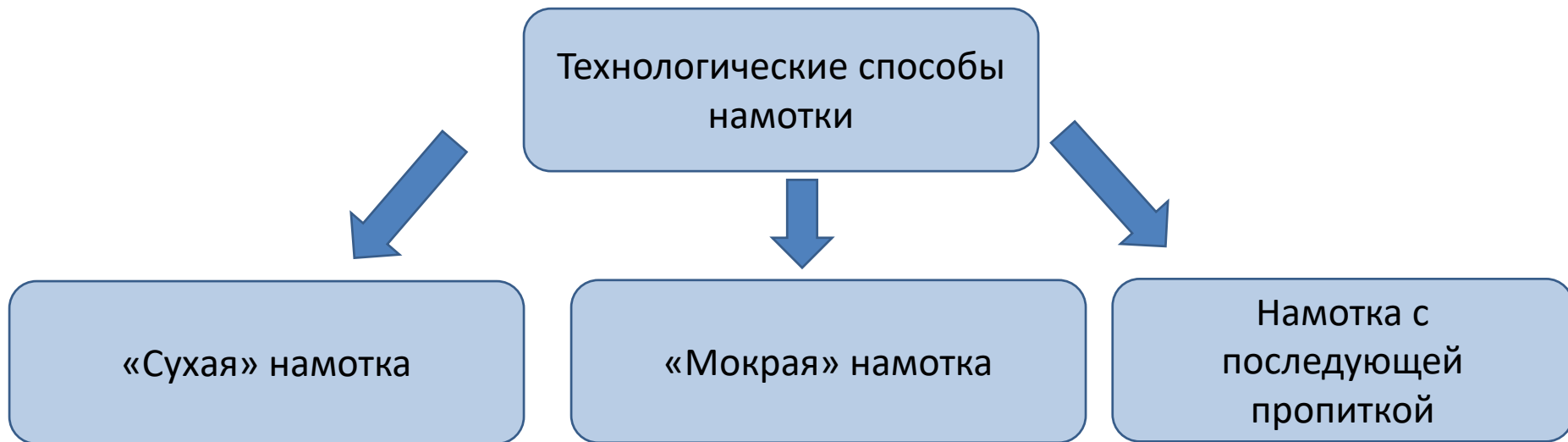


5.2. Технологические способы намотки



В зависимости от способа нанесения связующего на волокнистый армирующий материал и обеспечения необходимого содержания его в материале изделия различают несколько технологических способов формирования изделий намоткой:

- способ «сухой» намотки;
- способ «мокрой» намотки;
- способ намотки с последующей пропиткой





«Сухая» намотка



Способ “сухой” намотки заключается в том, что волокнистый армирующий материал перед формованием предварительно пропитывают связующим на пропиточных машинах, которые обеспечивают не только качественную пропитку, но и требуемое равномерное содержание связующего в препреге на основе стекло-, органических и углеродных волокон за счет применения различных растворителей для регулирования вязкости связующего в процессе пропитки.

Особенно эффективно применение предварительно пропитанных ровингов, полотен стекло-, углетканей и лент.

Для программной намотки изделия, в зависимости от его сложности, применяют 3—5 координат управления перемещением раскладочного устройства (головки).

При использовании способа “сухой” намотки улучшаются условия и культура производства, повышается производительность процесса намотки в 1,5 — 2 раза, появляется возможность использования практически любого связующего: эпоксидного, эпоксидно-фенольного, фенолформальдегидного, полиимидного.

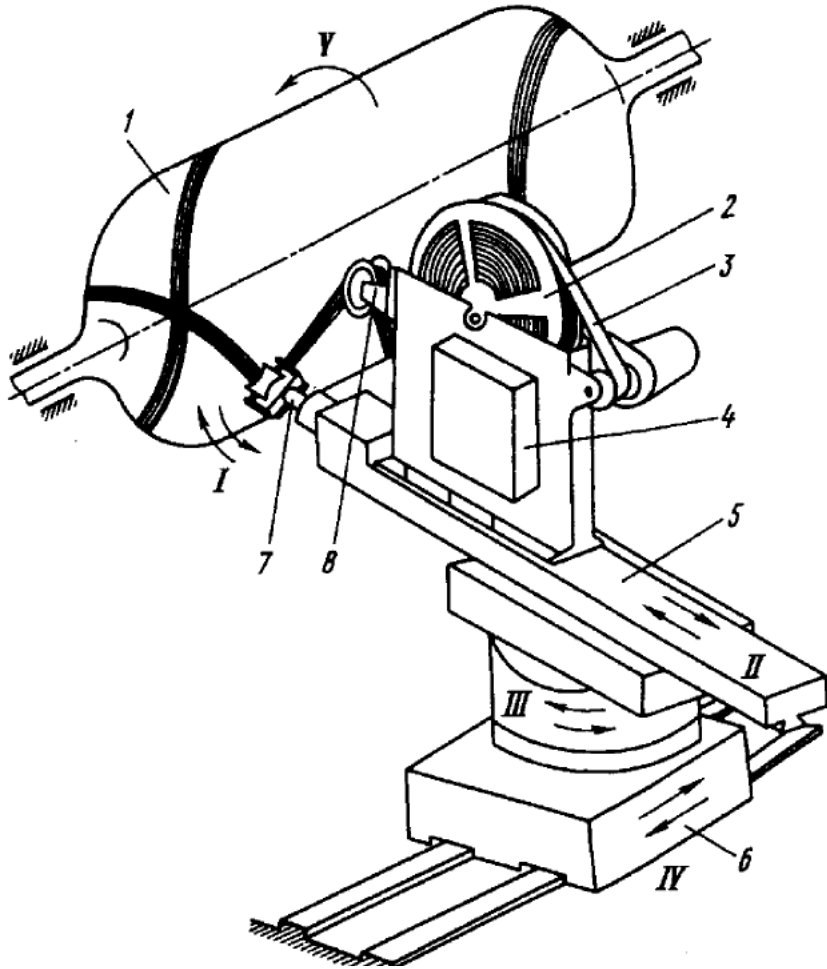


Схема «сухой» намотки
препрегом изделия:

- 1 – оправка;
- 2 – бобина с препрегом;
- 3 – разделительная пленка;
- 4 –нагреватель;
- 5 – суппорт;
- 6 – каретка;
- 7 – головка;
- 8 – устройство натяжения,
- I...IV — степени подвижности
станка.



Характеристики «сухой» намотки



Способ «сухой» намотки более эффективен, чем мокрой, и его преимущества заключаются в следующем:

- высокая производительность, так как скорость намотки не лимитируется условиями пропитки наполнителя;
- стабильность степени армирования т.е.ю соотношения наполнитель—связующее;
- высокая воспроизводимость физико-механических характеристик от одного изделия к другому;
- возможность применения больших значений технологического натяжения;
- возможность использования препрегов, предварительно пропитанных высоковязкими связующими, в том числе и термопластичными;
- лучшие технологические условия для намотки изделий, имеющих конусность или сложные кривизны, за счет эффекта прилипания препрега к оправке;
- благоприятные экологические последствия.



«Мокрая» намотка



Способ “мокрой” намотки отличается тем, что пропитка армирующего волокнистого материала связующим и намотка на оправку совмещены. При способе “мокрой” намотки нити, предварительно подсушенные горячим воздухом, попадают из шпулярника на индивидуальные натяжители, собираются в прядь и поступают в пропиточно-натяжной тракт. Пропитка армирующего волокнистого материала связующим осуществляется одним из следующих способов:

- Протягиванием нитей через ванночку со связующим;
- контактированием с роликом, купающимся в связующем;
- принудительной пропиткой в клиновой или вакуумной камере.



«Мокрая» намотка



Способ «мокрой» намотки отличается тем, что пропитка армирующего волокнистого материала связующим и намотка на оправку совмещены.

При способе «мокрой» намотки нити, предварительно подсушенные горячим воздухом, попадают из шпулярника на индивидуальные натяжители, собираются в прядь и поступают в пропиточно-натяжной тракт.

Пропитка армирующего волокнистого материала связующим осуществляется одним из следующих способов:

- протягиванием нитей через ванночку со связующим;
- контактированием с роликом, купающимся в связующем;
- принудительной пропиткой в клиновой или вакуумной камере.

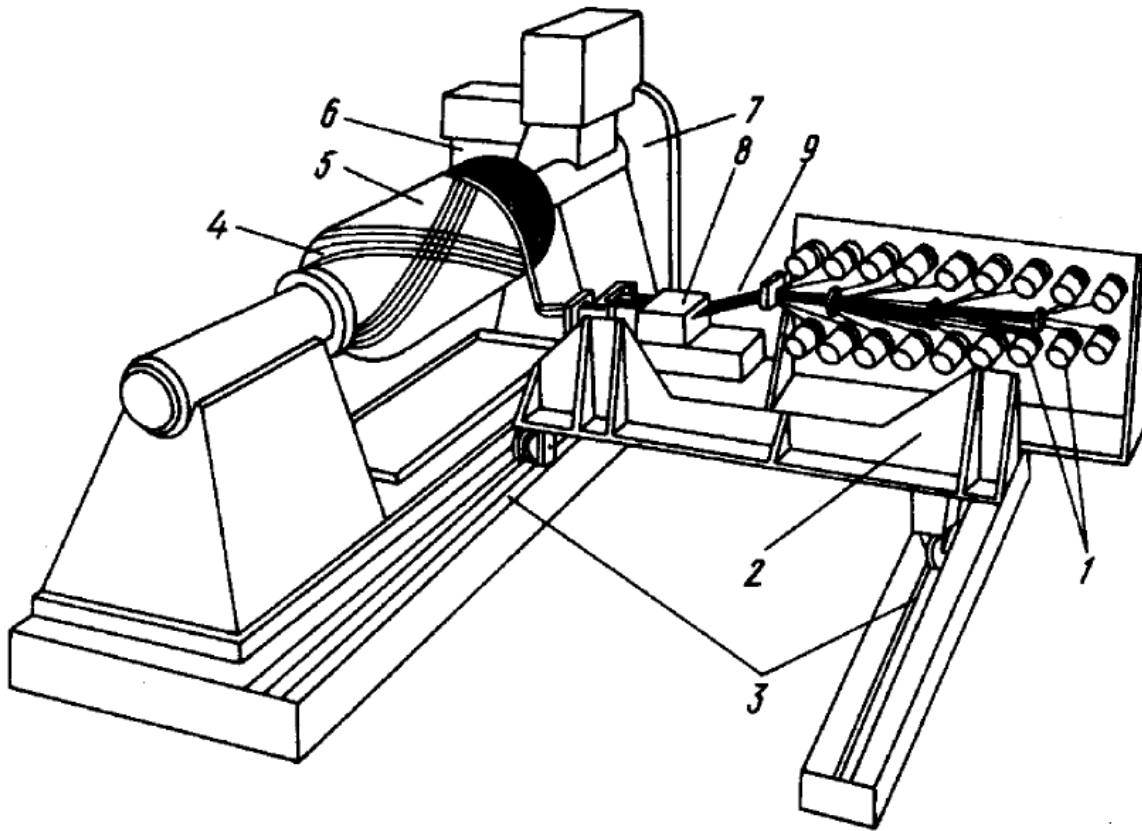


Схема «мокрой» намотки:

1 – шпули с нитями; 2 – шпулярник; 3 – направляющие перемещения намоточно-пропиточного тракта; 4 – спиральные слои; 5 – оправка; 6 – окружные слои; 7 – привод вращения; 8 – ванночка со связующим; 9 – сформированная пряжа

Преимущество способа «мокрой» намотки заключается в более низком контактном давлении формования, что требует оборудования с меньшей мощностью привода и лучшей формуемостью поверхностей изделия. Поэтому способ «мокрой» намотки применяют, как правило, для изготовления крупногабаритных оболочек сложной конфигурации.



«Мокрая» намотка



После пропитки излишек связующего отжимается, прядь нитей натягивается, проходит через систему контроля и через раскладывающее устройство поступает на вращающуюся оправку, укрепленную на намоточном станке.

Необходимая вязкость связующего в данном случае обеспечивается выбором соответствующей смолы и применением подогрева связующего в пропитывающей ванне.

Преимущество способа «мокрой» намотки заключается в более низком контактном давлении формования, что требует оборудования с меньшей мощностью привода и лучшей формуемостью поверхностей изделия. Поэтому способ «мокрой» намотки применяют, как правило, для изготовления крупногабаритных оболочек сложной конфигурации.



Для способа «мокрой» намотки характерным является следующее:

- невысокая скорость намотки,
- ограниченная скоростью пропитки наполнителя связующим;
- невозможность обеспечения равномерного содержания связующего по толщине наматываемого изделия (особенно для толстостенных конструкций);
- большое количество отходов связующего в виде загустевших остатков в пропиточной ванне и выдавленного излишка связующего из наматываемого изделия;
- загрязнение намоточнопропиточного тракта и рабочего места связующим;
- невозможность применения высоковязких связующих (например, термопластов).



При третьем способе намотки сухой армирующий материал наматывается на оправку, а затем пропитывается связующим путем разбрызгивания его под давлением:

- из пульверизатора;
- вручную с помощью кисти;
- с использованием давления или вакуума.

Этот способ ограниченно применяют при изготовлении панелей сетчатой структуры или тонкостенных оболочек, поскольку обеспечить качественную пропитку известными способами не удастся.



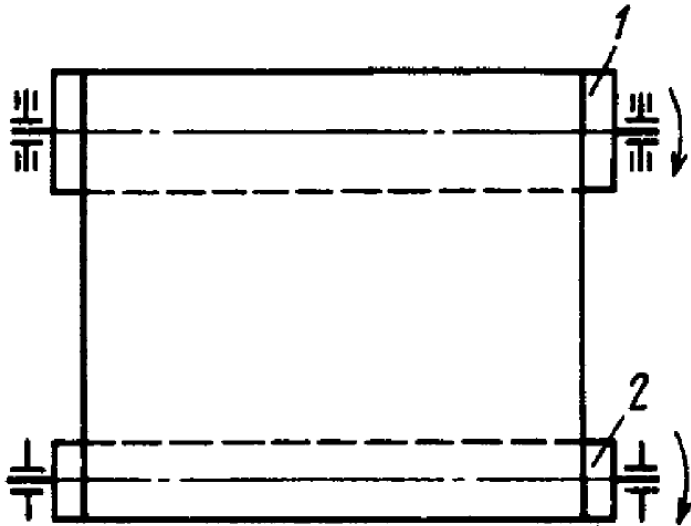
5.3. Технологические схемы намотки



В зависимости от типа укладки армирующего волокнистого материала в намотанном изделии различают следующие техно логические схемы намотки:

- прямая (окружная);
- спирально-винтовая (тангенциальная, кольцевая);
- спирально-перекрестная (спирально-продольная, спирально-поперечная);
- совмещенная спирально-кольцевая;
- продольно-поперечная;
- косослойная продольно-поперечная;
- планарная (полюсная, орбитальная, плоскостная);
- тетрамотка;
- зональная.

Такую намотку применяют в тех случаях, когда необходимо получить оболочку, длина которой равна или меньше ширины наматываемой ленты. В качестве армирующего волокнистого материала при прямой намотке используют, как правило, полотна предварительно пропитанных тканей или тканых лент.



В случае, когда методом прямой намотки требуется получить изделие, длина которого намного превышает ширину, применяют намоточные устройства с несколькими узлами раскладки.

Схема прямой намотки:
1 – оправка; 2 – рулон с тканью



Спирально-винтовая намотка (кольцевая, тангенциальная)



Сущность метода заключается в укладке сформированной ленты волокнистого материала (тканная или однонаправленная) на поверхность оправки по винтовой линии. При этом витки, образованные непрерывной укладкой ленты, плотно прилегают между собой или имеют строго постоянный нахлест, величина которого связана с числом формуемых одновременно слоев заданной структуры.

Возможны два варианта укладки слоев армирующего материала:

- однослойная укладка, при которой формуется слой толщиной, равной толщине одной ленты, а ленты между собой укладываются строго встык (рис. а);
- многослойная укладка, при которой многослойная структура формируется за один проход раскладывающего устройства, а лента укладывается на оправке с нахлестом, характеризуемым параметром k (б).

Этот метод намотки применяют в основном для изделия цилиндрической формы. Однако возможна намотка изделий с углом конусности $\varphi < 20^\circ$ для “мокрого” способа и $\varphi < 30^\circ$ для “сухого” способа намотки.

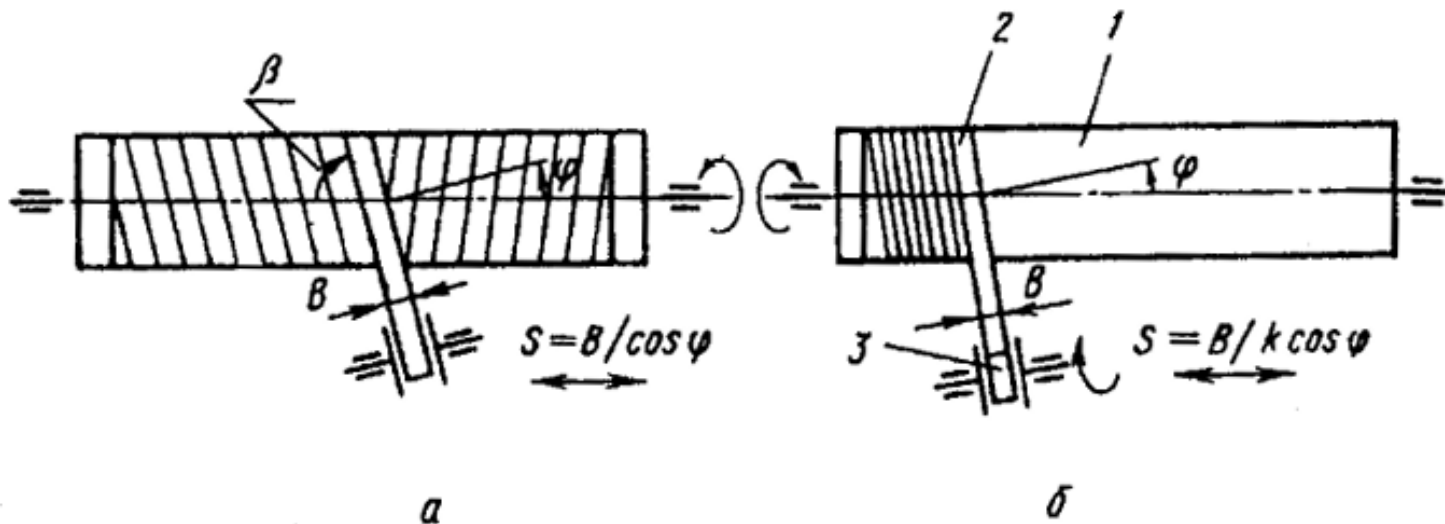


Схема спирально-винтовой намотки лентой:

a – в один слой за один проход; *б* – в B/k слоев за один проход: *1* – оправка; *2* – наматываемая лента; *3* – катушка с лентой; *S* – шаг намотки

Этот метод широко используют в сочетании с другими схемами намотки, особенно со спирально-перекрестной намоткой. Отдельно метод находит применение в тех случаях, когда необходимо провести усиление в местах, где требуется повышенная кольцевая прочность или жесткость (например, упрочнение металлических труб, стволов стрелкового оружия, пусковых контейнеров и др.).

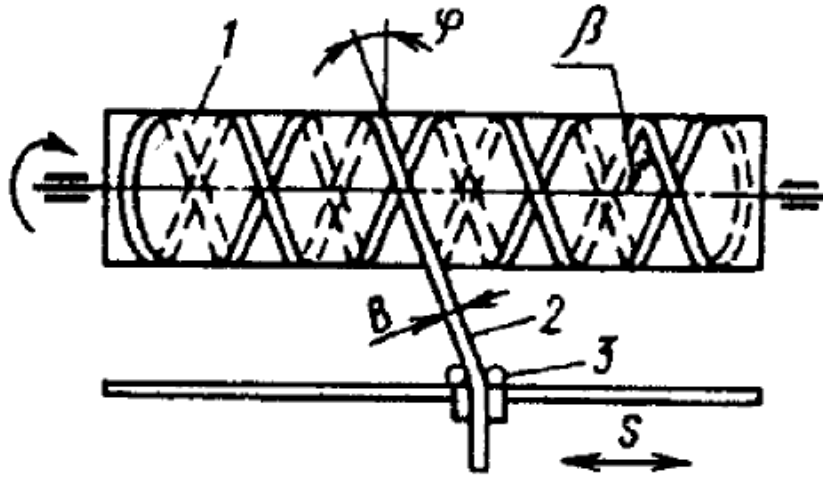


Схема спирально-перекрестной намотки:
1 – оправка; 2 – лента; 3 – каретка поперечного перемещения катушки

При этом методе лента армирующего материала заданной ширины B укладывается на оправку с подачей превышающей ширину ленты в целое число раз. За прямой и обратный ход раскладывающего устройства (полный проход) формируется один спирально-перекрестный виток, закрывающий часть поверхности оправки. При следующем проходе раскладывающего устройства лента укладывается встык к ранее намотанной (см. рисунок). Процесс ведут до тех пор, пока не будет закрыта вся поверхность оправки и, таким образом, сформирован полный двойной слой. Для получения заданной толщины стенки формуемого изделия проводят намотку нескольких таких слоев.



Спирально-перекрестная намотка (2)



Этот метод намотки наиболее распространен; его широко используют для изготовления изделий, имеющих форму тел вращения с произвольной образующей - цилиндров, конусов, сфер, баллонов давления и др.

Метод имеет большой диапазон возможностей по конструированию различных схем укладки волокнистого армирующего материала в соответствии с действующими нагрузками.

Меняя угол намотки, можно получить различное распределение нагрузок в продольном и окружном направлениях, т.е. распределяя армирующий материал вдоль направления действия главных напряжений от действующих нагрузок, можно достигнуть максимального использования прочности исходных волокон в изделиях.

С этой целью на практике применяют разновидности спирально-перекрестной намотки — спирально-продольную и спирально-поперечную. В первом случае спиральные витки чередуются с укладкой продольных слоев, а во втором — с укладкой окружных (кольцевых) слоев. Такой технологический прием позволяет реализовать множество схем армирования в изделии.

Метод заключается в одновременной укладке армирующего материала, сформированного в ленте, на оправку с двух раскладывающих устройств, движение которых программируется задается вращением оправки (см. рисунок). Непременным условием данного способа является то, что начало намотки спирально-винтовым и спирально-перекрестным методами и их окончание должно быть осуществлено в одно и то же время.

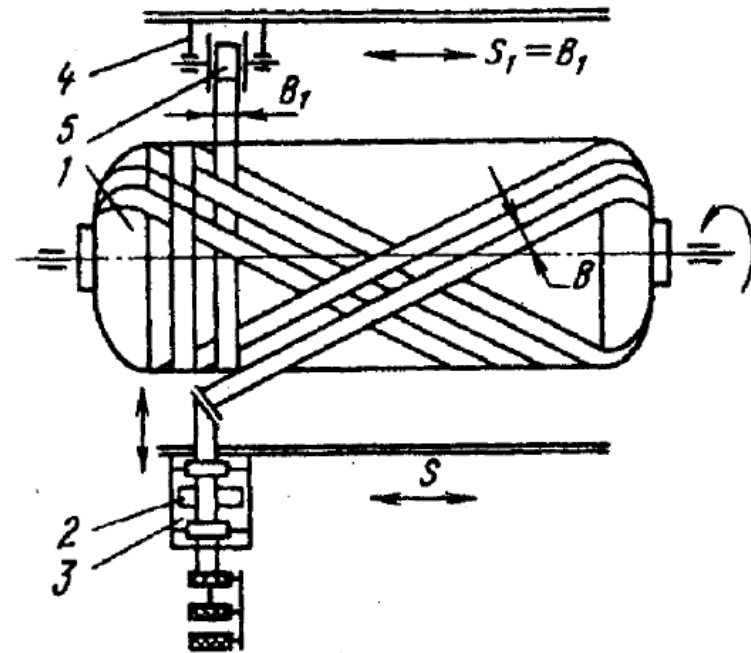


Схема совмещенной спирально-кольцевой намотки:
1 – оправка; 2 – лентопротягивающий тракт спиральных слоев;
3 – суппорт для спиральной намотки; 4 – суппорт тангенциальной намотки; 5 – катушка для кольцевых слоев

Метод применяют для изготовления намоткой изделий цилиндрической и конической формы с углом конусности не более 20° .

Разработка такого усовершенствованного метода намотки позволила: полностью автоматизировать процесс намотки оболочек; исключить вынужденную обрезку ленты армирующего материала при переходе от намотки спиральных слоев к кольцевым, что упрощает силовое замыкание структуры; увеличить производительность намотки на 35...40 %.

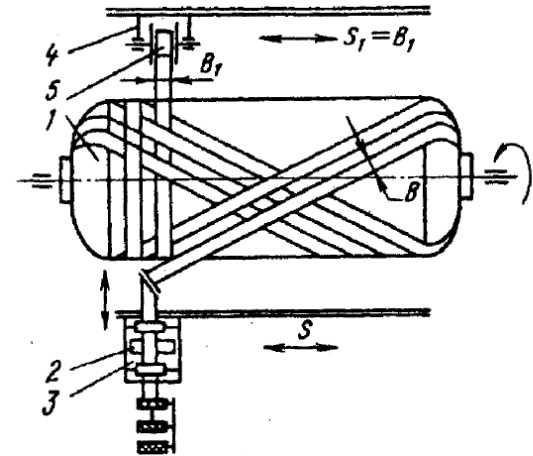


Схема совмещенной спирально-кольцевой намотки:
1 – оправка; 2 – лентопротягивающий тракт спиральных слоев;
3 – суппорт для спиральной намотки; 4 – суппорт тангенциальной намотки; 5 – катушка для кольцевых слоев

При проектировании технологического процесса совмещенной спирально-кольцевой намотки возникает необходимость оптимизировать схему армирования, чтобы максимально использовать положительные стороны способа и выбрать технологические параметры кольцевой намотки для обеспечения расчетной схемы армирования и соответственно несущей способности оболочки.



К технологическим параметрам современной спирально-кольцевой намотки, определяющим конструкцию композиционного материала, относятся:

- подача суппорта кольцевой намотки,
- ширина ленты кольцевой намотки,
- количество армирующего материала в ленте кольцевой намотки.

Для равномерного распределения кольцевой и спиральной арматуры по толщине оболочки следует исходить из условия одновременности завершения намотки спирального и кольцевого армирующего материала в пределах одного спирально-кольцевого пакета.

В реальных конструкциях соотношение спиральных и кольцевых слоев, как правило, зависит от действующих на изделие нагрузок, т.е. на один спиральный слой может приходиться два-три, а иногда и большее количество кольцевых слоев.

Недостатком рассматриваемой схемы намотки является нарушение регулярности структуры материала, проявляющееся в виде образования многочисленных пересекающихся узлов.

Технологическая схема такого метода намотки показана на рисунке. Вертлюг-дорн, на котором по периметру установлены шпули с волокном, вращаясь синхронно с вращением оправки, перемещается вдоль оси оправки, укладывая продольные ленты. Одновременно с раскладчика спирально-винтовой намоткой укладываются кольцевые слои ленточного армирующего материала, фиксирующие ленты продольной укладки.

Этот метод, как правило, применяют при «сухом» режиме формования изделий. Метод высокопроизводителен, поэтому его используют в серийном производстве товаров народного потребления для изготовления лыжных палок, удилиц, труб и т.п.

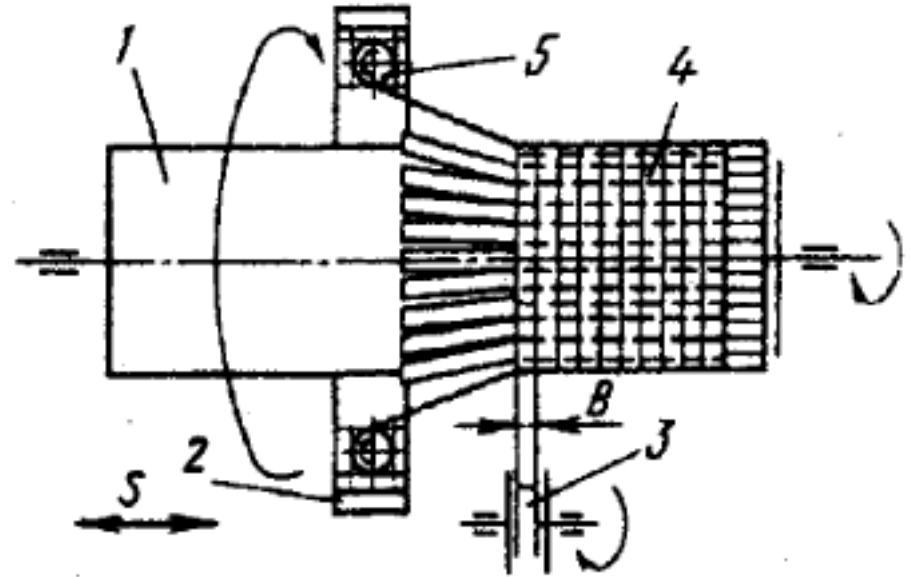


Схема продольно-поперечной намотки:

1 – оправка; 2 – вертлюг катушек продольных лент; 3 – катушка кольцевой ленты; 4 – наматываемая оболочка; 5 – катушка продольной ленты

Метод заключается в том, что слой продольно-поперечного армирования формируется не на всей длине оправки, а в пределах технологической ленты, укладываемой на оправку спирально-винтовым методом с малой подачей. Набор требуемой толщины стенки формуемого изделия осуществляется обычно за один ход раскладывающего устройства (см. рисунок).

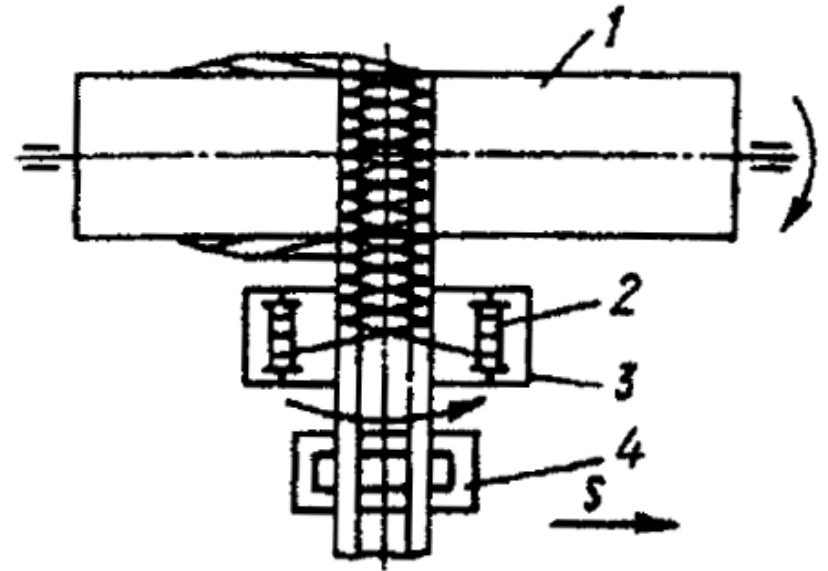


Схема косослойной продольно-поперечной намотки:
1 – оправка; 2 – катушка для нитей;
3 – вертлюг для укладки осевых нитей; 4 – ванна для пропитки



Косослойная продольно-поперечная намотка(2)



Формуемое изделие образуется путем спирально-винтовой намотки на оправку псевдоленты, образованной лентой кольцевого армирования, состоящей из n прядей, и нитями осевого армирования, подаваемых с вертлюга.

Пряди ленты кольцевого армирования пропитываются связующим непосредственно в процессе намотки «мокрым» способом, пропитка сухих осевых нитей осуществляется на оправке за счет избытка связующего в ленте кольцевых прядей.

Станки, осуществляющие такую намотку, оснащены специальными устройствами – вертлюгами, вращающимися вокруг движущейся ленты и осуществляющими с большой скоростью поперечную обмотку этой ленты. Так как намотку такой ленты на оправку проводят с шагом значительно меньшим, чем ее ширина, то суммарный нахлест с каждым витком увеличивается, и лента укладывается с наклоном к образующей цилиндра («косослойно») до тех пор, пока произведение шага ее намотки и числа оборотов, сделанных оправкой, не станет равным ширине наматываемой ленты. При этом нити ленты, ориентированные в окружном направлении, являются несущей арматурой для окружных рабочих напряжений, а перпендикулярные ленты волокна ее наружной обмотки - несущей арматурой для осевых напряжений.



Такой метод намотки оболочек является особенно перспективным при намотке труб бесконечной длины, так как в этом случае сразу, за один проход, наматывается вся расчетная толщина трубы. В этом случае намоточные станки доукомплектовывают туннельными печами, обеспечивающими быстрое отверждение связующего, а оправки – устройствами для перемещения изготавливаемой трубы вдоль ее оси.

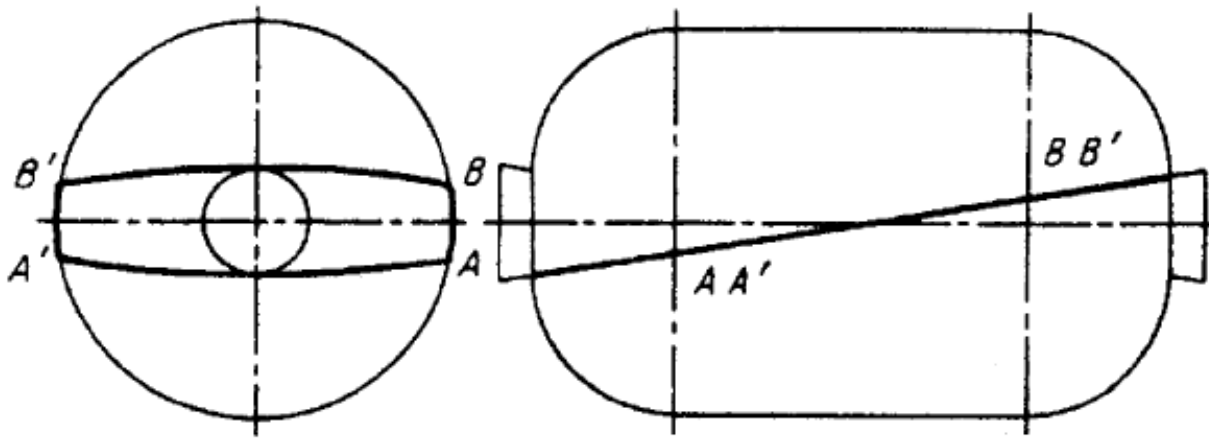
Кроме того, его широко используют для изготовления напорных труб малого и среднего диаметров, а также конических изделий с углом конусности не более 20°



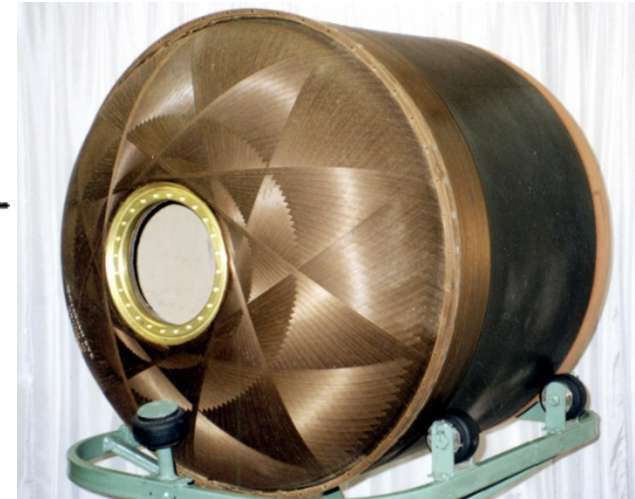
Планарная (полюсная, орбитальная, плоскостная) намотка



Планарная намотка, называемая также полюсной, орбитальной, плоскостной осуществляется пряжей нитей, лентой, жгутом на неподвижную в плоскости намотки и в пределах одного витка оправку (см. рисунок).



Траектория при однослойной полюсной намотке





Планарная (полюсная, орбитальная, плоскостная) намотка (2)



Армирующий наполнитель укладывается относительно продольной оси изделия под заданным углом, близким к 0° , в зависимости от диаметров полюсных отверстий. Устройство-раскладчик может быть неподвижным относительно наматываемого изделия или может вращаться вокруг неподвижной оправки (орбитальная намотка). После каждого оборота оправка перемещается на расстояние, соответствующее одной ширине ленты, которая укладывается впритык одна за другой, перекрывая всю поверхность оправки. Готовый слой состоит из двух сложений, направленных в противоположные стороны относительно угла намотки.

Планарную намотку можно применять в сочетании с кольцевой намоткой (см. рисунок).

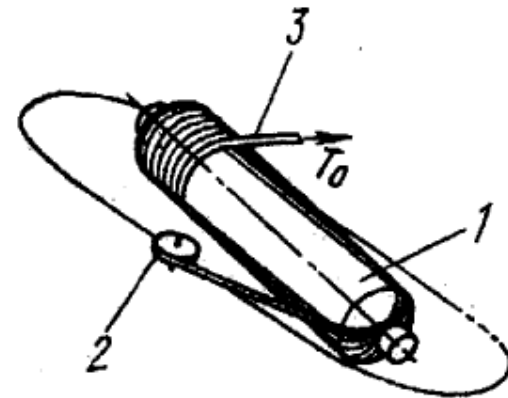
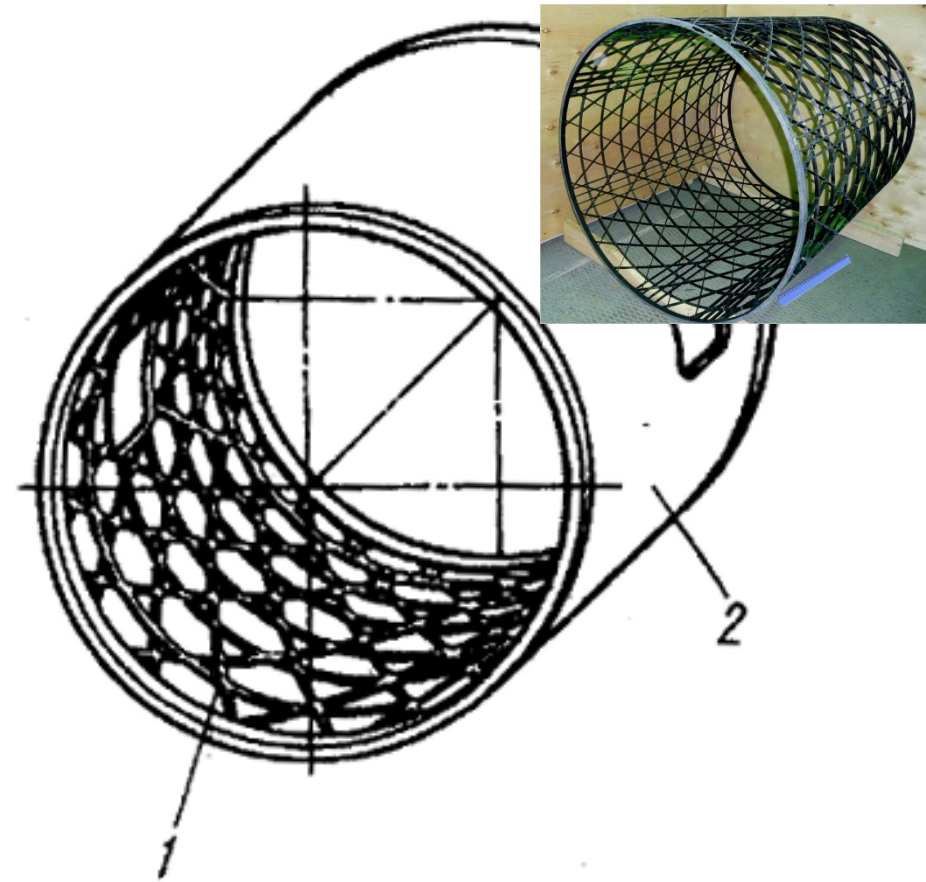


Схема орбитальной намотки в сочетании с кольцевой подмоткой по цилиндрической части:
1 – оправка; 2 – раскладчик; 3 – кольцевые слои

Этот метод намотки получил свое развитие в связи с разработкой сухих отсеков летательных аппаратов, имеющих цилиндрическую форму и подвергающихся действию интенсивных сжимающих нагрузок, при которых существенную роль играет изгибная жесткость элементов структуры оболочки и их прочность при сжатии.

Один из вариантов пространственно армированной оболочки, позволяющий повысить изгибную жесткость структуры при сохранении высоких жесткостных и прочностных свойств в плоскости укладки нитей, показан на рисунке.



Конструкция сетчатой структуры:
1 – сетчатая оболочка; 2 – наружный несущий слой

Сетчатая оболочка состоит из семейства ребер, образованных тетранамоткой и уложенных под некоторыми углами $\pm\beta$ к образующей цилиндрической оболочке внутренней и наружной обшивок, армированных в кольцевом направлении цилиндрической оболочке внутренней и наружной обшивок, армированных в кольцевом направлении.

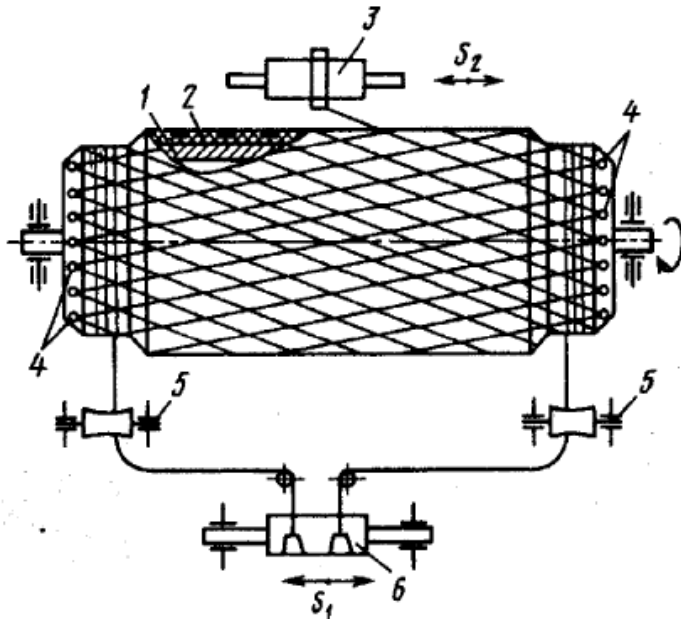


Схема тетранамотки:

1 – корпус оправки; 2 – резиновый мешок с прорезанными канавками; 3 – раскладчик станка; 4 – технологические штыри; 5 – направляющие ролики кольцевых слоев; 6 – раскладчик кольцевой намотки

Метод непрерывной тетранамотки обладает коротким циклом изготовления и практически безотходной технологией. Схема тетранамотки сетчатой оболочки показана на рисунке.

Металлическая оправка для намотки состоит из корпуса с поверхностным удаляемым слоем силикано-каучуковой резины типа СКТВ, имеющей высокий КЛТР, и объемных технологических штырей на торцевой части корпуса в местах изменения направления укладки.

В резиновом слое предварительно вырезаются канавки, в которые при намотке укладывается армирующая лента. Углы укладки, количество ячеек, геометрию ячеек, высоту ребер жесткости предварительно рассчитывают.

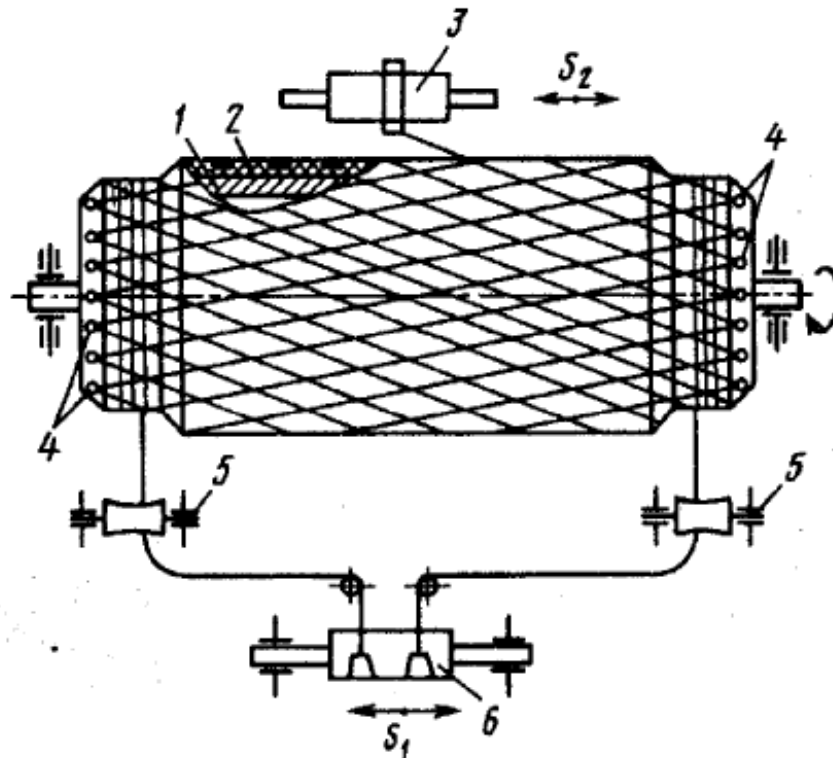


Схема тетранамотки:

1 – корпус оправки; 2 – резиновый мешок с прорезанными канавками; 3 – раскладчик станка; 4 – технологические штыри; 5 – направляющие ролики кольцевых слоев; 6 – раскладчик кольцевой намотки

После заполнения канавки материалом на глубину, равную высоте ребер, намотку прекращают и выполняют кольцевую подмотку в районе технологических штырей. Намотку несущей оболочки осуществляют непосредственно на сетчатую оболочку обычным способом. После окончания намотки изделие отверждают, затем на токарном станке отрезают технологическим припуском по краям оправки, снимают с оправки и удаляют резиновый мешок.

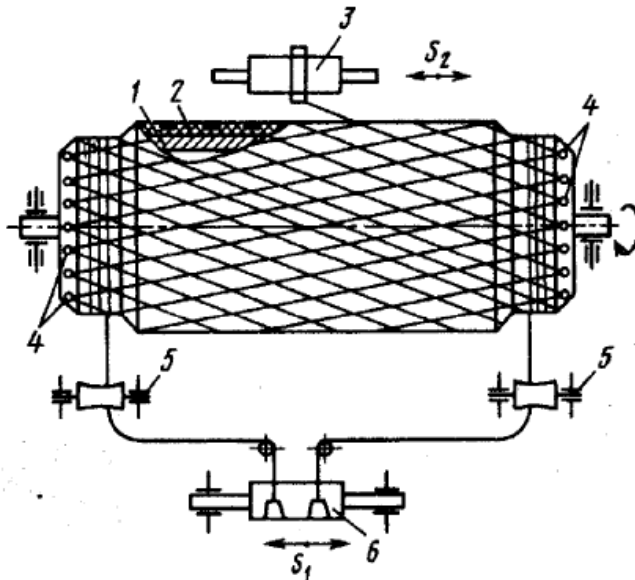


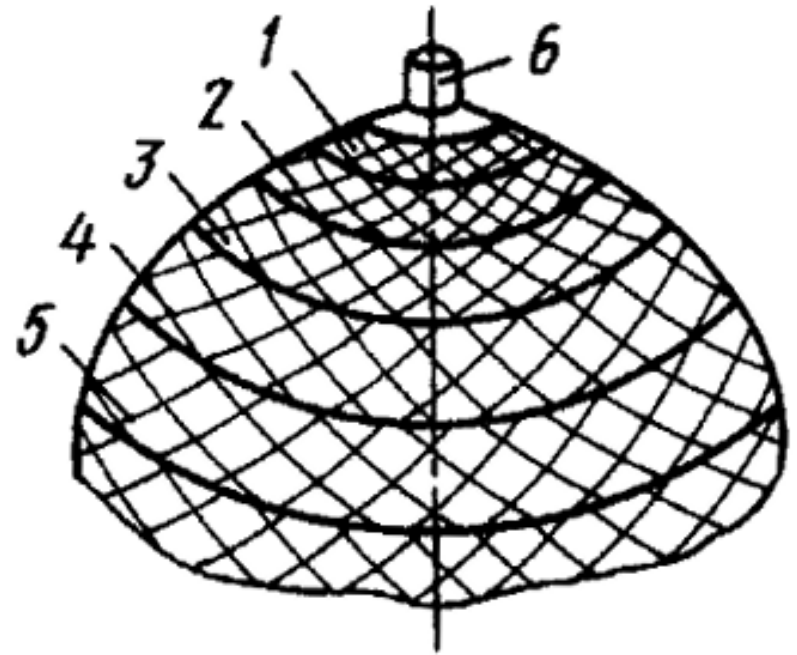
Схема тетранамотки:

1 – корпус оправки; 2 – резиновый мешок с прорезанными канавками; 3 – раскладчик станка; 4 – технологические штыри; 5 – направляющие ролики кольцевых слоев; 6 – раскладчик кольцевой намотки

Этим способом можно изготавливать как цилиндрические, так и конические оболочки.

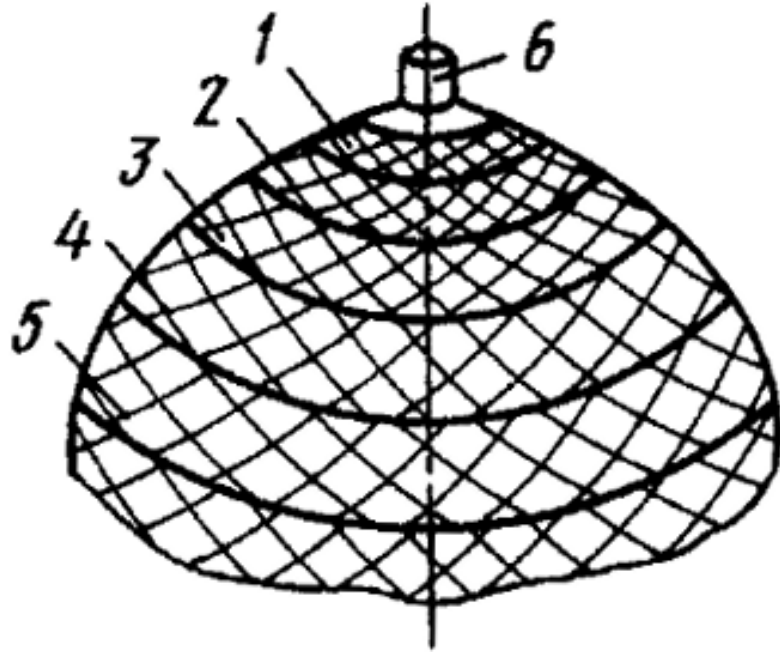
Этот метод намотки имеет ограниченное применение: его используют в основном для намотки сферических сосудов давления. В силу своей технологической схемы его можно отнести к полюсной намотке.

Единственным отличием является наличие зонального движения оправки на намоточном станке, которое позволяет формировать в изделии ярко выраженные зоны, различные по толщине



Общий вид сферического сосуда давления, изготовленного зональной намоткой:

1 – 5 – последовательно расположенные зоны; 6 – штуцер



Общий вид сферического сосуда давления, изготовленного зональной намоткой:

1 – 5 – последовательно расположенные зоны; 6 – штуцер

Появление зональной намотки в практике изготовления сосудов давления, работающих под внутренним давлением, объясняется исследованием наиболее рациональных схем армирования сосудов минимальной массы. Общий вид сферического сосуда давления, изготовленного зональной намоткой, показан на рисунке.



Общие характеристики методов НАМОТКИ



Разнообразие способов получения изделий, имеющих форму тел вращения, предоставляет широкие возможности для выбора оптимальных конструктивно-технологических решений для создания прогрессивных конструкций из волокнистых полимерных композитов.

Вместе с этим практика создания изделий из полимерных композитов позволила выделить целый ряд отработанных и проверенных решений, определяющих однозначные принципы выбора того или иного способа намотки.

Например, крупногабаритные (диаметром более 800 мм) цилиндрические однослойные и многослойные конструкции с кольцевыми местами усиления жесткости целесообразнее с точки зрения получения лучших технико-экономических показателей изготавливать методом окружной намотки из предварительно пропитанных тканых армирующих материалов.



Общие характеристики методов намотки



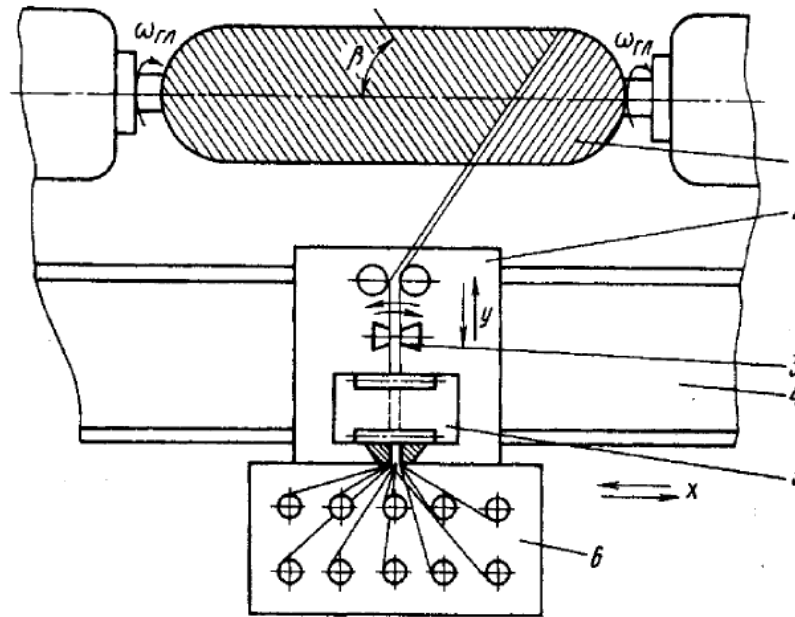
Для получения труб большого диаметра, работающих в условиях высокого внутреннего давления, хорошие результаты дает способ продольно-поперечной намотки из предварительно пропитанных лент с однонаправленной волокнистой структурой.

Для получения труб малого диаметра (менее 400 мм) применяют косослойную продольно-поперечную спиральную намотку «мокрым» способом с использованием нитей и жгутов армирующего материала и эпоксидных связующих.

Достаточно широкое распространение для производства напорных труб малой длины получил способ окружной намотки полотнами предварительно пропитанных тканей.

Создание баллонов высокого давления сферической и цилиндрической формы со сферическими цельномотаными днищами стало возможным благодаря созданию и развитию теории и метода спиральной намотки непрерывными лентами из волокнистых материалов по программируемым траекториям.

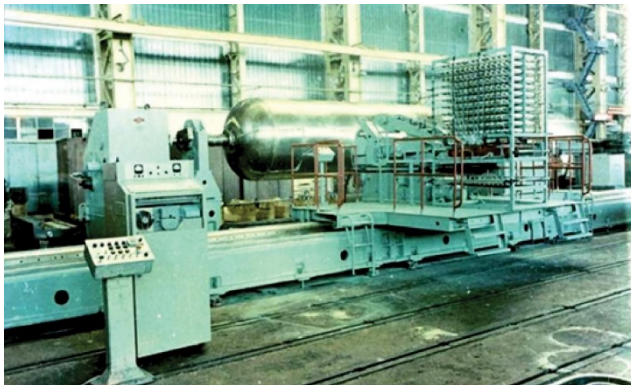
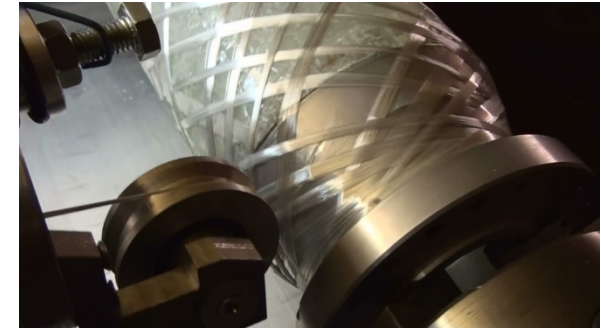
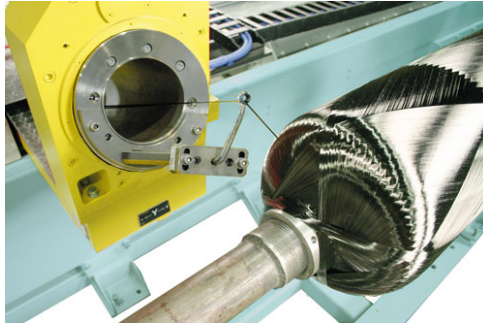
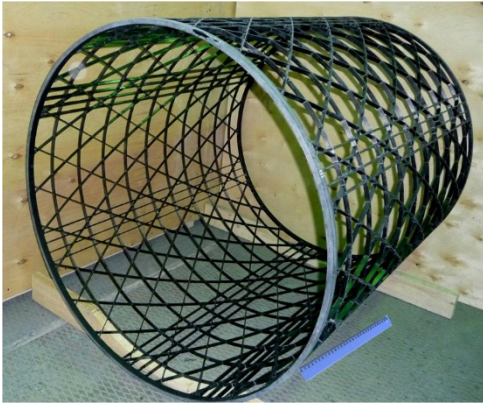
Наиболее универсальными в настоящее время являются станки для спиральной и тангенциальной намотки токарного типа (рисунок). Такое название обусловлено тем, что намотка осуществляется при возвратно-поступательном перемещении каретки с нитераскладчиком вдоль оси x , причем вращение оправки и скорость перемещения нитераскладчика имеют соотношение, обеспечивающее сохранение расчетного угла намотки β на всех участках траектории витка.



Кинематическая схема 5-координатного станка для спиральной намотки:
1 – оправка; 2 – намоточно-пропиточный тракт; 3 – раскладывающее устройство; 4 – направляющие движения каретки; 5 – пропиточная ванна или нагревательное устройство для препрегов; 6 – шпулярник



Намоточные станки





Намоточные станки



Для реализации требуемого соотношения необходимо осуществить следующие движения:

- вращение оправки с постоянной угловой скоростью главного движения $\omega_{гл}$;
- независимое возвратно-поступательное движение каретки параллельно оси оправки x ;
- независимое возвратно-поступательное движение каретки перпендикулярно оси оправки y ;
- разворот раскладывающего ролика по крену, тангажу и углу рыскания ϕ .

Результирующее движение каретки по указанным осям оправки представляет собой траекторию витка относительно вращающейся оправки, которая с определенной точностью обеспечивает требуемый рисунок намотки. Среди зарубежных станков такого типа наиболее известны станки, выпускаемые фирмой “Bayer” (Германия).

Развитие намоточных станков спиральной намотки идет по пути создания станков портального типа, которые оснащены современными компьютерными системами и на которых можно наматывать изделия практически любой формы. Схема одного из таких станков, выпускаемых французской фирмой “Division plastrex”, показана на рисунке.

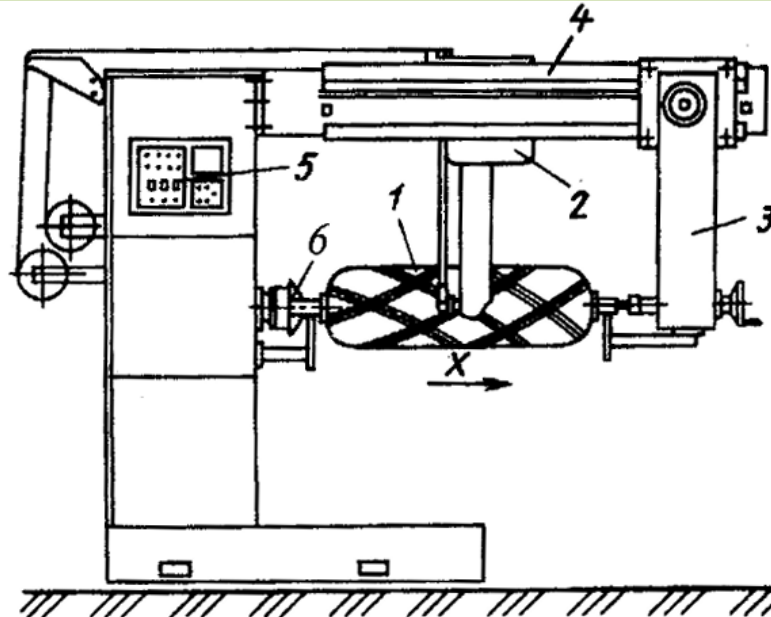


Схема устройства намоточного станка портального типа:
1 – оправка; 2 – вертикальная каретка с раскладчиком; 3 – подвижная задняя опора; 4 – верхний порт; 5 – компьютерная система управления и контроля технологических параметров; 6 – шпиндель главного движения



Намоточные станки

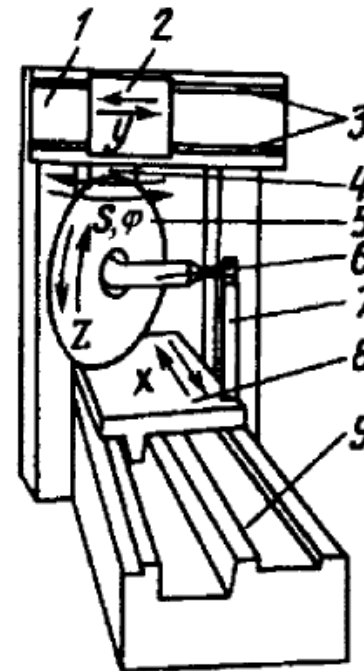


В станках, предназначенных для продольно-поперечной намотки, которые также относятся к станкам токарного типа, имеется дополнительное устройство – вертлюг, охватывающий оправку, вращающийся синхронно с ней, и одновременно перемещающийся поступательно вдоль ее оси поочередно от одного торца цилиндрического изделия к другому.

По периметру вертлюга размещены бобины с лентами намоточного материала из армирующих нитей, предназначенных для укладки в продольном направлении. Ширину этих лент и их количество подбирают таким образом, чтобы чулком закрыть сразу всю цилиндрическую поверхность оправки. Бобины с примоточным материалом для поперечной намотки при этом размещают на суппорте станка, перемещающемся синхронно с вертлюгом параллельно оси оправки.

Этот станок предназначен в основном для намотки цилиндрических трубопроводов. Одной из главных конструктивных особенностей станка, определяемых его назначением, является тот факт, что в процессе намотки нитераскладчик вращается вокруг неподвижной оправки. Все перемещения рабочих органов станка осуществляются по расчетной программе.

В России для намотки изделий, имеющих кривую продольную ось, был разработан намоточный станок СНП-3 (рис).



Для управления станком используют серийную систему программного управления СЦП-5, информация в которую поступает от перфоленты. Станок имеет отдельные приводы, осуществляющие движения по четырем координатам (см. рисунок):

- продольное перемещение стола с установленной на нем оправкой (координата x);
- поперечное перемещение каретки с наматывающим устройством (координата y);
- вращение планшайбы с бобинами стеклонитей вокруг оправки (координата z);
- поворот вертлюга с планшайбой вокруг вертикальной оси (координата φ).

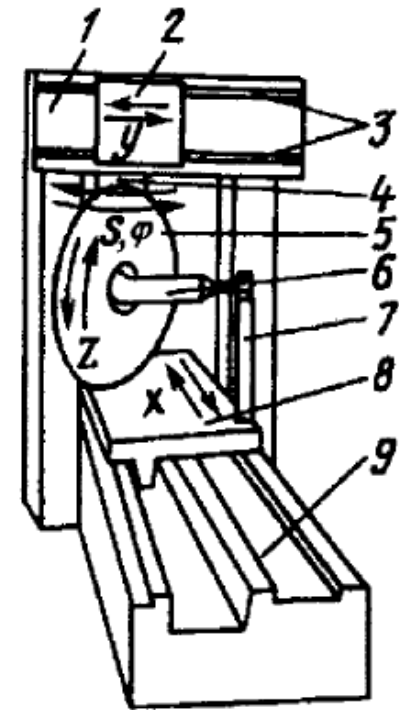


Схема станка

СНП-3:

- 1 – траверса; 2 – каретка;
- 3 – направляющие каретки;
- 4 – вертлюг; 5 – планшайба;
- 6 – оправка; 7 – опора крепления оправки;
- 8 – стол; 9 – станина



Основные типы отечественных станков для спиральной и продольно-поперечной



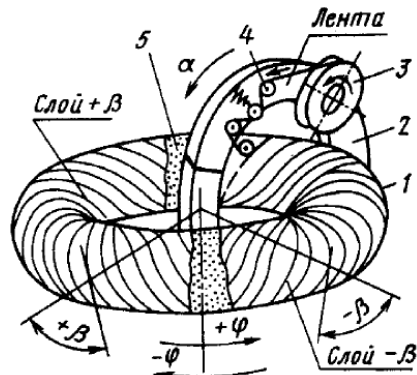
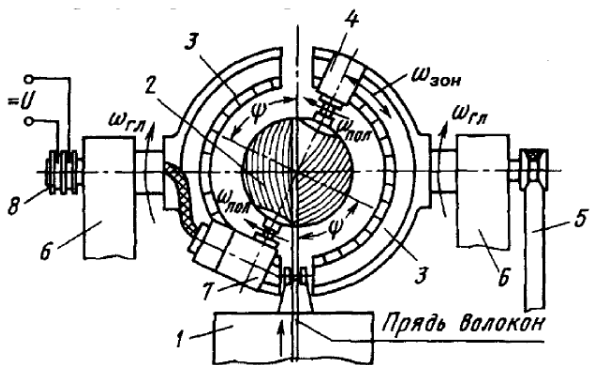
Технические характеристики отечественных станков спиральной и продольно-поперечной намотки

Наименование параметра	РПН-380 Т400	ССППН Т250М	НК-9ПУ	НК- 10ПУ	НК- 11ПУ	СНП-2	СНП-4М КУ-319	КУ-320	КУ-421
Максимальный диаметр наматываемого изделия, мм	380	1000	500	1600	2500	700	2000	2500	2500
Максимальная длина наматываемого изделия, мм	3500	4000	2000	4000	10000	2200	6300	7000	9000
Углы намотки, град	10-90	30-90	10-90	5-90	5-90	12-90	10-90	10-90	10-90
Точность укладки, мм	1,5	—	—	—	—	2	2	2	2
Максимальная скорость перемещения каретки, м/мин	160	—	24	30	30	12	12	12	12
Количество управляемых координат, шт.	2	2	5	5	5	5	5	5	5
Максимальная масса оправки с изделием, кг	800	3000	—	—	—	1000	16000	8000	23000
Максимальная ширина сформированной ленты, мм	200	200	25	—	—	15	80	80	80 (120)
Максимальное натяжение ленты, Н	600	2000	500	—	—	300	2000	1200	250 (300)
Габаритные размеры, мм:									
длина	5600	8100	6420	—	—	5000	16000	16000	22300
ширина	6930	4450	4050	—	—	2000	6000	9000	7500
высота	1950	2200	1690	—	—	1900	3500	3500	3500
Масса станка, кг	2200	10000	3500	—	—	13000	55000	66000	77000

Намотку сосудов давления сферической, эллипсоидной, изотенсоидной, чечевидной форм можно выполнить на станках токарного типа, поэтому специальные станки для намотки таких изделий серийно не выпускаются. Тем не менее появление схемы зональной намотки таких сосудов привело к созданию двух незначительно различающихся моделей станков марок СН-6 и НШБ-2.

Основные технические характеристики станков марок СН-6 и НШБ-2 соответственно:

Диаметр наматываемого баллона, мм	200–650	10–360
Зональный угол намотки, град	7–90	10–90
Число оборотов шпинделя, об/мин	1,5–20	2–25



На станке марки СН-6 (см. рисунок) перед началом намотки оправку закрепляют в опорных узлах на секторах в расчетном положении (первая зона намотки). Синхронное вращение правого и левого секторов обеспечивается разрезными шестернями (безлюфтовая передача).

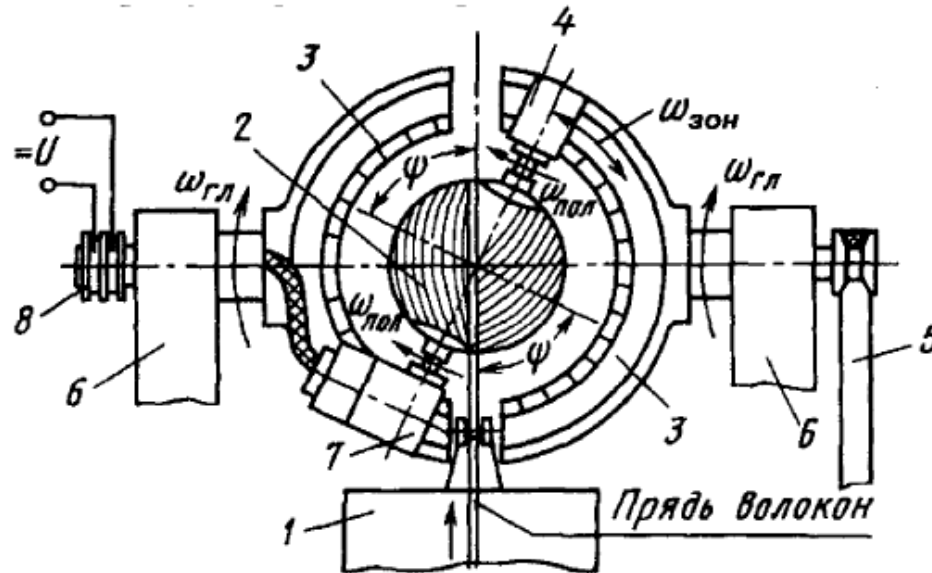


Схема зональной намотки сферической оболочки на станке

СН-6:

1 – шпулярник с пропиточно-натяжным трактом; 2 – сферическая оправка с намотанной зоной; 3 – вращающиеся сектора; 4 – опора для оси оправки; 5 – электромеханический привод станка; 6 – корпус станка; 7 – двигатель полярного вращения; 8 – коллектор привода;
 $\omega_{\text{гл}}$ – главное движение оправки; $\omega_{\text{пол}}$ – полярное вращение оправки;
 $\omega_{\text{зон}}$ – зональное движение (изменение зонального угла намотки ψ)

Главное движение осуществляется двигателем постоянного тока, а скорость главного движения регулируется сменными шестернями, расположенными в передней бабке. Скорость полярного вращения задается управляемым двигателем постоянного тока с редуктором.

Намотка одной зоны осуществляется за один оборот оправки вокруг своей оси. Поэтому скорость полярного вращения и передаточное число редуктора подбирают так, чтобы за один оборот главного движения оправка сместилась на расстояние, равное или меньшее ширины наматываемой ленты.

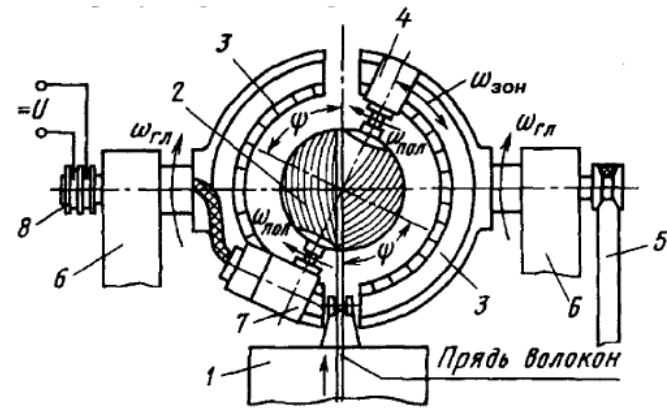


Схема зональной намотки сферической оболочки на станке

SN-6:

1 – шпулярник с пропиточно-натяжным трактом; 2 – сферическая оправка с намотанной зоной; 3 – вращающиеся сектора; 4 – опора для оси оправки; 5 – электромеханический привод станка; 6 – корпус станка; 7 – двигатель полярного вращения; 8 – коллектор привода; $\omega_{\text{гл}}$ – главное движение оправки; $\omega_{\text{пол}}$ – полярное вращение оправки; $\omega_{\text{зон}}$ – зональное движение (изменение зонального угла намотки ψ)

Перестановку оправки для намотки следующей зоны осуществляют вручную по угловым рискам, нанесенным на секторах. Положение оси оправки относительно оси главного движения может изменяться в диапазоне от 10° до 80° .

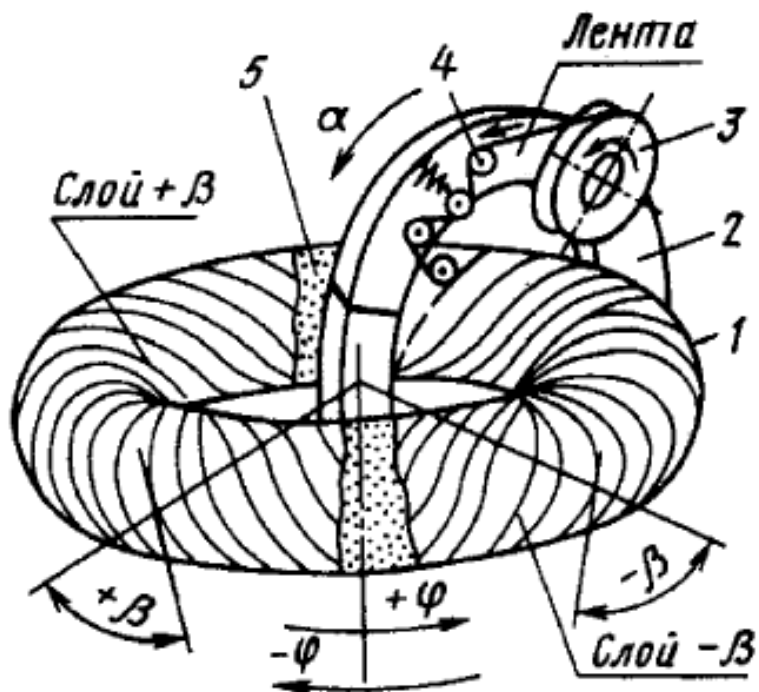


Схема намотки торовых оболочек на станке СНТ-2:

1 – композитная оболочка; 2 – намоточная головка; 3 – съемная катушка с препрегом; 4 – система направляющих роликов и устройство торможения; 5 – песчаная оправка

Для намотки силовой и герметизирующей оболочек торовых сосудов применяют малогабаритный торонамоточный станок марки СНТ-2 (см. рисунок). Станок предназначен для радиальной и спиральной намоток оболочек торовой формы, имеющих круговое, эллиптическое или произвольное сечение. Диаметр изготавливаемых изделий 300...500 мм, диаметр сечения 60...100 мм. Габаритные размеры станка 1200x800x1000 мм, масса станка 100 кг.

Станок имеет разъемную вращающуюся с постоянной угловой скоростью головку, центр которой совпадает с центром меридианального сечения торовой оправки. Намоточная головка выполнена в виде разъемного зубчатого кольца, на котором установлено несколько катушек с препрегом. С катушек лента препрега (или прядь волокон) сматывается на торовую оправку, образуя слой композита под углом $+\beta$ или $-\beta$ к меридиану оболочки.

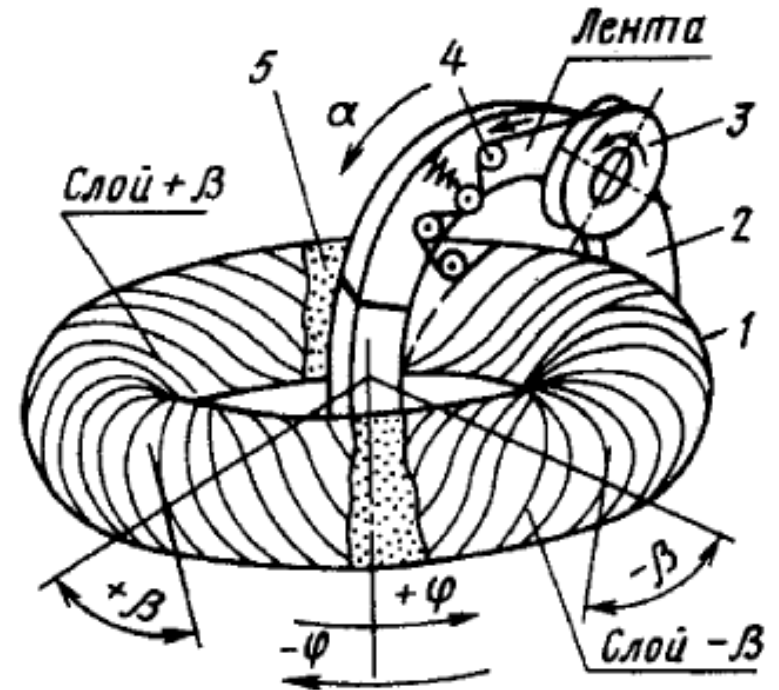
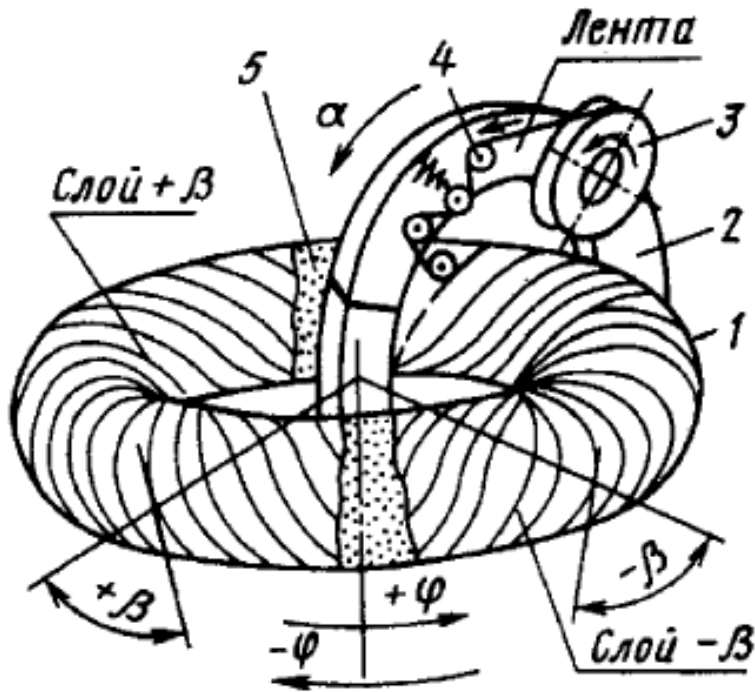


Схема намотки торовых оболочек на станке СНТ-2:
1 – композитная оболочка; 2 – намоточная головка; 3 – съемная катушка с препрегом; 4 – система направляющих роликов и устройство торможения; 5 – песчаная оправка



Кроме того, на силовом кольце крепятся фрикционное устройство для торможения ленты, система направляющих роликов, измеритель натяжения нитей индукционного типа и ролик - раскладчик наполнителя. Количество оборотов намоточной головки фиксируется при помощи электромеханического счетчика.

Схема намотки торовых оболочек на станке СНТ-2:

1 – композитная оболочка; 2 – намоточная головка; 3 – съемная катушка с препрегом; 4 – система направляющих роликов и устройство торможения; 5 – песчаная оправка

Скорость вращения головки изменяется дискретно в пределах от 12 до 36 об/мин, что соответствует скорости намотки 4...12 м/мин. Расчетные углы намотки устанавливаются с помощью двух гитар сменных шестерен и червячно-кулачкового механизма, создающего ускоренное или замедленное вращение червячного колеса, а следовательно, и оправки в нужный момент времени. Станок обеспечивает укладку нитей под углами армирования ρ с точностью $\pm 2^\circ \dots 2,5^\circ$.

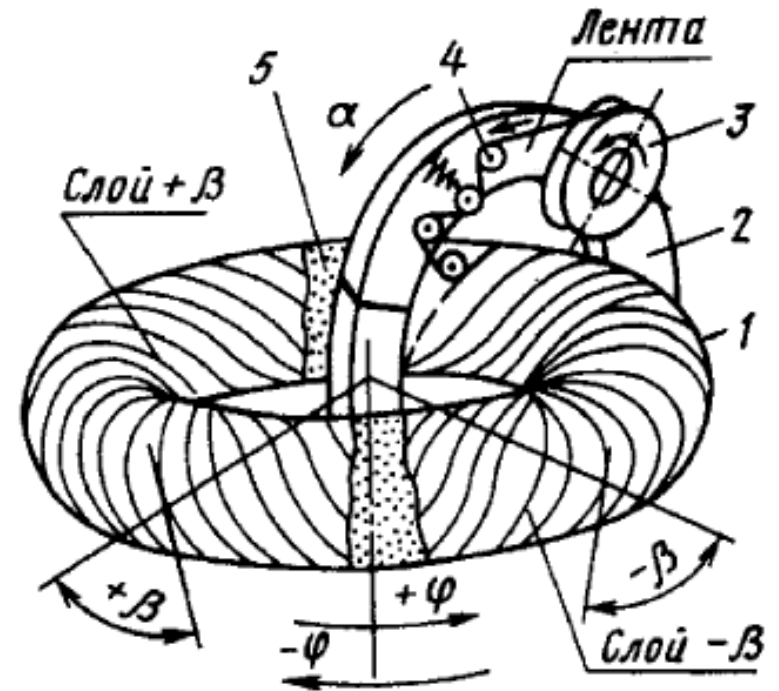


Схема намотки торовых оболочек на станке СНТ-2:
1 – композитная оболочка; 2 – намоточная головка; 3 – съемная катушка с препрегом; 4 – система направляющих роликов и устройство торможения; 5 – песчаная оправка



Технологические оправки для намотки



Во всех случаях изготовления изделий намоткой применяют специальную технологическую оснастку – оправку. Конструкция оправки должна отвечать следующим требованиям:

- соответствовать геометрии и форме внутренней конфигурации из делия;
- обладать достаточной прочностью при сжимающих нагрузках;
- не прогибаться под собственной массой;
- не проскальзывать на валу;
- легко удаляться после отверждения изделия предусматривать установку закладных элементов;
- иметь гладкую и ровную поверхность.

В соответствии с конструктивным оформлением оправки подразделяют на:

- цельные,
- разборные,
- разрушаемые.

Возможно применение и комбинированных оправок, включающих в себя элементы одноразового и многоразового использования.



Цельные оправки для намотки

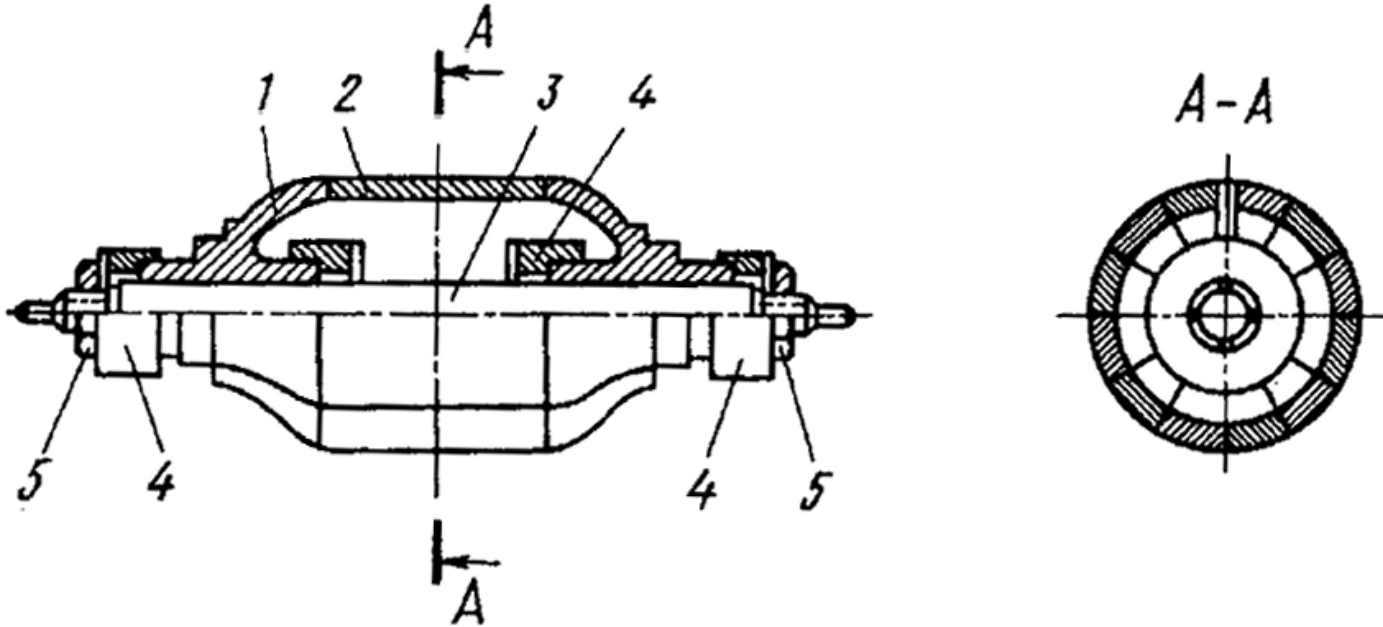


Цельные оправки применяют в серийном производстве при формовании изделий, из которых оправку можно извлечь полностью (цилиндры, конусы, полусферы и т.п.). В этих случаях извлечение оправки из изделия не представляет принципиальных трудностей, если на ее поверхность предварительно нанесено антиадгезионное покрытие.

Для обеспечения демонтажа поверхность цилиндрических оправок с небольшим технологическим конусом (1:100...1:200). Цельные оправки изготавливают из сталей и алюминиевых сплавов. Выбор материала оправки определяется размером изделий, их точностью и масштабом производства.

Извлекают оправку вручную (если она небольшая), либо с помощью специальных станков – кабестанов (в случае больших изделий). Применение неразборных многоразовых оправок целесообразно до диаметра изделий 500 мм.

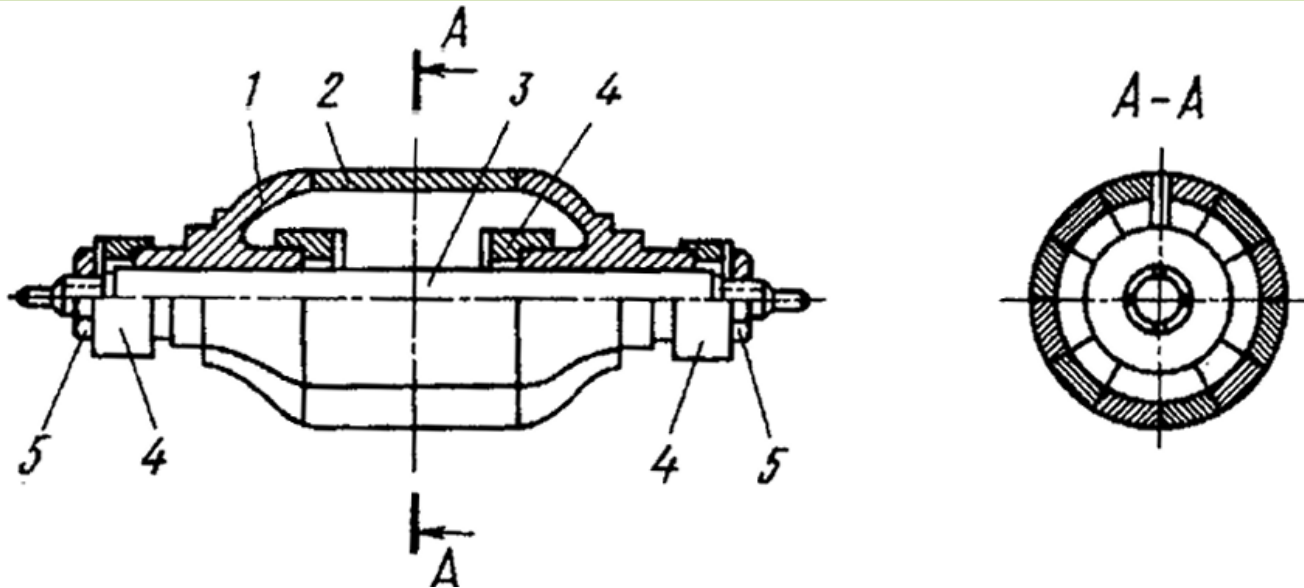
Разборные оправки используются при формовании изделий, из которых цельные оправки извлечь нельзя (цилиндрические оболочки с днищами, сферические оболочки с большими полюсными отверстиями). Для изготовления таких конструкций применяют разборные металлические оправки (см. рисунок).



Конструктивная схема металлической оправки:

1 – разборные части оправки, формирующие днища сосудов; *2* – цилиндрическая часть оправки; *3* – вал; *4* – гайки для сборки частей днищ; *5* – гайки крепления оправки на валу

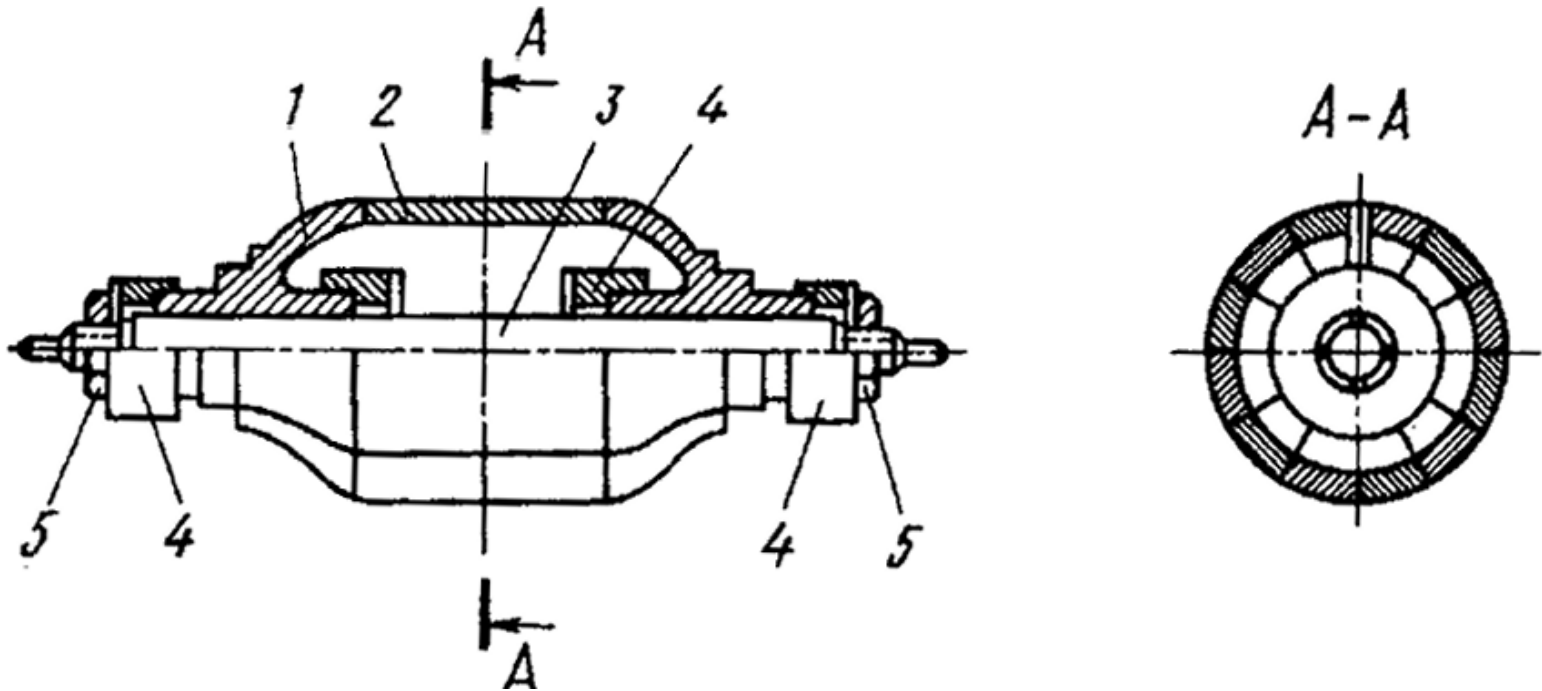
Разборная оправка разделена на три части, соответствующие профилированным днищам и цилиндрической части оболочки; каждая из них разрезана по образующей на тринадцать секторов, один из которых плоский. Части оправки, формирующие днища, устанавливаются в посадочных местах вала, а затем после установки секторов цилиндрической части всю оправку закрепляют гайками. Для демонтажа оправки достаточно извлечь вал и плоские секторы в каждой части, после чего остальные секторы можно свободно удалить из отвержденной оболочки через ее полюсные отверстия.



Разборные оправки

Разборная оправка обеспечивает точность и жесткость конструкции, является оправкой многоразового использования, сравнительно легко удаляется из готового изделия. Однако конструкция этой оправки сложная и процесс изготовления ее дороже по сравнению с другими типами оправок.

Разборные многоразовые оправки целесообразно использовать при изготовлении не менее 25 изделий диаметром от 500 до 1500 мм.





Разрушаемые оправки



Разрушаемые оправки применяют в тех случаях, когда контур изделия замкнутый или близок к такому (сферические, овалоидные, торовые оболочки с малыми полюсными отверстиями).

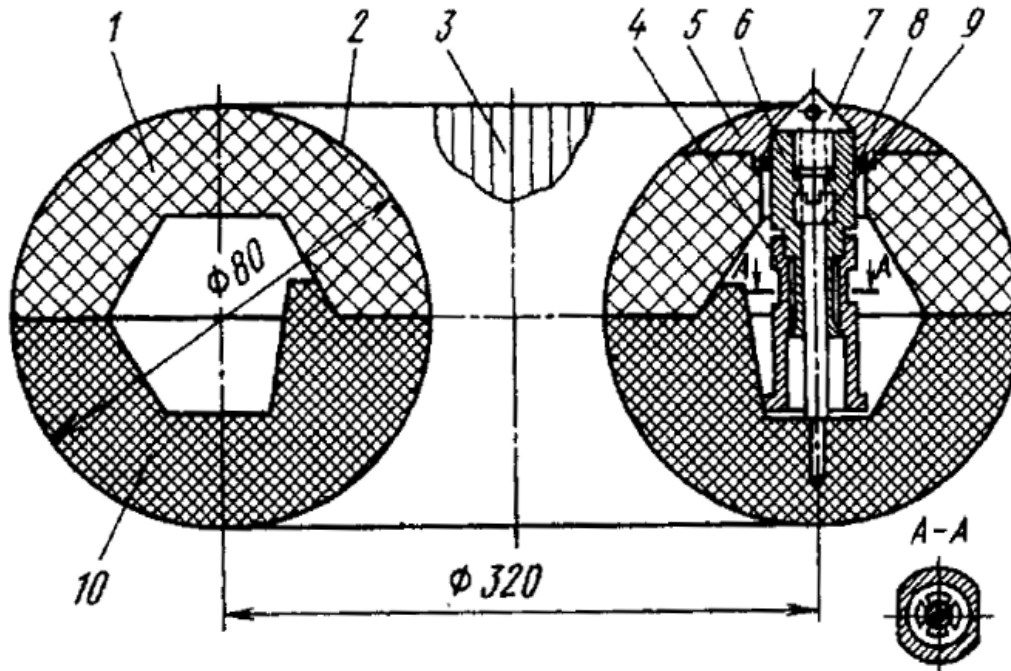
Для их изготовления можно использовать такие материалы, как:

- гипс;
- эвтектические соли;
- легкоплавкие металлы;
- песок, связанный раствором поливинилового спирта в воде;
- парафиновосковую смесь.

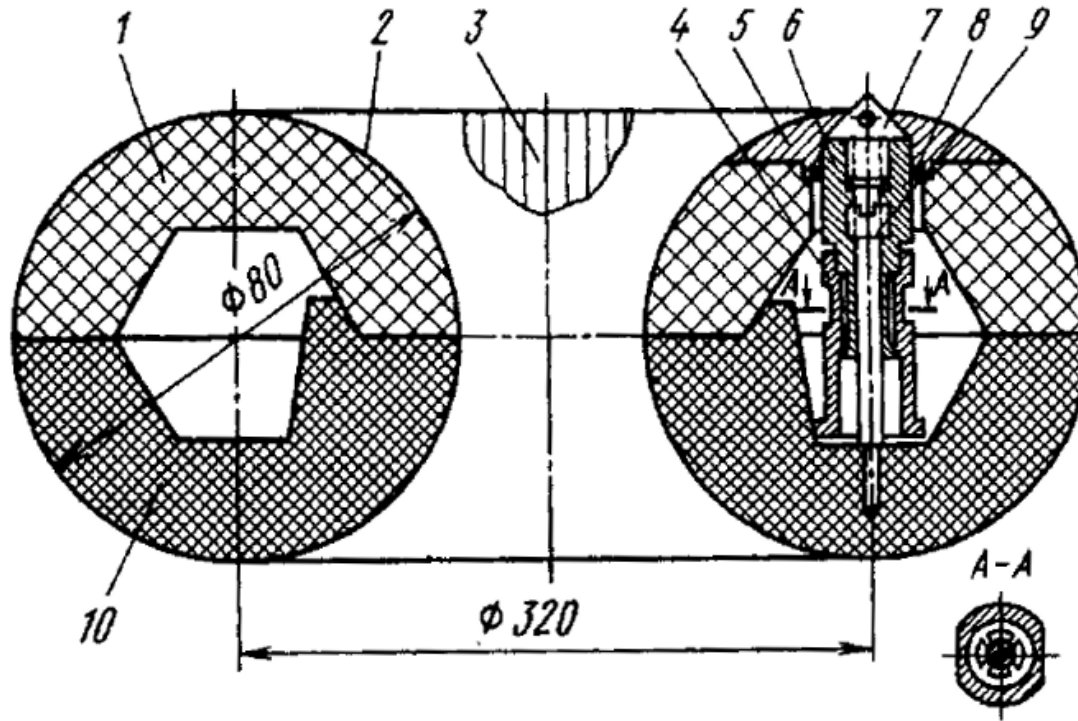
Такие оправки получают методами литья или прессования в специальных пресс-формах, поверхность которых покрыта кремнийорганической или графитовой смазкой. Их недостаток заключается в том, что они дают усадку, которая часто бывает неравномерной, а это приводит к нарушению точности размеров и геометрической формы готовых изделий. Удаляются такие оправки механическим разрушением, вымыванием, выплавлением, растворением в соответствующих жидкостях при нормальной или повышенной температурах.

Наиболее широко на практике применяют песчано-полимерные или аренальные (в Древнем Риме — круглая или овальная посыпанная песком площадка) оправки.

В качестве примера приведем конструктивную схему и процесс изготовления удаляемых песчаных оправок торовой формы.



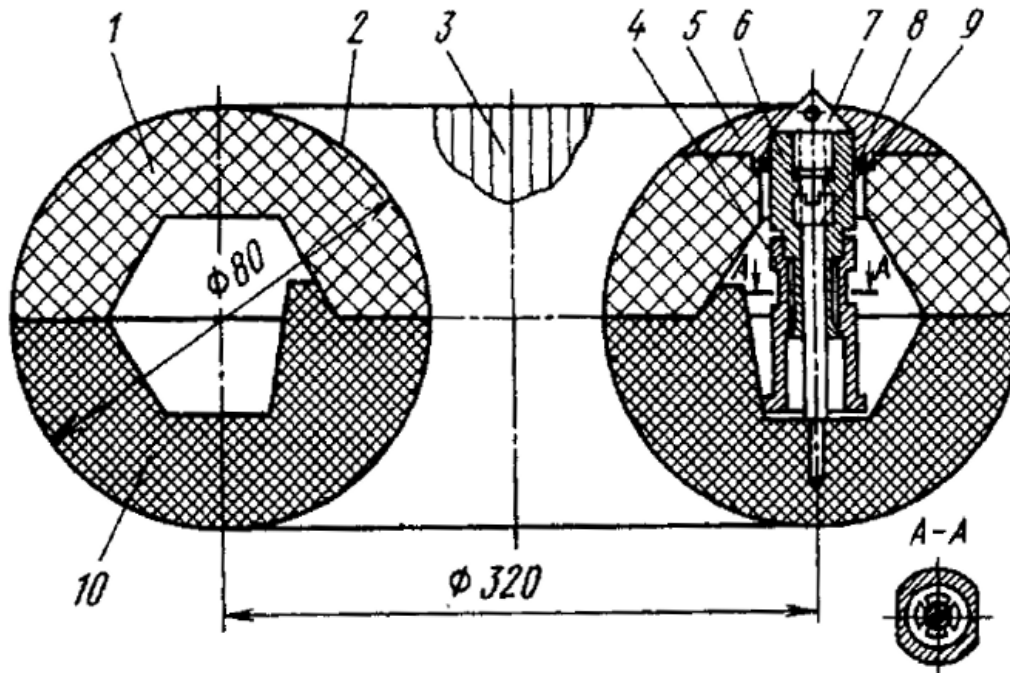
Оправка состоит из двух половинок, в одну из которых впрессована втулка с уплотнительным кольцом. Эти детали, а также штуцер являются элементами заправочного узла торового сосуда.



Конструктивная схема вымываемой песчаной оправки торовой формы с закладными элементами штуцера оболочки и цанговым устройством для извлечения штуцера из оправки после намотки однонаправленного КМ:

1, 10 – верхняя и нижняя половины торовой оправки; 2 – поверхностный слой из пленки ПВС-Э; 3 – схема укладки ленты, вырезанной из пленки ПВС-Э; 4 – штуцер; 5 – втулка; 6 – разжимная цанга; 7 – раздвижной конус; 8 – фторопластовое уплотнение; 9 – установочный винт

Штуцер размещают во внутренней полости оправки и фиксируют в нужном положении с помощью разжимной цанги и винта. Конус служит для определения места расположения штуцера, раздвигания нитей и вытаскивания штуцера из оправки после окончания намотки.





Разрушаемые оправки



Половинки торových оправок изготавливают из смеси кварцевого песка и водного раствора поливинилового спирта в алюминиевых пресс-формах. На 1 в.ч. ПВС марки «Совиол» берут 8 в.ч. воды и 55...57 в.ч. однородного песка. Смесь размешивают до равномерного состава и появления мелких пузырьков воздуха во всей массе. Такая смесь обладает достаточной текучестью и легко заполняет замкнутый объем торовой пресс-формы. Термообработку песчаных оправок любой формы проводят при температуре 393 К в течение 1 ч.

Изготовленные половинки совмещают и обматывают технологической лентой шириной 20 мм из растворимой в воде



Разрушаемые оправки



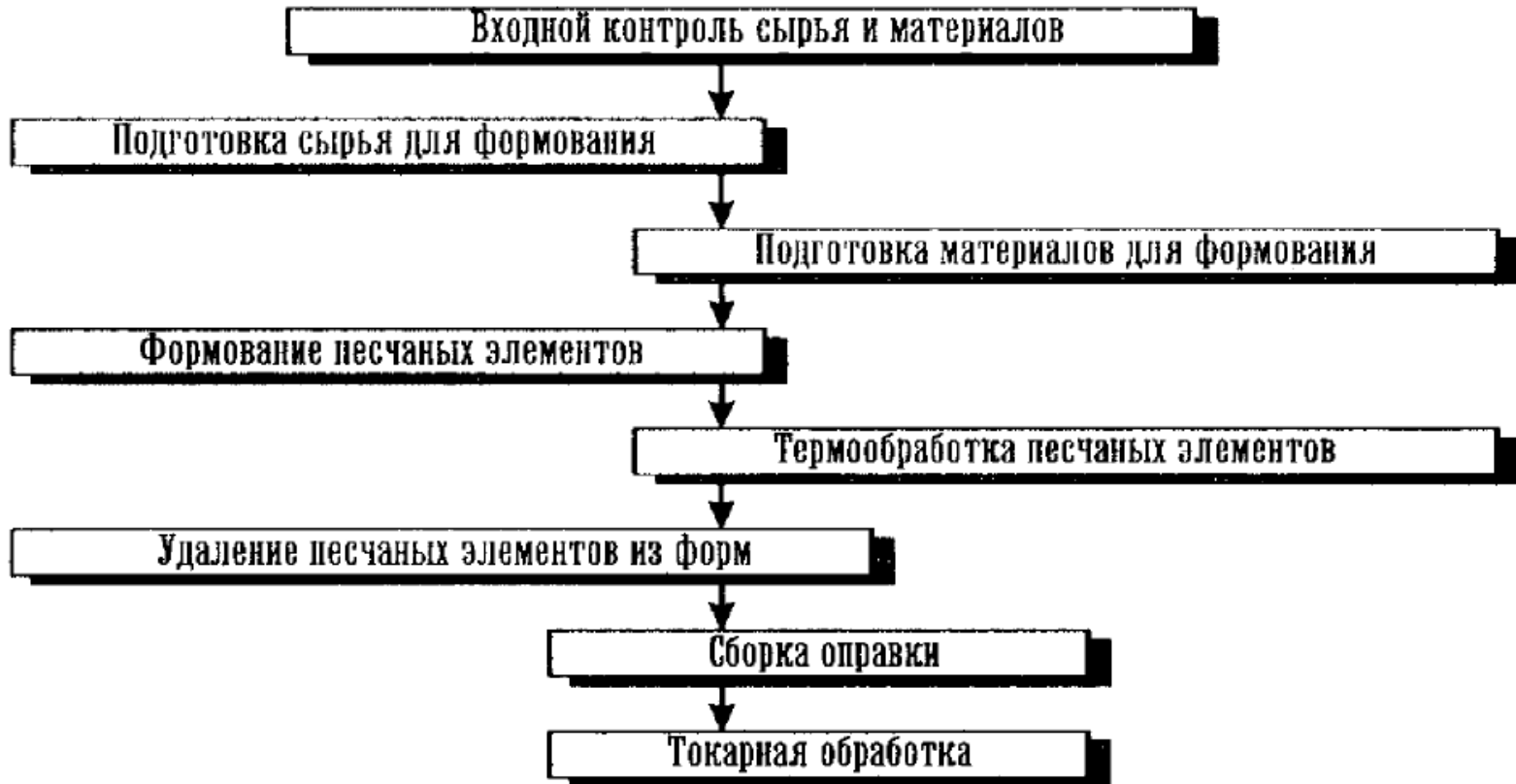
Изготовленные половинки совмещают и обматывают технологической лентой шириной 20 мм из растворимой в воде ПВХ-пленки марки ПВХ-Э с целью прочного скрепления половинок между собой и предохранения поверхности герметизирующей оболочки от прилипания к ней отдельных песчинок. Изготовленные таким способом оправки являются жесткими и прочными ($\sigma_{сж} = 9$ МПа), имеют малую усадку, твердую и гладкую поверхность, безопасны при изготовлении и дешевы.

Песчаную оправку и пленку ПВХ-Э удаляют из готового изделия путем вымывания горячей водой ($T = 333$ К). В течение 20...30 мин оправка распадается на мелкие части и удаляется через штуцер наружу, одновременно растворяется и вымывается водой технологическая пленка ПВХЭ.

Общая технологическая схема изготовления песчано-полимерных оправок показана на рисунке.



Технологическая схема изготовления песчано-полимерной оправки



Технологическая схема изготовления песчано-полимерной оправки

Далее будут приведены примеры конструкторских решения оправок для намотки конкретных изделий.



Технологические параметры процессов намотки



В связи с тем, что материал наматываемых изделий формируется во время их намотки, его физико-механические свойства в значительной степени зависят от технологического процесса изготовления таких изделий, точности выдерживания его важнейших технологических параметров.

Основными параметрами, определяющими свойства ПКМ, в соответствии с законом аддитивности, являются характеристики компонентов и объемное содержание V_H волокон в композите:

$$\sigma_K = v_B \cdot \sigma_B + (1 - v_B) \cdot \sigma_{CB}^*$$

Здесь σ_K , σ_B , σ_{CB}^* - прочности компонентов, волокон и связующего соответственно.

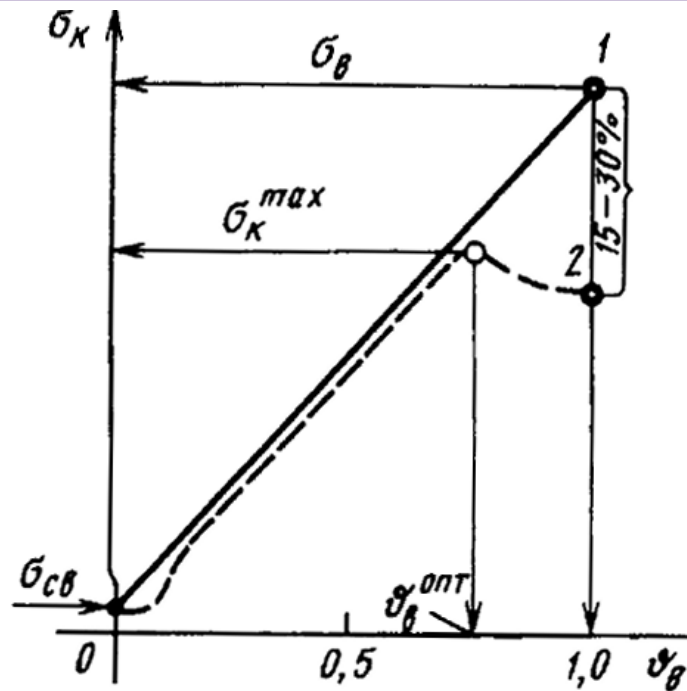
Из уравнения видно, что с увеличением коэффициента армирования v_B предел прочности однонаправленного КМ линейно возрастает.



Технологические параметры процессов намотки



Из уравнения видно, что с увеличением коэффициента армирования v_B предел прочности однонаправленного КМ линейно возрастает. Однако эксперименты показывают, что существует оптимальное значение коэффициента v_B^{opt} (рисунок), при котором σ_K достигает своего максимума (σ_K^{max}) при растяжении.



Качественная зависимость прочности ПКМ от коэффициента армирования:
1 – теоретический предел прочности ПКМ; 2 – практический предел прочности ПКМ

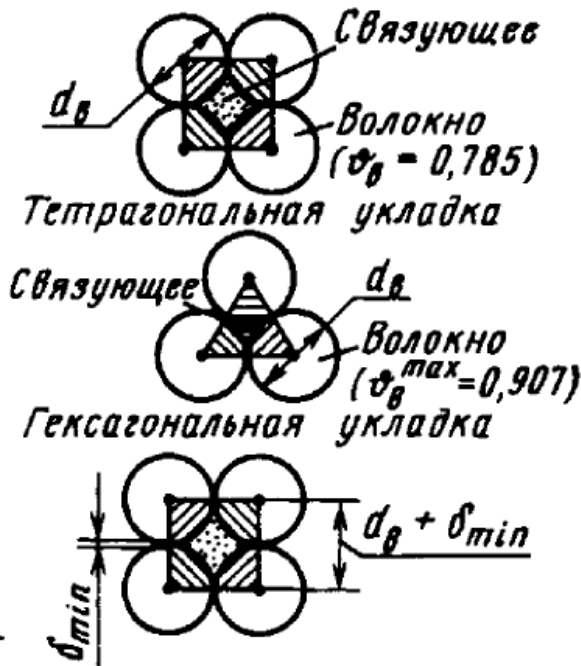


Технологические параметры процессов намотки



Так, для однонаправленных стеклопластиков $v_g^{opt} = 0,70...0,72$, а для органо- и углепластиков и $v_g^{opt} = 0,60...0,65$.

Это объясняется тем, что предельные значения коэффициента армирования зависят от геометрии упаковок волокон. Так, для круглых волокон в зависимости от схемы их упаковки (см. рисунок предельные значения $v_g^{opt} = 0,907$ (гексагональная укладка), $v_g^{opt} = 0,785$ (тетрагональная укладка).



Другое ограничение связано с выбором минимального значения толщины δ_{min} прослойки связующего между волокнами, которое приблизительно оценивают следующим образом:

$$\delta_{min} > \frac{d_B}{\epsilon_{CB}/\epsilon_B - 1},$$

где ϵ_{CB} и ϵ_B – относительные деформации волокна и связующего соответственно.



Технологические параметры процессов намотки



Объемное содержание волокон в ПКМ всегда меньше массового содержания вследствие наличия пор и воздушных включений в материале. Соотношение между объемным и массовым содержанием волокон определяется выражением:

$$v_{\text{в}}^{\text{об}} = \frac{v_{\text{в}}^{\text{мас}}}{v_{\text{в}}^{\text{мас}} + (1 - v_{\text{в}}^{\text{мас}}) \rho_{\text{св}} / \rho_{\text{в}}},$$

где $\rho_{\text{св}}$ и $\rho_{\text{в}}$ – плотности связующего и волокна соответственно.



Технологические параметры процессов намотки



Очевидно, что соотношение между объемным и массовым содержанием в системе наполнитель—связующее в основном определяется технологией изготовления. И в первую очередь оно зависит от следующих факторов:

- натяжения армирующего наполнителя, его вида;
- вязкости и температуры связующего и температуры разогрева препрега;
- скорости намотки.

При способе «мокрой» намотки все эти параметры необходимо контролировать в ходе технологического процесса изготовления изделия.

При способе «сухой» намотки процессы получения намоточного материала и изготовления силовой оболочки разделены, и параметрами, подлежащими обязательному контролю, являются технологическое натяжение ленты, скорость намотки и температура разогрева препрега. В этом случае остальные параметры отслеживаются в процессе получения ленты-препрега.

Преимущества метода «сухой» намотки заключаются в возможности обеспечения качественного контроля и выдерживания оптимальных значений перечисленных выше технологических параметров при изготовлении намоточного материала.



Натяжение армирующего наполнителя при намотке



Натяжение армирующего наполнителя. Выбору технологического натяжения пряжи нитей или ленты препрега при намотке уделяют большое значение.

1. Натяжение должно создавать нормальное давление на поправку с целью уплотнения материала в процессе формования изделия. Нормальное давление можно рассчитать, используя формулу:

$$P_{\text{н}} = \frac{q_{\text{л}}}{t_{\text{л}} R} \cdot \sin^2 \beta ,$$

где $q_{\text{л}}$ - растяжение ленты; $t_{\text{л}}$ - ширина ленты; R – радиус оправки; β — угол намотки.

Зная давление, можно определить, достаточное ли оно для уплотнения материала, с одной стороны, и не вызовет ли оно прогиб оправки или ее разрушение, с другой.



Натяжение армирующего наполнителя при намотке



2. Натяжение должно обеспечивать получение высоких механических характеристик материала за счет одновременного включения всех нитей (волокон) в работу. Наиболее значительно натяжение нитей влияет на предел прочности однонаправленных КМ.

Многочисленные эксперименты показывают, что для однонаправленных стеклопластиков оптимальным является натяжение нити $q_n = (0,05...0,15)q_{раз}$, для органопластиков $q_n = (0,25...0,36)q_{раз}$, а для однонаправленных углепластиков $q_n = (0,02...0,07)q_{раз}$, где $q_{раз}$ – разрушающая нагрузка на ленту.



Натяжение армирующего наполнителя при намотке



3. Натяжение должно обеспечивать равномерное содержание связующего в материале по толщине, особенно при намотке толстостенных изделий. В этом случае натяжение наполнителя программируют так, чтобы натяжение сначала увеличилось, а затем уменьшилось при достижении заданной толщины стенки изделия.

4. Натяжение должно снижать начальный уровень несовершенства арматуры (искривления). Необходимое натяжение создается в намоточно-пропиточном (нитепроводном) тракте от шпулярника до наматываемого изделия. Нитепроводные тракты являются важнейшим элементом намоточного станка.



Натяжение армирующего наполнителя при намотке



Основные принципы построения нитетрактов следующие:

- нитетракт должен быть (по возможности) коротким;
- конструкция элементов нитетракта должна обеспечивать минимальное травмирование волокон и не способствовать их пушению.

Для выполнения этих требований необходимо, чтобы количество перегибов армирующего материала и касаний им элементов нитетракта было минимальным; нити перед пропиткой были отделены одна от другой радиусы перегибов составляли не менее 10...15 мм; в местах касаний ленты деталей нитетракта не было защемлений.

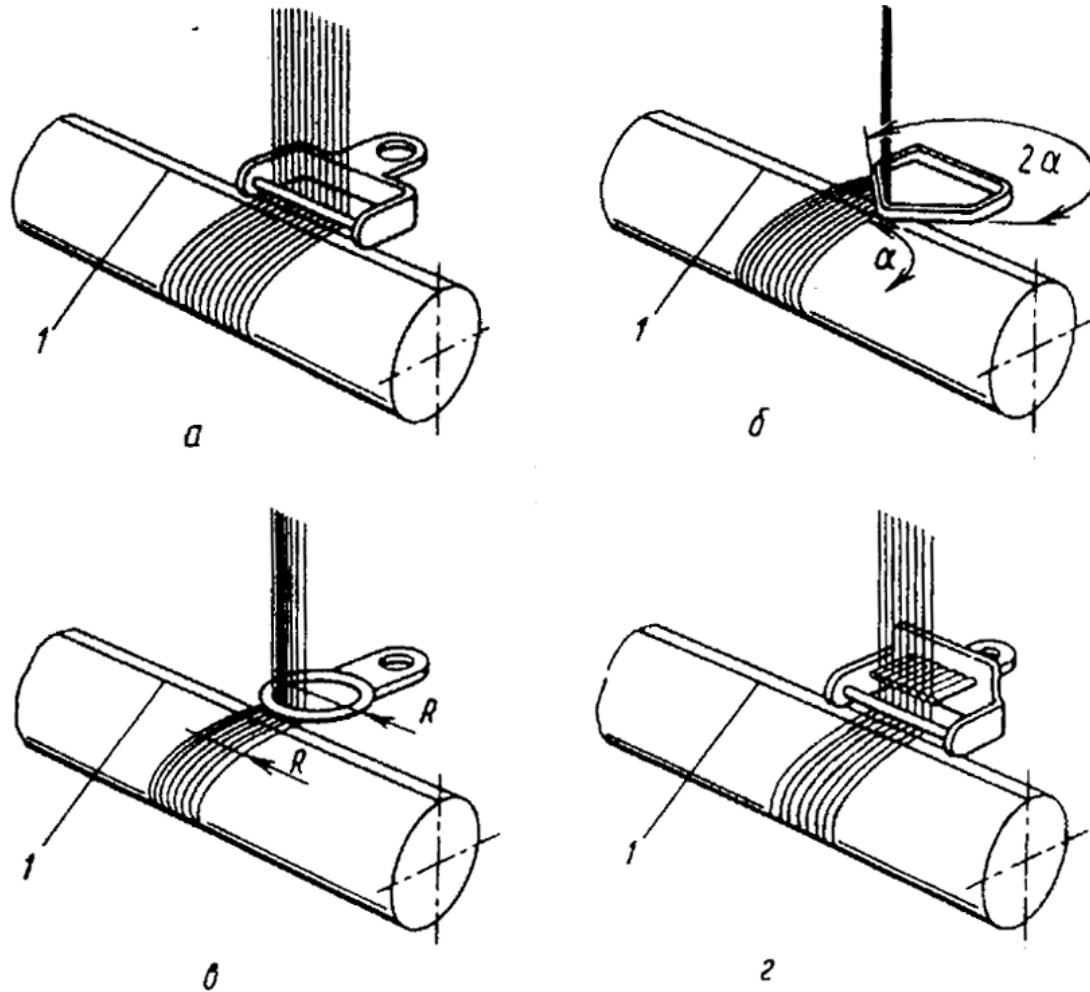


Схема формирования ленты перед протяжкой:

а – прямым стержнем; *б* – изогнутым стержнем с прямыми плечиками;
в – кольцом; *г* – гребенкой; *1* – линия, параллельная оси оправки



Натяжение армирующего наполнителя при намотке



Кроме того:

- 1) нитетракт должен быть удобен при заправке арматурой и при обрыве нитей в процессе намотки;
- 2) коэффициент усиления натяжения факта должен быть близок к постоянному;
- 3) все элементы нитепроводного тракта, контактирующие с арматурой, должны иметь полированную или хромированную поверхность и высокую стойкость к истиранию (эффективно применение керамики и фторопласта).

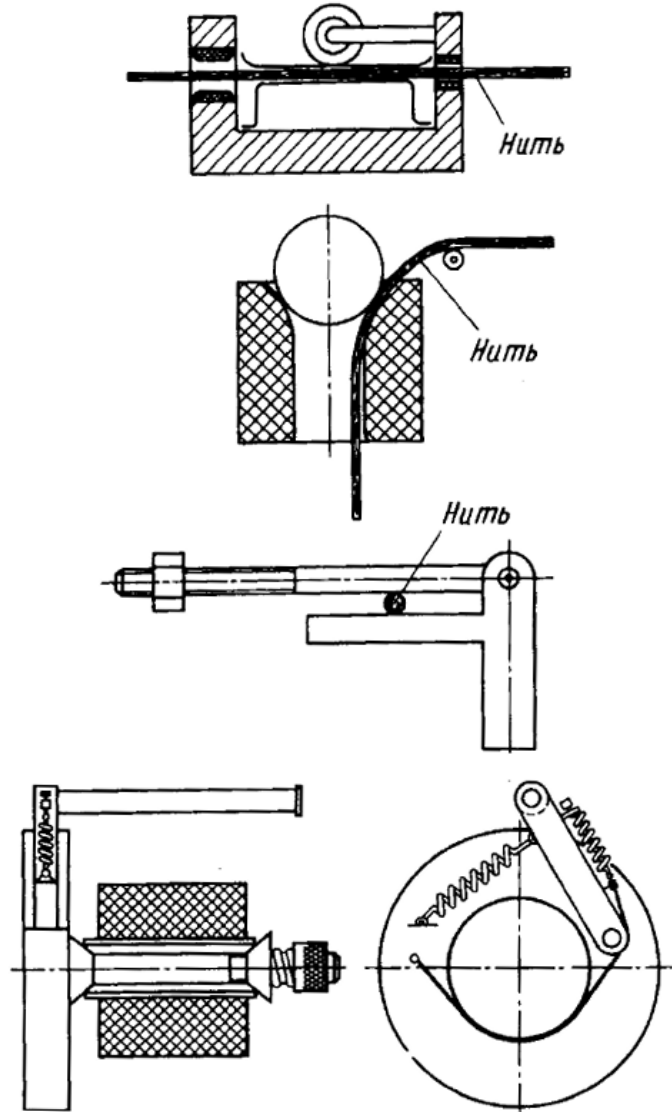
В схеме нитепроводного факта нельзя четко выделить зону создания натяжения, так как все элементы и узлы факта в той или иной степени влияют на уровень натяжения. Однако в тракте есть элементы, регулирующие уровень натяжения, которые называют натяжителями. Некоторые схемы устройства натяжителей нитей, прядей нитей, лент показаны на рисунке ниже.

Все устройства имеют механические регуляторы натяжения – тормозные механизмы или нажимные грузики.

Механические натяжители обеспечивают разнотяннутость арматуры в пределах $\pm 0,2$ кг.



Схемы устройств натяжения пряди нитей и ленты



Схемы устройств натяжения пряди нитей или ленты



Параметры процесса пропитки наполнителя



Как известно, для каждого вида армирующего волокнистого наполнителя существует оптимальное с точки зрения прочности формируемого композиционного материала, процентное содержание его в единице объема.

Для большей части применяемых при намотке наполнителей оптимальное содержание составляет примерно 50...70%.

Изменение этого технологического параметра неизбежно приводит к снижению прочности материала. В свою очередь объемное содержание армирующих нитей в изделии зависит от многих параметров процесса получения намоточной ленты:

- вязкости полимерного связующего,
- скорости протягивания нитей через пропиточную ванну,
- количества и плотности упаковки одновременно пропитываемых волокон,
- способности волокон к смачиванию данным типом связующего.



Параметры процесса пропитки наполнителя



Вязкость связующего на практике определяют с помощью простых вискозиметров типа ВЗ-4 и измеряют ее в секундах.

Согласно измерениям по ВЗ-4, вязкость — это время, за которое вытекает 100 мл связующего из конической воронки, имеющей диаметр выходного сечения 4 мм.

Чем меньше вязкость связующего во время соприкосновения с армирующими волокнами, тем лучше пропитка намоточного материала, тоньше его слой на каждой волокне и, следовательно, выше объемное содержание наполнителя в КМ и конечная прочность этого материала. С целью уменьшения вязкости связующего в него добавляют растворитель типа ацетонспиртовой смеси, родственной высокомолекулярный полимер или дополнительно подогревают его.



Параметры процесса пропитки наполнителя



Следует заметить, что подогрев связующего во время пропитки нужно осуществлять кратковременно и до определенных температур, так как это может привести к ускорению реакции полимеризации и к еще большему увеличению его вязкости.

С целью уменьшения наноса связующего на протягиваемую через него ленту на выходе из пропиточной ванны устанавливают отжимные валки или острые скребки, снимающие излишки связующего с верхней и нижней сторон намоточной ленты.

При способе «мокрой» намотки содержание наполнителя в композиционном материале может изменяться по толщине изделия: уменьшаться по мере удаления слоя от поверхности технологической оправки. Это происходит вследствие того, что сжимающие силы в материале, возникающие от технологического натяжения наматываемой ленты, суммируются пропорционально нарастанию толщины стенки изготавливаемого изделия, и жидкое связующее выдавливается, мигрируя от нижних слоев к верхним.



Параметры процесса пропитки наполнителя

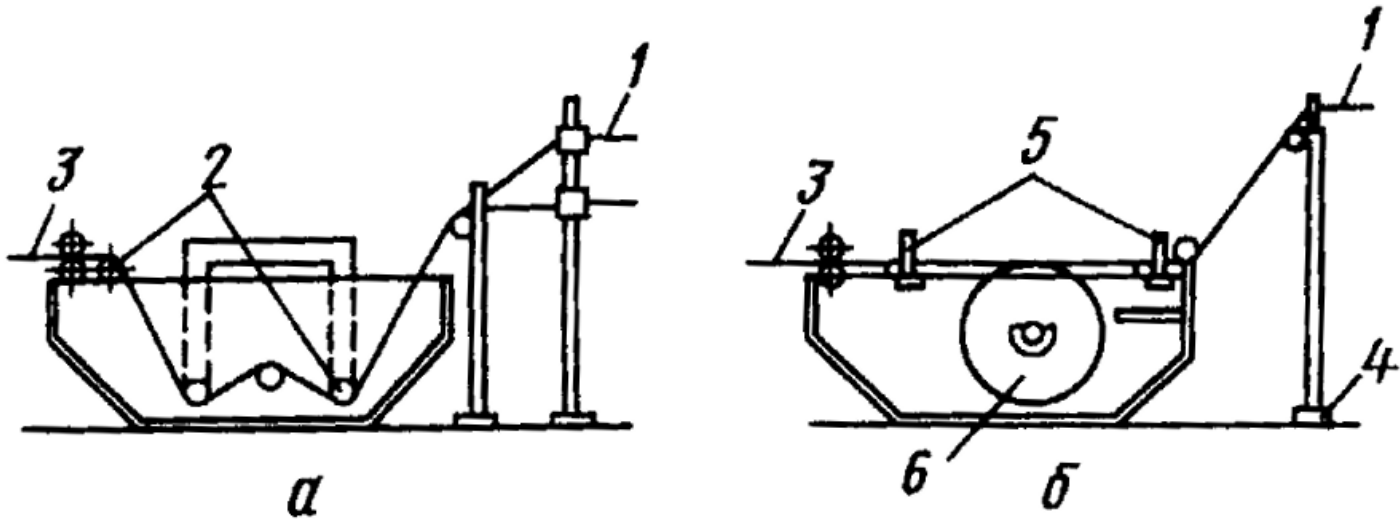


Получившееся в результате процесса «мокрой» намотки соотношение между содержанием наполнителя и связующего фиксируется при отверждении, что приводит к неодновременности включения слоев в работу при нагружении эксплуатационными силами.

При «сухом» способе намотки фиксация этого важнейшего технологического параметра происходит уже при подсушке намоточной ленты в нагревательной камере, обеспечивающей удаление растворителя и частичную полимеризацию терморезистивного связующего. Поэтому при такой технологии изготовления изделий выдавливания связующего из нижних слоев в верхние почти не происходит.

В процессе непрерывной намотки изделий и производстве препрегов используют в основном два способа пропитки:

- пропитка окунанием арматуры в ванночку (рисунок а);
- пропитка на вращающемся барабане, так называемый «типографский» способ (рисунок б).



Два способа пропитки наполнителя:

а – пропитка окунанием; *б* – пропитка на вращающемся барабане;
1 – нити, сматываемые со шпулярика; *2* – направляющие ролики;
3 – механизм подачи пропитанной ленты на оправку; *4* – устройство формирования ленты из пряжи; *5* – валики, регулирующие угол охвата лентой барабана; *6* – барабан



Параметры процесса пропитки наполнителя



Вторая схема более предпочтительна, поскольку упрощает обслуживание и позволяет перейти на нагрев связующего не во всем объеме ванночки, а только в зоне пропитки, что существенно снижает температуру связующего в ванночке и резко увеличивает его жизнеспособность.

В соответствии с первым способом связующее нагревается во всем объеме ванночки, поэтому жизнеспособность связующего, например ЭДТ-10, не превышает двух часов. Большим недостатком этого способа является необходимость введения системы термостатирования связующего, регулирования и закачки теплоносителя (глицерина, масла, воды) с обеспечением герметичности. Нарушение герметичности приводит к попаданию теплоносителя в связующее и необратимому браку изделий.

При пропитке окунанием перемешивание связующего в ванночке происходит за счет движения ленты, при барабанной пропитке – вследствие вращения барабана, что повышает интенсивность перемешивания, выравнивает температуру связующего и улучшает качество пропитки. Тем не менее оба метода не позволяют существенно повысить жизнеспособность связующего.



Параметры процесса пропитки наполнителя



Этого недостатка лишен радиационный метод нагрева ленты и связующего в зоне пропитки при барабанном способе. Простым подбором расстояния от инфракрасного нагревателя до зоны пропитки обеспечивается нужная температура в этой зоне. За счет того, что нагреву подвергается локальный участок, значительно снижается потребляемая мощность.

Однако и этот способ имеет два недостатка:

- трудность организации контроля и регулирования температуры связующего в зоне нагрева и пропитки;
- зависимость качества прогрева от скорости движения ленты (пропитки).

Переработка связующего при повышенных температурах, приводящая к сгусткообразованию и преждевременному частичному отверждению связующего, выражающемуся в быстром нарастании вязкости, предъявляет определенные требования к ванночкам. Это, прежде всего, отсутствие застойных зон, где массообмен затруднен и «старое» связующее может стать центром нарастания вязкости во всем объеме.



Параметры процесса пропитки наполнителя



Для непрерывного процесса намотки необходимо, чтобы ванночки были быстросъемными, причем в комплекте нитетракта их должно быть не менее двух.

Ванночка и узлы, остающиеся на тракте, должны быть скомпонованы таким образом, чтобы все участки были доступны к промывке растворителями. Особенно это относится ко всякого рода втулкам, подшипникам, пробкам и узлам трения, в которые не исключено попадание связующего.

Выполнение конструктором этих условий существенно облегчит эксплуатацию оборудования повысит надежность процесса намотки.



Параметры процесса отверждения полимерного композиционного материала



Процесс превращения полимерного связующего из жидкого состояния, в котором оно лучше пропитывает волокнистую арматуру в твердое называют полимеризацией или отверждением. Для некоторых смол (например, полиэфирных) отверждение наступает в результате реакции поликонденсации более эффективно отверждение связующего осуществляется при нагреве материала.

Полимерные связующие, у которых отверждение является необратимым процессом, называют термореактивным. Полимеры, которые при нагревании могут повторно переходить в жидкое или пластичное состояние, являются термопластичными смолами.

Режимы процесса отверждения определяются видом применяемого полимерного связующего и входящего в его состав отвердителя, а также толщиной стенки намотанной оболочки, частично ее размерами и формой.



Параметры процесса отверждения полимерного композиционного материала



Наиболее технологичными отвердителями для процесса намотки являются отвердители, обеспечивающие ускорение отверждения полимера при нагревании изделия до определенных температур, способствующих сшивке молекул и образованию сетчатых структур.

Для распространенных эпоксидных связующих такими отвердителями являются соединения на основе алифатических и ароматических аминов. Например, ТЭАТ (триэтаноламинтитанат) обеспечивает довольно длительную жизнеспособность эпоксидного компаунда типа КДА (ТУ6-05-1380-76) при комнатной температуре и достаточно быстрое его отверждение при нагреве до 455 К.

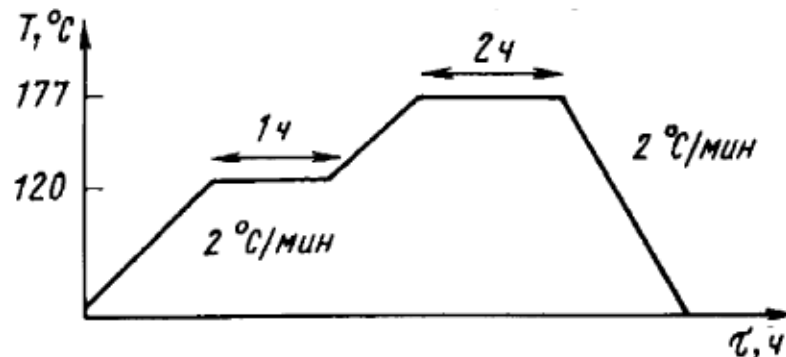


Параметры процесса отверждения полимерного композиционного материала



Схематично процесс отверждения эпоксидного связующего в нагревательной печи выглядит таким образом (см. рисунок):

- нагрев до температуры гелеобразования связующего T_g (порядка 350...393 K); она соответствует температуре формирования полимерной сетки, при которой связующее утрачивает текучее состояние, теряет жизнеспособность и технологичность
- выдержка для обеспечения прогрева всей массы изделия;
- нагрев до температуры стеклования 1_{Ca} , при котором связующее твердеет;
- повышение температуры до оптимальной температуры отверждения (около 453 K);
- выдержка до окончания полимеризации связующего;
- охлаждение до комнатной температуры.



Типовой график термообработки ПКМ на основе эпоксидного связующего



Параметры процесса отверждения полимерного композиционного материала



В процессе отверждения в материале (в волокнах и связующем) возникают усадочные напряжения за счет уменьшения объема (2...30 %) жидкого связующего при его затвердении. При этом связующее испытывает растягивающие, а волокна – сжимающие напряжения. Кроме того, вследствие различия коэффициентов линейного расширения волокон и связующего в них возникают термические напряжения, как правило, того же знака. Эти напряжения снижают (компенсируют) технологическое натяжение нитей при намотке.

В связи с тем, что КМ на основе полимерных связующих, как правило, имеют довольно низкую теплопроводность, при больших толщинах намотанного и помещенного в печь изделия возможны случаи, когда на его наружной поверхности, соприкасающейся с нагретым воздухом, уже началась реакция полимеризации связующего, в то время как глубинные слои у технологической оправки еще не прогрелись до этой температуры.



Параметры процесса отверждения полимерного композиционного материала



По этой причине толстостенные трубы нередко имеют дефекты в виде расслоений и межслоевого растрескивания. Для борьбы с этими явлениями либо увеличивают время выдержки, обеспечивающей прогрев изделия при более низкой температуре, либо применяют процесс изготовления, заключающийся в чередовании послойной намотки с операцией отверждения.

Для некоторых синтетических смол, использующихся при намотке, например фенольных, кроме термообработки в процессе отверждения необходимо обеспечить давление по наружной поверхности изделия. В этом случае отверждение изделий осуществляют в автоклавах при давлениях на формуемую поверхность порядка 0,35...0,7 МПа, передаваемых от жидкого или газового рабочего тела через эластичный мешок или диафрагму.



Параметры процесса отверждения полимерного композиционного материала



Применение обжатия КМ при его отверждении, обеспечивающее монолитизацию материала и получение изделий с улучшенными физико-механическими свойствами, нередко проводят и при использовании других видов связующих.

Для этих целей кроме автоклавного формования применяют:

- вакуумное формование с эластичной диафрагмой;
- формование под действием теплового расширения;
- формование с обжатием термоусаживающейся лентой.

Первый из этих способов используют в тех случаях, когда нельзя применять автоклавы из-за больших геометрических размеров изделия, например для труб длиной около 10 м и выше.



Параметры процесса отверждения полимерного композиционного материала



Основные стадии такого процесса заключаются в постоянной укладке материала, подготовке системы отверстий для выпуска газов, излишков связующего и формовании надеваемой сверху диафрагмой. Эластичную диафрагму, соответствующую конфигурации формуемой детали, размещают над уложенными слоями материала, подключают к выпускной системе, вакуумной линии и уплотняют по линии стыка.

Обычно сначала создают небольшой вакуум, чтобы разгладить поверхность диафрагмы, а затем окончательно вакуумируют и нагревают систему. В большинстве случаев вакуум поддерживается на протяжении всего цикла нагрева и охлаждения.



Параметры процесса отверждения полимерного композиционного материала



Один из методов формования под действием теплового расширения заключается в намотке нескольких слоев резины, например силиконовой, на намотанные или уложенные слои композиционного материала и в размещении всего этого пакета в металлическую жесткую форму, которую, в свою очередь, помещают в нагревательную печь. При повышении температуры резиновая масса расширяется в большей степени, чем ограничивающая ее металлическая оснастка, что вызывает давление на отверждаемый материал.

Благодаря этому отпадает необходимость в приложении внешнего давления, как это делается при автоклавном формовании. При использовании силиконовой резины не требуется применять дополнительную антиадгезионную подложку, так как эта резина обладает низкой адгезией к большинству применяемых связующих. Если масса резины при таком обжатии выбрана без учета объема внутренней полости охватывающей оснастки, может развиться очень высокое давление — до 5,6 МПа.



Параметры процесса отверждения полимерного композиционного материала



Тканые ленты из кремнеземных нитей обладают способностью усаживаться (уменьшать свою длину на 5...7 %) при нагревании до 500...600 К. Подобные ленты применяют для уплотнения материала, намотанного на жесткую технологическую оправку, при его отверждении в нагревательной печи. Если у витков термоусаживающейся ленты отсутствует возможность взаимного проскальзывания, то, усаживаясь, они обеспечивают прижатие расположенного под ними слоистого материала к оправке, монолитизируют его, в результате чего повышаются физико-механические характеристики изделия.

Широко распространенная термообработка изделий в печах с целью отверждения связующего в КМ наряду с простотой обладает и рядом технических недостатков.

Во-первых, очень много времени и энергии расходуется на разогрев и выдержку изделия при расчетных температурах.

Во-вторых, возникают технические трудности с отверждением изделий, имеющих большие габариты, из-за отсутствия соответствующих печей.

Кроме того, при отверждении толстостенных изделий трудно разогреть только наружную поверхность.



Параметры процесса отверждения полимерного композиционного материала



Все эти недостатки значительно снижают эффективность и коэффициент полезного действия применяемых в настоящее время печей и вынуждают исследователей искать другие источники нагрева и методы отверждения полимерных смол.

Один из наиболее перспективных методов — разогрев связующего под воздействием сверхвысокочастотного электромагнитного поля, при котором дипольные молекулы полимера, колеблющиеся синхронно изменению частоты, за счет внутреннего трения очень быстро разогреваются до высоких температур одновременно во всем объеме изделия.

Интересными также являются исследования по радиационно-химическому отверждению связующих под действием ускоренных электронов. Имеется информация о том, что применение последнего метода обеспечивает не только ускорение процесса, но и повышение физико-механических параметров материала.



Параметры процесса отверждения полимерного композиционного материала



Иногда для ускорения процесса отверждения, например при массовом выпуске изделий, в связующее добавляют катализаторы, активные химические добавки, способствующие существенному убыстрению процесса полимеризации. Известны случаи, когда под воздействием таких добавок и интенсивного дополнительного нагрева изделий при помощи кварцевых ламп отверждение связующего осуществлялось за 15...20 мин.



Особенности конструирования изделий с учетом технологии намотки



Детали, изготавливаемые намоткой, должны быть симметричными, иметь форму тела вращения, однако возможно изготовление несимметричных конструкций, а также конструкций, имеющих прямоугольное сечение.

Конструкции деталей, получаемых намоткой, могут быть с заполнителями (пенопластовые блоки, соты, шпангоуты, стрингеры и т.п.), а также иметь любые закладные элементы из металлов или неметаллов.

Конфигурация детали должна обеспечивать возможность съема детали с неразборных оправок, для чего необходимо предусмотреть:

- необходимые уклоны, особенно для длинных изделий (например, труб);
- минимальные внутренние радиусы (5 мм);
- отсутствие поднутрений (поднутрения возможны при использовании разрушаемых или разборных оправок).



Особенности конструирования изделий с учетом технологии намотки

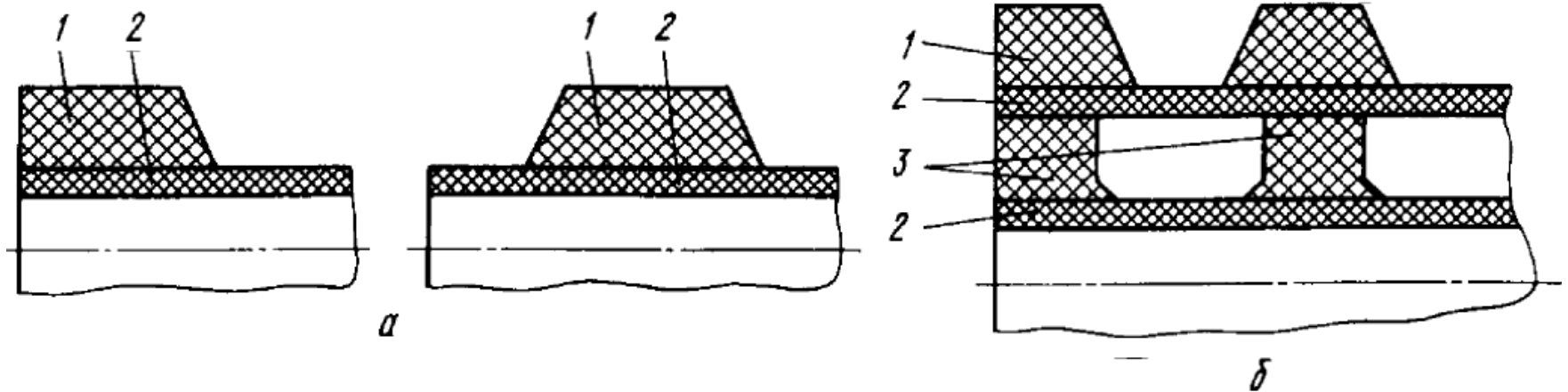


Толщины стенок детали могут быть практически любыми, но не менее двух толщин армирующего наполнителя; максимальная толщина стенок устанавливается прочностным расчетом.

В области резких изменений конфигурации детали, а также в зоне контакта деталей возникают повышенные напряжения с ограниченной зоной распространения (местные напряжения), в этом случае деталь должна иметь конструктивные элементы, воспринимающие эти напряжения (например, утолщения, шпангоуты, закладные элементы и т.д.).

Закладные детали в намотанные изделия могут быть вмотаны, вклеены, приклепаны глухой или открытой клепкой или размещены между слоями в многослойных конструкциях.

Конфигурация отдельных элементов намотанных изделий (утолщения, шпангоуты, бобышки и т.д.) должна быть по возможности однородного сечения. В трехслойных конструкциях утолщения рекомендуется располагать над шпангоутами с целью предотвращения деформации наружной оболочки при намотке и термообработке утолщений (рисунок, а, б).



Конструктивные решения утолщений (а) и закладных элементов (б):
1 – утолщение; 2 – намотанная оболочка (наружная и внутренняя);
3 – шпангоут



Особенности конструирования изделий с учетом технологии намотки



Изделия, работающие под внутренним давлением газов или жидкостей, должны иметь герметичную стенку. Герметичность может быть обеспечена:

- за счет изготовления герметичного слоя из нетканых материалов, пропитанных связующим, имеющим хорошие деформативные характеристики;
- вследствие формования герметизирующей оболочки (лейнера) из металлов, резин, пленок, термопластов.

Материал герметизирующего слоя должен по возможности отверждаться одновременно с силовыми слоями оболочки, выдерживать максимальные температуры термообработки и обладать полной или частичной совместимостью с материалом оболочки. Изделия, получаемые намоткой, должны быть сконструированы так, чтобы по возможности не требовалась механическая обработка после их отверждения. Любое перерезание волокон приводит, как правило, к снижению несущей способности изделия.



6.1. Формообразование пултрузией



Пултрузия – технологический процесс формования длинномерных профильных деталей путем непрерывного протягивания армирующего материала, пропитанного связующим через формующую нагретую фильеру

Этот процесс аналогичен процессу экструзии, в котором заготовка продавливается через формующую фильеру под действием давления, создаваемого в экструдере. При пултрузии материал протягивается через фильеру под действием внешней силы, создаваемой тянущим устройством.

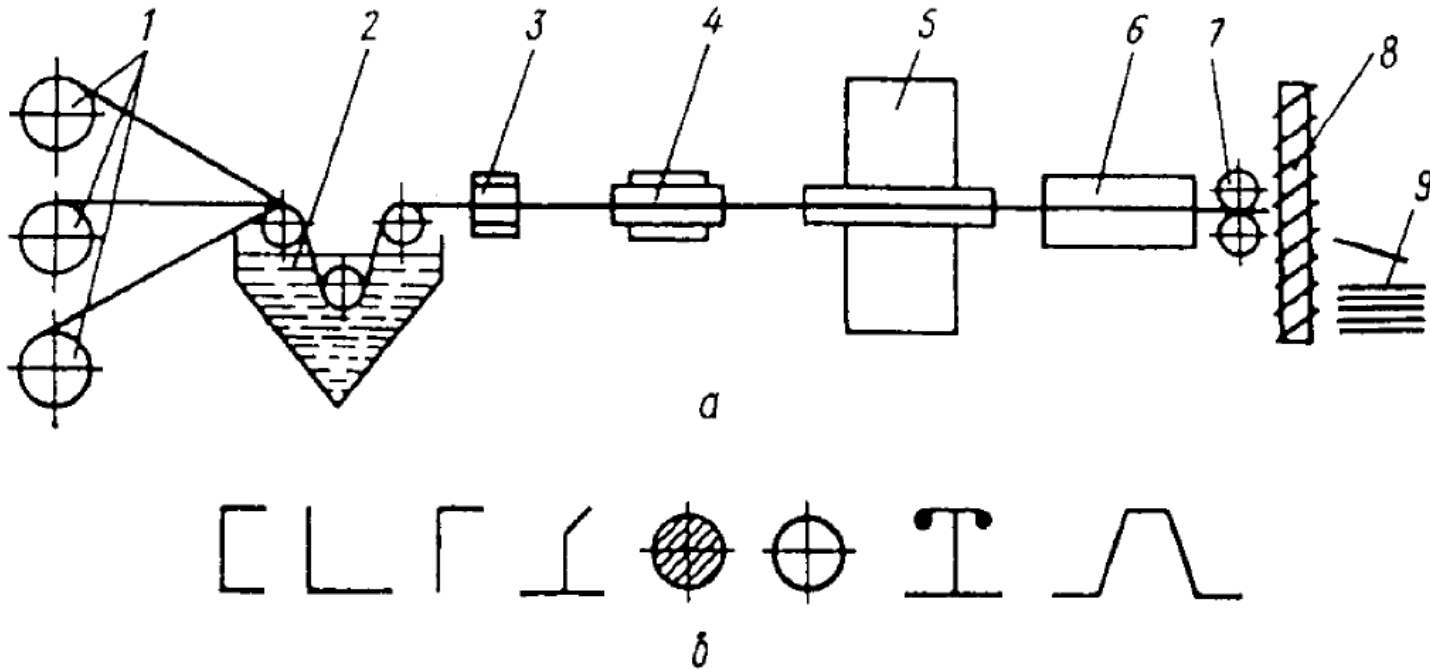


Схема установки для изготовления элементов пултрузией; а – схема процесса пултрузии; б – вид продукции (сечения профилей);
 1 – армирующий материал; 2 – ванночка со связующим; 3 – направляющие ролики; 4 – матрица; 5 – обогреваемая пресс-форма; 6 – печь для термообработки; 7 – тянущее устройство; 8 – устройство для разрезки профиля; 9 – накопитель для заготовок



Армирующий материал (жгуты, нити или тканые ленты) последовательно проходит через ванну с жидким связующим, проглатывается, сжимается и идет далее в матрицу предварительного формования, а затем в обогреваемую пресс-форму, где фиксируется требуемая конфигурация и отверждается полимерное связующее. В матрице предварительного формования плоская по форме лента пропитанного материала постепенно преобразуется по сечению к форме получаемого конструктивного элемента. Окончательно сечение формируется в профилирующей матрице, где в результате нагрева происходит частичное отверждение. Для завершения отверждения элемент после формования дополнительно термообработывают в печи.



Формообразование пултрузией (2)



Материал протягивается по всему тракту формообразования с помощью какого-либо тянущего устройства, например фрикционной роликовой передачи, гусеничного механизма и т.р. Полученный профиль, трубу или прутки нарезают на части определенной длины и в дальнейшем используют при сборке конструкций.

Все основные элементы пултрузионной установки — шпулярник, ванночка, формирующая фильера, термокамера, режущее устройство, тянущий механизм — имеют простую конструкцию и могут использоваться в других технологиях.

Препреги можно использовать в качестве исходного материала в пултрузионной технологии, но их применение очень ограничено.



Для данного метода характерны:

- высокая точность получаемых деталей;
- изготовление деталей любой длины;
- высокое значение коэффициента использования материала (до 95 %);
- точное регулирование заданного соотношения арматура – связующее;
- большая производительность (до 1,5 м/мин).

Существует два способа пропитки армирующих материалов при пултрузии:

- 1) пропитка сухих волокон в ванночке с последующим формованием профиля в матрице;
- 2) предварительное формование профиля сухими волокнами с последующей пропиткой непосредственно в формующей фильере.



Второй способ наиболее предпочтителен при пултрузии пустотелых деталей типа трубы.

В пултрузионных установках применяют три способа отверждения заготовок:

- в туннельных термокамерах;
- внешним нагревателем;
- в формующей фильере в электромагнитном поле СВЧ.

При отверждении внешним нагревом требуется прерывать движение заготовки для процесса полимеризации. Наиболее эффективным является третий способ, при котором полное отверждение композита происходит при непрерывном движении материала в формующей фильере длиной около 500 мм.

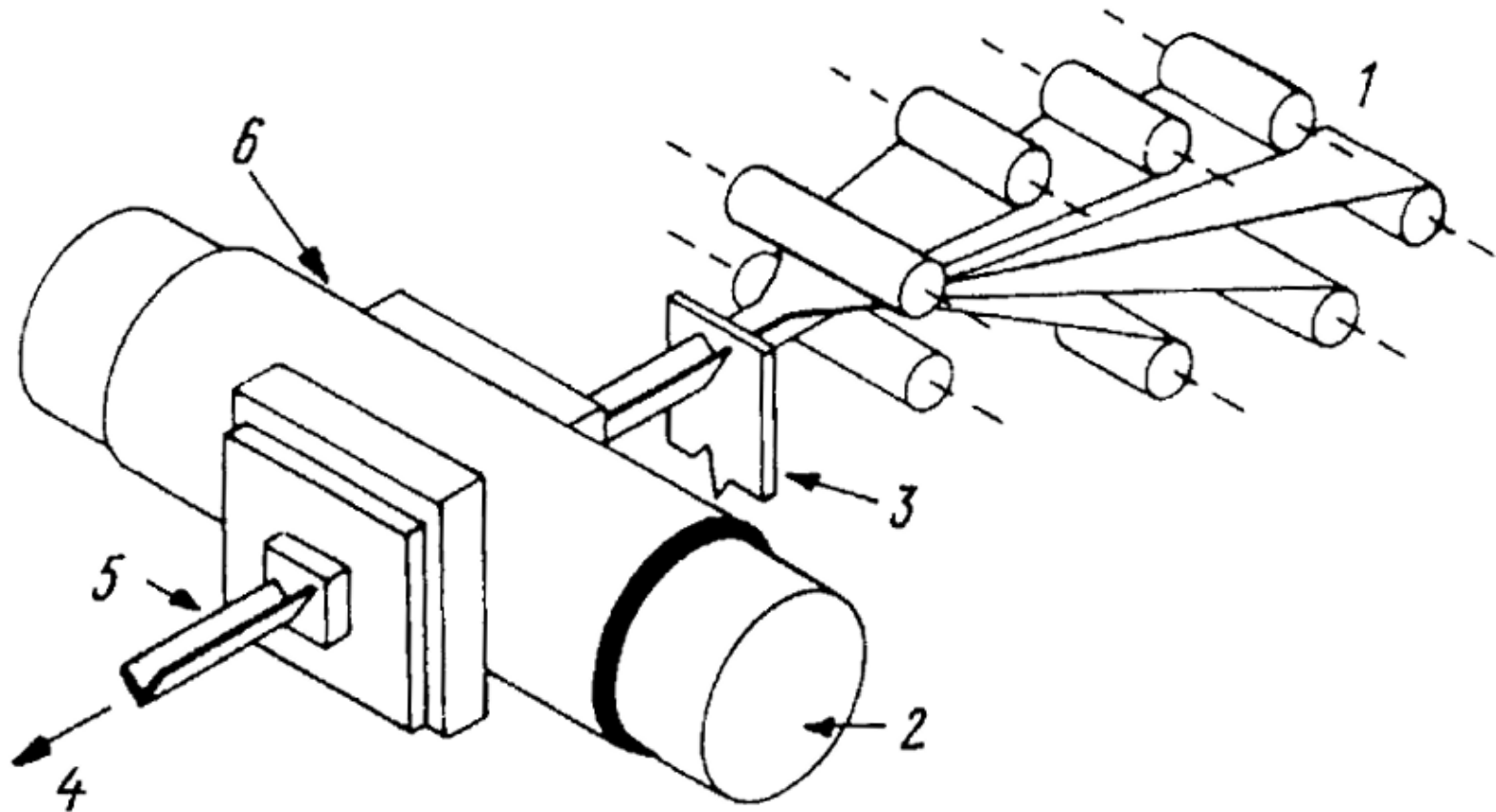


Схема пултрузионной установки с отверждением заготовки в электромагнитном поле СВЧ:

1 – исходный материал; 2 – магнетрон СВЧ; 3 – предварительная формующая фильера; 4 – тянущее устройство; 5 – отвержденная заготовка; 6 – термокамера с формующей фильерой



Производительность пултрузионного процесса определяется в основном временем отверждения композита, и в зависимости от типа связующего и толщины детали скорость пултрузии составляет от 0,6 до 1,5 м/мин.

Тянущие устройства представляют собой простые механизмы трех типов: ременные или гусеничные со сменными траками под каждый типоразмер; непрерывные возвратно-поступательные; прерывистые возвратно-поступательные. Наиболее эффективны для проведения непрерывного вытягивания заготовок механизмы первого типа.



Устройства для резки представляют собой пилы с режущей кромкой из материалов на основе различных карбидов или искусственных алмазов. Тем не менее при резке арамидных композитов эти пилы приходится часто перетачивать или заменять новыми. В некоторых установках используют гидрорезку, т.е. резку тонкой струей воды под большим давлением. Режущее устройство должно перемещаться в процессе отрезки заготовки вместе с ее движением при непрерывной пултрузии.

Формующая фильера является основным и наиболее сложным узлом пултрузионной установки. Для каждого типоразмера изготавливаемого профиля при переходе на новый типоразмер приходится проектировать и новую фильеру.



Пултрузия термопластичных композиционных материалов



Особенностями технологии пултрузии применительно к ТКМ являются:

- более высокая по сравнению с реактопластам и температура формующей фильеры, равная температуре плавления матричных волокон исходного волоконного полуфабриката;
- пропитка наполнителя непосредственно в фильере в момент формования и монолитизации материала профиля;
- охлаждение полученного профиля в той же фильере перед выходом его из формующего канала до температуры стеклования матрицы.

Таким образом, все перечисленные особенности пултрузии ТКМ по волоконной технологии связаны с процессами, происходящими в фильере, и, следовательно, их необходимо учитывать в ее конструкции.



Важным преимуществом пултрузионной технологии является возможность при изготовлении профилей открытого сечения формовать исходный полуфабрикат вне пултрузионной установки (на ткацком станке или шнуроплетельной машине). Это увеличивает производительность, сокращает габариты пултрузера, поскольку основную длину такой установки составляет узел формирования исходного материала.

Процесс пултрузии для изготовления длинномерных профилей из ТКМ любого сечения является наиболее перспективным и производительным, он обеспечивает максимальное воспроизводство свойств изделий, а также позволяет создавать высокоавтоматизированное производство такого типа изделий.

Из недостатков процесса необходимо отметить тот факт, что материал фильеры работает в условиях комплексного воздействия температур, абразивного износа и химического воздействия со стороны компонентов ТКМ, поэтому вкладыши канала необходимо изготавливать из жаростойких хромсодержащих сталей, подвергнутых соответствующей термообработке и хромированию поверхности канала, что существенно удорожает стоимость оборудования.



Пултрузия термопластичных композиционных материалов



Формующая зона фильеры (или зона пропитки) имеет сужающийся канал, переходящий от формы и размеров канала входной зоны к форме и размерам сечения изготавливаемого профиля. В этих условиях давление формования создается главным образом за счет уменьшения сечения канала по длине зоны, за счет скорости протягивания материала через фильеру и за счет избыточного количества материала, входящего в фильеру, при сохранении заданного наполнения сечения выходного канала.

Иначе говоря, в исходном полуфабрикате, если он предназначен для пултрузии, требуется избыток плавких волокон до 5...15 % от расчетного содержания.

Важной величиной, характеризующей формующую зону, является угол конусности канала, который, с одной стороны, не должен превышать более 15° , чтобы расплав термопласта захватывался движущимися волокнами наполнителя, а с другой – должен иметь минимальное значение, чтобы обеспечить плавное нарастание давления, так как это улучшает качество и равномерность пропитки по толщине сечения и способствует более полному удалению воздушных включений из формующей зоны во входную зону.



Пултрузия термопластичных композиционных материалов



Однако слишком маленькая конусность приводит к неоправданному увеличению длины этой зоны, а значит и габаритов всей фильеры, что, в свою очередь, увеличивает время нахождения расплава при высокой температуре, а значит, и степень термодеструкции, и увеличивает отжим связующего с наружной поверхности профиля. Таким образом, оптимальной следует считать конусность, равную $5^{\circ} \dots 10^{\circ}$.

Расчетное определение длины формующей зоны и значения конусности для заданной скорости движения материала через фильеру, как и решение обратной задачи, на сегодняшний день для условий переработки ТКМ не очевидно и требуется проведение соответствующих аналитических и экспериментальных исследований. Поэтому для каждого конкретного состава исходного полуфабриката и принятых хтины и конусности формующего канала оптимальную скорость пултрузии подбирают эмпирически.



Пултрузия термопластичных композиционных материалов



Вследствие относительно рыхлой структуры исходного пакета и большой степени его уплотнения при формовании требуется использование переменной формы сечения канала фильеры с плавными переходами от зоны к зоне, исключающими повреждение армирующих волокон и наличие застойных зон.

Входная зона фильеры имеет радиусный вход, чтобы не повредить поступающий материал, и поперечное сечение, по размерам соответствующее толщине исходного волоконного пакета, уплотненного в холодном состоянии.

В случае изготовления профиля сложного сечения (швеллер, тавр, двутавр и т.п.) из заданного сечения пакета полуфабриката форма канала входной зоны должна соответствовать форме исходного пакета.



Пултрузия термопластичных композиционных материалов

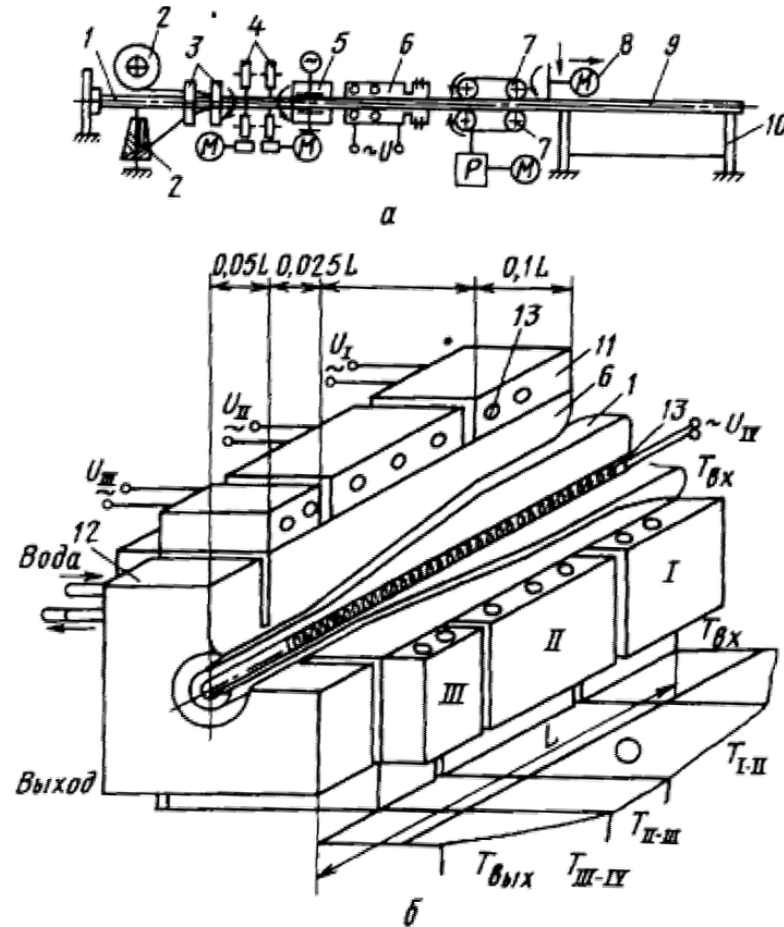


Зона охлаждения (или калибровки) имеет постоянное сечение по длине канала. Однако при назначении исполнительных размеров канала на выходе из фильеры следует учитывать усадку материала профиля за счет его охлаждения в данной зоне, чтобы обеспечить заданные размеры изделия. Поскольку в зоне охлаждения идут процессы стеклования и кристаллизации матричного полимера, то ее влияние на качество получаемого изделия весьма значимо, следовательно, конструкция зоны должна содержать узел принудительного охлаждения с заданной скоростью. Распределение температур на границах зон фильеры приведено в таблице.

Распределение температур в канале фильеры

Материал матричных волокон	Значение рекомендуемой температуры на границах зон фильеры, °С				
	$T_{\text{вх}}$	$T_{\text{I-II}}$	$T_{\text{II-III}}$	$T_{\text{III-IV}}$	$T_{\text{вых}}$
Полипропилен	120	215	230	210	60
Поликапроамид	120	250	260	225	70
Лавсан	150	250	270	200	120
Полисульфон	180	300	310	285	130
Полиэфирэфиркетон	250	400	425	360	180

Схема пултрузионной установки и формующей фильеры



Схемы пултрузионной установки (а) и формующей фильеры (б) для изготовления профилей из ТКМ:
 1 – дорн; 2 – шпулярник; 3 – решетки; 4 – вертлюги; 5 – камера предподогрева; 6 – формующая фильера; 7 – тянущий узел; 8 – режущий узел; 9 – готовый профиль; 10 – приемный стол; 11 – изоляторы; 12 – радиатор охлаждения; 13 – нагреватели фильеры;
 L – длина фильеры



Пултрузия термопластичных композиционных материалов



Материал фильеры работает в условиях комплексного воздействия температур, абразивного износа и химического воздействия со стороны компонентов ТКМ, поэтому вкладыши канала необходимо изготавливать из жаростойких хромосодержащих сталей, подвергнутых соответствующей термообработке и хромированию поверхности канала.

Несмотря на отмеченные недостатки, процесс пултрузии для изготовления длинномерных профилей из ТКМ любого сечения является наиболее перспективным и производительным, он обеспечивает максимальное воспроизводство свойств изделий, а также позволяет создавать высокоавтоматизированное многотоннажное производство такого типа изделий.



Пултрузия термопластичных композиционных материалов



Более того, особенность ТКМ заключается в возможности многократной переформовки изделий из них. Применительно к пултрुзии эту способность можно использовать путем установки на выходе из пултрудера узлов штамповки, гибки, развальцовки и других элементов, производительность которых сравнима со скоростью пултрузии. В этих случаях пултрудируемый профиль является заготовкой для формования изделий конечной длины и размеров.



7.1 Реакционное формование



Название сравнительно нового для России метода формования изделий из термопластов - так называемой «RIM-технологии» - включает в себя аббревиатуру от англоязычного словосочетания «reaction-injection molding» (реакционно-литьевое формование).

Основным отличием RIM-технологии от известного метода изготовления изделий из термопластов литьем под давлением является то, что в качестве исходного полуфабриката, загружаемого в специализированное оборудование (см. рисунок), используется не полимерный гранулят, а реакционная смесь, полученная после смешения в заданном соотношении нескольких жидких низкомолекулярных компонентов.

Эта смесь подается в литьевую форму, где и происходит химическая реакция взаимодействия компонентов с одновременным образованием готового полимерного изделия. В этом смысле можно сказать, что данная технология подобна известному методу литья под давлением реактопластов. В настоящее время данная технология реализована применительно к изделиям из полиамида.





Реакционное формование



Метод реакционного формования (RIM) заключается в подаче жидких компонентов, например пенополиуретана, в герметически закрываемую форму, установленную в специальном носителе форм, который обеспечивает поворот их на 45° для удаления воздуха, получения качественного изделия и раскрытия формы (например, поворот верхней части на угол, обеспечивающий свободное удаление изделия из нижней части, и очистку формы). В процессе реакции между компонентами давление в форме возрастает (чем оно выше, тем плотнее получается материал).



Реакционное формование



Помимо указанных выше, ее отличают следующие особенности:

- 1) Основным исходным компонентом сырья для RIM-технологии полиамидов служит мономер – капролактам (до 70%), к которому добавляют активатор, катализатор и другие добавки. Таким образом, для изготовления полиамидных изделий по RIM-технологии не требуются дополнительное время и энергозатраты на промежуточные стадии процесса - синтез полимера, гранулирование полимерного материала и неоднократное термическое воздействие на него (сушка, плавление).
- 2) Процесс RIM-технологии полиамидов проходит при относительно низких температурах и давлениях. При этом даже толстостенные изделия получают практически с минимальным уровнем остаточных напряжений. Таким способом можно без труда изготавливать полиамидные изделия сложных форм с толщиной стенки до 40...50 мм и габаритами до 1500x2000 мм и более, что является важным преимуществом данной технологии.
- 3) Стоимость литьевых форм для продукции, изготавливаемой по RIM-технологии, на порядок ниже, чем для подобных изделий, полученных литьем под давлением. Литьевые формы более тонкостенные, но требуют обогрева.



Реакционное формование



Процесс формования при RIM-формовании происходит в течение 3...5 мин, т.е. данный процесс, также как и литье под давлением, относится к высокопроизводительным методам получения полимерных изделий.

Процесс производства изделий осуществляется по двухпоточной схеме, где в одном из потоков капролактама присутствует катализатор, а в другом - активатор. При смешении этих потоков капролактама с различными добавками при повышенной температуре происходит их химическое взаимодействие, которое заканчивается в обогреваемой форме с одновременным образованием полимера и формованием изделия из него.



Для реализации RIM-технологии фирма «Kraus Maffei Kunststofftechnik GmbH» (Германия) спроектировала и изготавливает специализированное оборудование, в которое входят следующие основные узлы:

- узел подготовки компонентов (рис. 3), включающий два обогреваемых бака, в которых находятся растворы капролактама с активатором и катализатором;
- узел дозирования (рис.4), состоящий из двух плунжерных насосов, обеспечивающих дозирование каждого из потоков в камеру смешения и литьевую форму;
- смесительная головка (рис. 5), где происходит смешение компонентов и впрыск полученной смеси в форму;
- формодержатель и форма (рис.6).



рис.3 Узел подготовки компонентов



рис.5 Смесительная головка



рис.4 Узел дозирования



рис.6 Формодержатель и форма



Реакционное формование



Удачная совокупность свойств блок-сополимеров позволяет успешно применять их для изготовления по RIM-технологии изделий различного назначения:

1) в автомобилестроении: подкрылки для автомобилей, бамперы, сиденья, топливные баки, решетка для автомобиля МАЗ и т.д.,,

2) в сельскохозяйственном машиностроении: валки для кормоуборочных комбайнов, крыльчатки,

3) в машиностроении: корпусные детали,

4) в приборостроении, в электротехнической, кожевенной, мебельной промышленности, в строительстве и для изготовления спортивных изделий.



8.1 Метод раздува



Получение объемных полых изделий осуществляется главным образом либо методом раздува, либо методом ротационного (центробежного) формования термопластов. Такие изделия нельзя получить никакими другими методами.

Преимуществами метода раздувного формования являются сравнительная простота технологии, высокая производительность оборудования, невысокая стоимость оснастки. Существует несколько вариантов этого метода:

- 1) склеивание или сваривание двух половин заготовок, полученных литьем под давлением или вакуум-формованием, с последующим нагревом и раздувом;
- 2) получение литьем под давлением трубчатой заготовки с последующим ее раздувом;
- 3) раздув трубы, получаемой экструдированием.



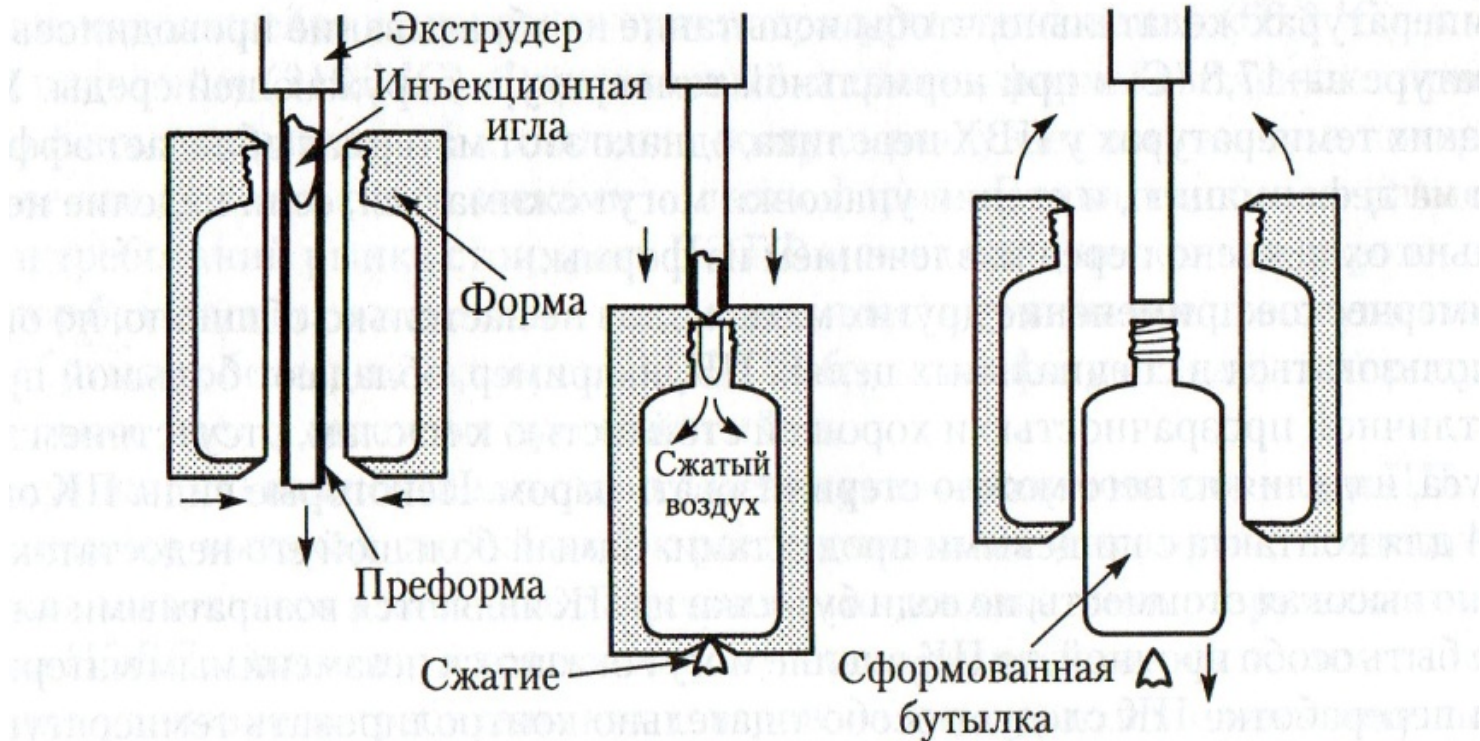
8.2 Экструзионно-раздувное формование



Из трех методов раздувного формования, применяемых для изготовления упаковки, наиболее широко используется метод, называемый «экструзионное формование с раздувом».

Метод заключается в экструзии трубки, называемой «преформа», в нижнем направлении. Когда она достигает нужной длины, разведенные половинки пресс-формы, окружающие заготовку, смыкаются, обрезают и замыкают дно, и остается только канал вверху для подвода сжатого воздуха, с помощью которого в дальнейшем и формируется изделие (см. рисунок).

При такой технологии форма для получения последовательно экструдированных преформ может быть стационарной, а процесс раздува может происходить на одном блоке. Возможна и непрерывная экструзия преформ, если форма при подъеме захватывает преформу, а затем опускается для формования раздувом. Непрерывно экструдированные преформы могут также захватываться формами, смонтированными сбоку, челнок которых, совершая возвратно-поступательные движения, захватывает преформу, которая затем выдувается, и готовое изделие извлекается практически без остановки. Этот скоростной процесс особенно подходит для изготовления изделий из ПВХ, причем его температура должна жестко контролироваться во избежание разложения и изменения цвета материала



При формовании раздувом полуформы смыкаются вокруг преформы; при движении вниз в разогретую и пластичную заготовку подается воздух, выдувая изделие, которое после формования извлекается из формы; последняя снова перемещается вверх и захватывает новую преформу.

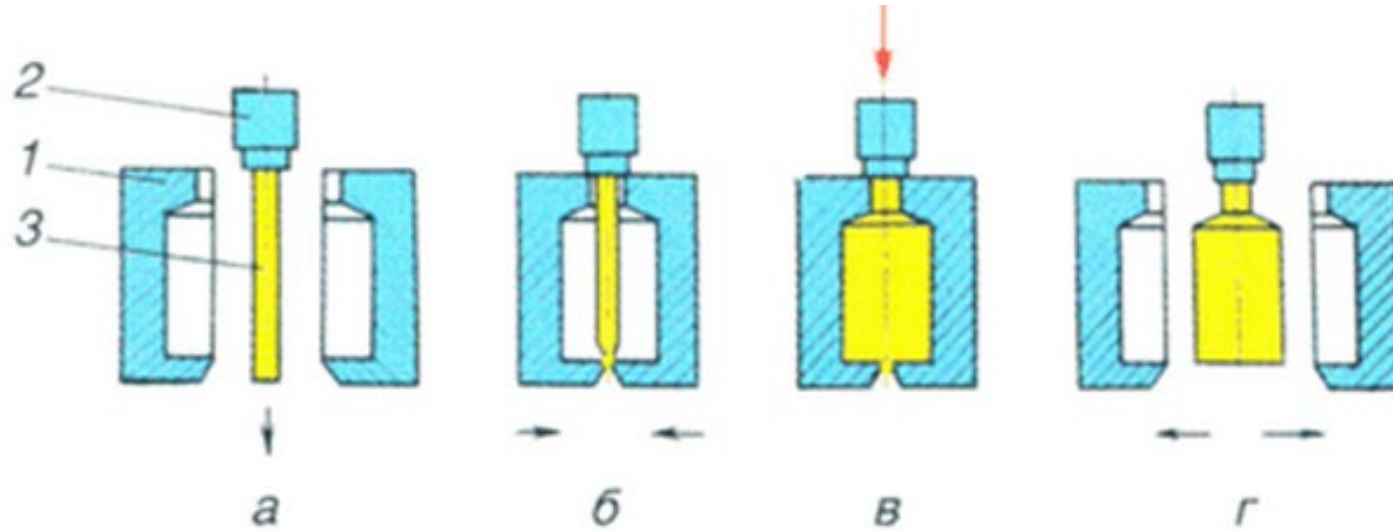


Схема экструзионно-выдувного формования:

- 1 - пресс-форма;
- 2 - трубная головка;
- 3 - трубная заготовка

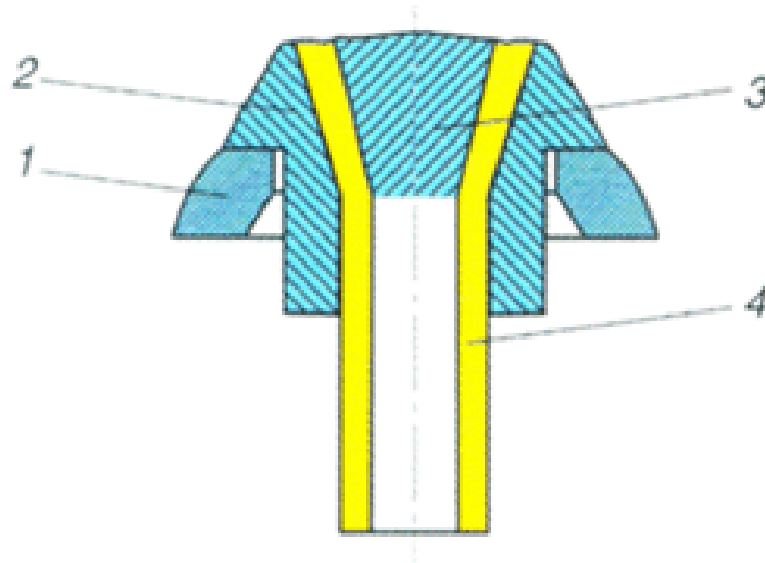


Схема получения трубной заготовки:
1 - тело трубной головки;
2 - мундштук;
3 - дорн;
4 - трубная заготовка



Экструзионно-раздувное формование



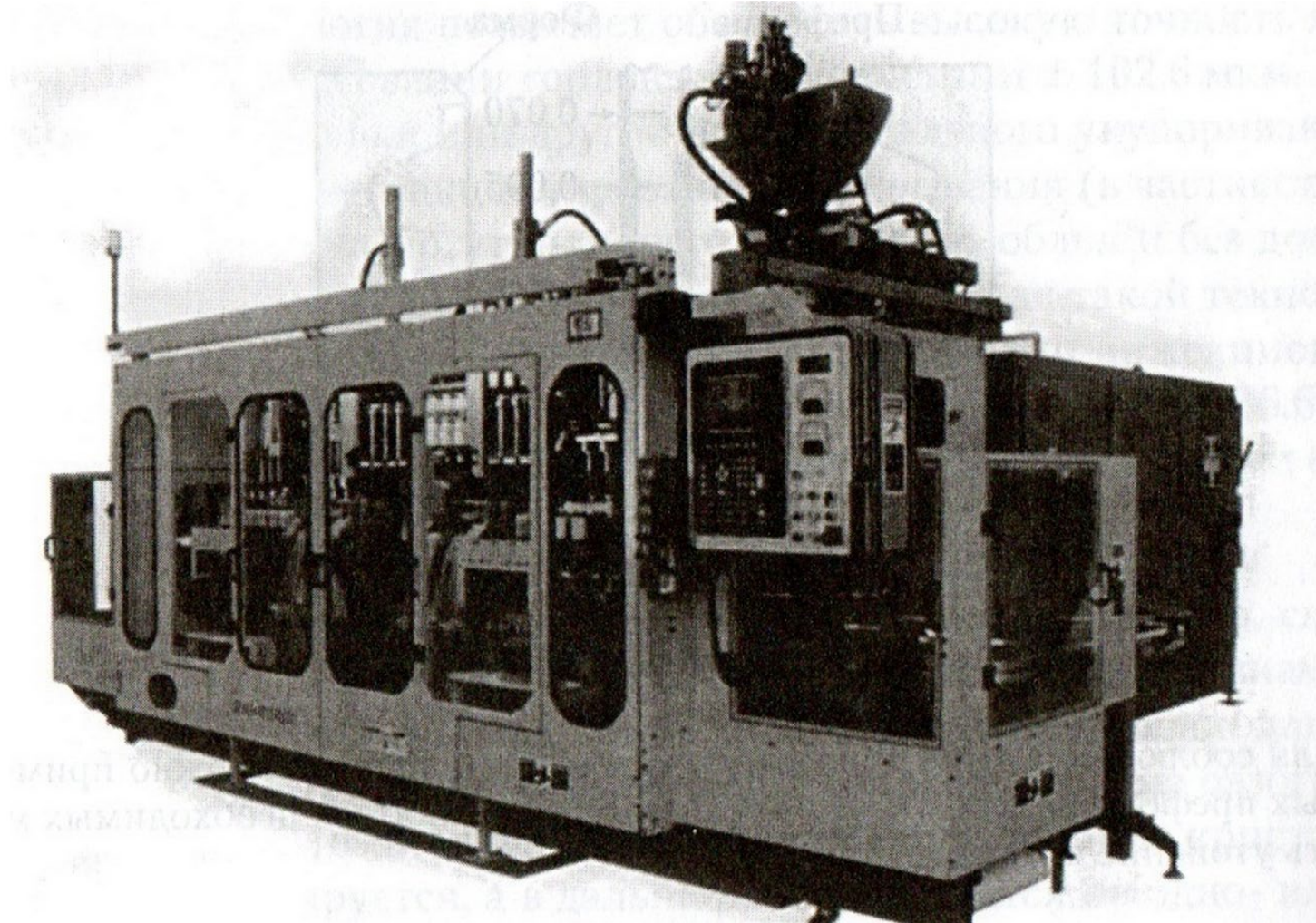
Для увеличения выпуска продукции при использовании непрерывной экструзии преформ существует специальное оборудование, в котором на карусели установлено множество форм, непрерывно вращающихся под расположенным наверху экструдером, формую и сбрасывая готовые изделия в процессе вращения карусели с формами.

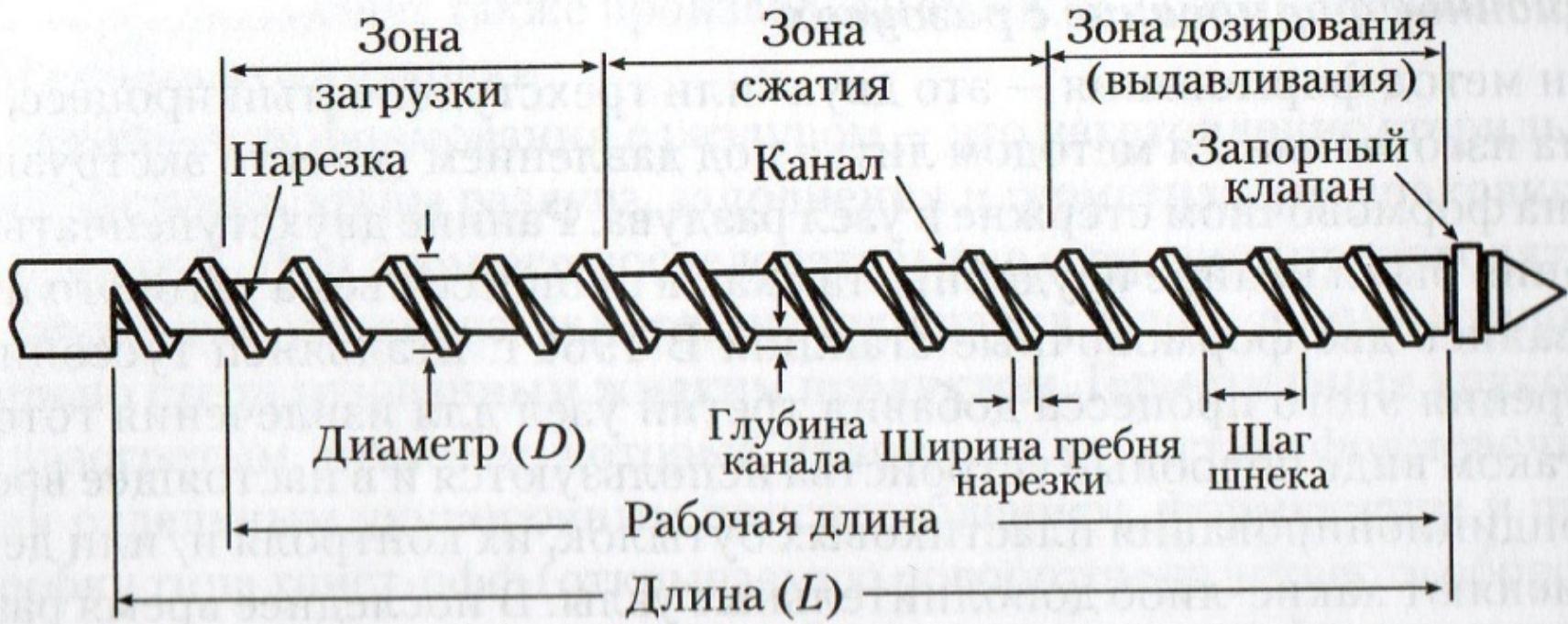
Поскольку для подобных систем требуется много форм, а для их смены необходимо время, такое оборудование целесообразно использовать для изготовления больших серий изделий одинакового размера (в частности, для крупномасштабного производства пластиковых бутылок). В оборудовании подобного типа пластиковые бутылки обычно отделяются от непрерывных преформ после охлаждения и раскрытия форм.

Для получения преформ, из которых изготавливают изделия методом раздува, используются два типа шнековых машин, аналогичных применяемым для литья под давлением. Для изготовления небольших контейнеров используют машины со шнеками возвратно-поступательного действия и двухшнековые машины (см. рисунок). Они снабжены вторичным накопителем и поршнем для порционного выдавливания преформ. Экструдеры с накапливающей головкой и плунжерной подачей применяются для изготовления больших контейнеров, включая пластиковые бочки.



Экструзионно-раздувное формование





В машинах, используемых для инъекционного и выдувного формования, для нагревания, плавления пластмассовых гранул и перемешивания материала используются шнеки.

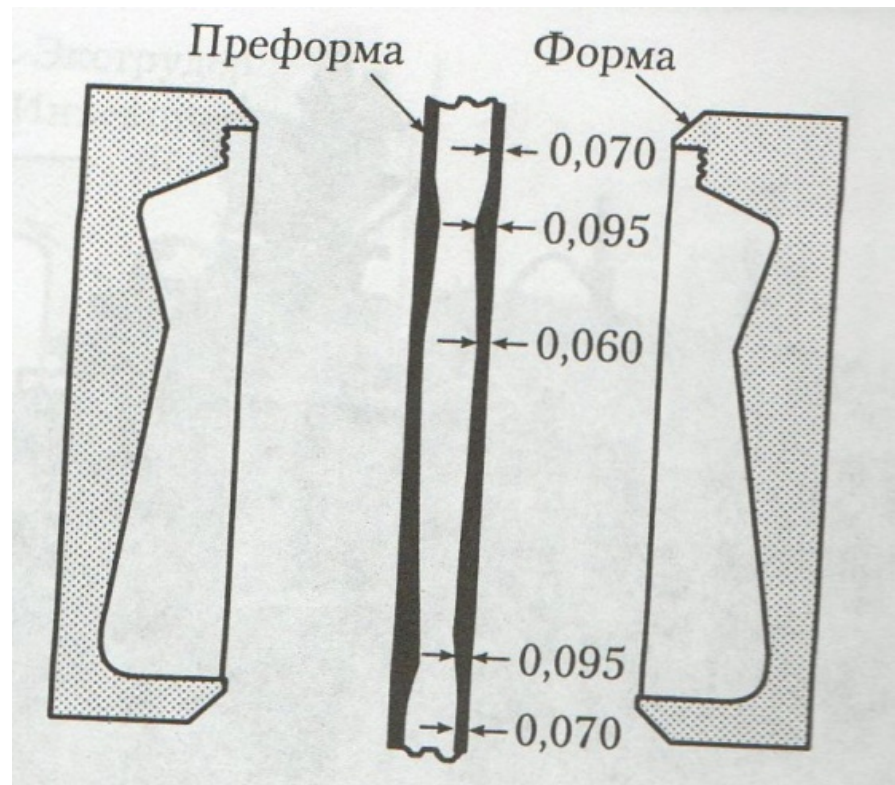


Экструзионно-раздувное формование



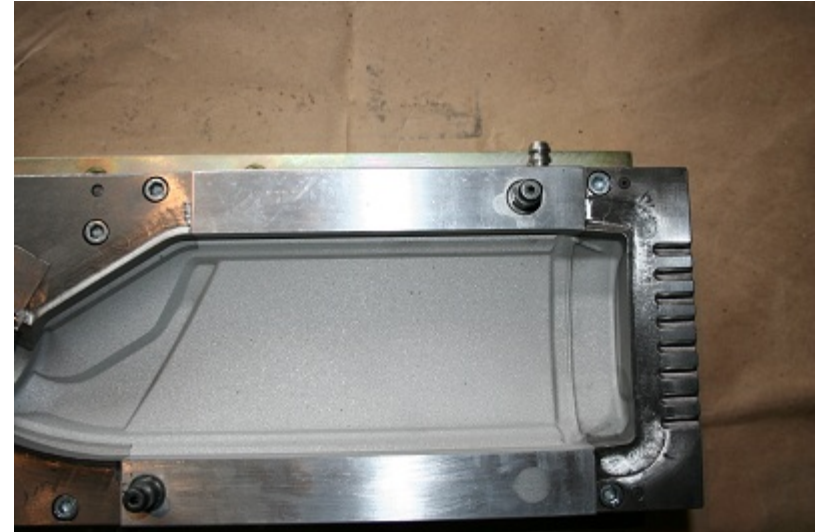
Все головки экструдеров могут быть оснащены устройствами программирования преформ. В обычных головках расположение дорна внутри головки экструдера для получения одинаковой структуры стенок преформы фиксируется.

В программируемых головках для регулирования толщины стенок преформы положение дорна может регулироваться (рисунок). Это позволяет изменять толщину стенки заготовки по длине — больше в основании изделия (для прочности), больше в тех местах, где материал должен раздуться сильнее, и меньше там, где тонкие и небольшие участки не требуют большого количества материала.





Экструзионно-раздувное формование



Форма для экструзионно-раздувного формования



Экструзионно-раздувное формование



В реальном процессе формования теплый мягкий пластик растягивается под действием сжатого воздуха и принимает форму готового изделия.

При экструзионном формовании с раздувом на нижней части готового изделия хватается небольшой «хвост», который должен удаляться. Раньше горловины готовых бутылок для приведения в соответствие их размеров подвергали механической обработке. В настоящее время большая часть раздувных агрегатов автоматически заполняет операции по снятию облоя с готовых изделий непосредственно на них, и формование горлышка происходит в форме совместными усилиями инъекционной иглы и формующего горлышко кольца. Транспортные контейнеры и емкости с широким горлышком по-прежнему проходят заключительные этапы обработки на дополнительных обрезных прессах для снятия заусенцев.

Экструзионное формование с раздувом больше всего подходит для изготовления пластиковых контейнеров любой формы и размеров и транспортной тары. Формы относительно дешевы и зачастую их изготавливают из алюминия (как для крупно-, так и для мелкосерийной продукции).



8.3 Инжекционное формование с раздувом



Еще один метод формования — это двух- или трехступенчатый процесс, в котором преформа изготавливается методом литья под давлением (вместо экструзии) и переносится на формовочном стержне в узел раздува.

Ранние двухступенчатые системы формования были крайне неудобны, так как в процессе съема готового изделия останавливались две формовочные станции. В 1961 г. итальянец Гуссони для ускорения этого процесса добавил третий узел для извлечения готовых изделий, и в таком виде подобные устройства используются и в настоящее время.

Иногда для кондиционирования пластиковых бутылок, их контроля и/или декорирования применяют какие-либо дополнительные узлы. В последнее время разработаны методы формования бутылок без образования облоя, позволяющие создавать более привлекательные по внешнему виду флаконы для парфюмерных и косметических товаров.

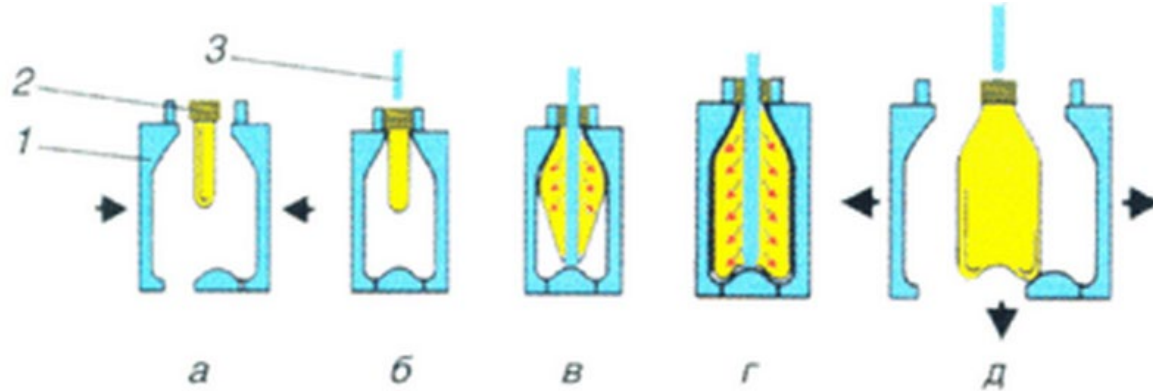


Схема инъекционно-выдувного
формования:
1 - пресс-форма;
2 - преформа;
3 - шток



Инжекционное формование с раздувом



Похожая технология, называемая «формование с раздувом и перемещением заготовки», заключается в помещении дозированного количества пластикового расплава в специальный контейнер для получения преформ и переносе полученной заготовки с помощью формовочного стержня в зону формования горлышка для последующего раздува.

Эта технология применяется для изготовления небольших бутылочек и емкостей, где необходимы особо точные размеры. Использование инжекционного формования находит свое применение в области упаковки фармацевтической продукции, где необходимы контейнеры высокого качества и с точными размерами.

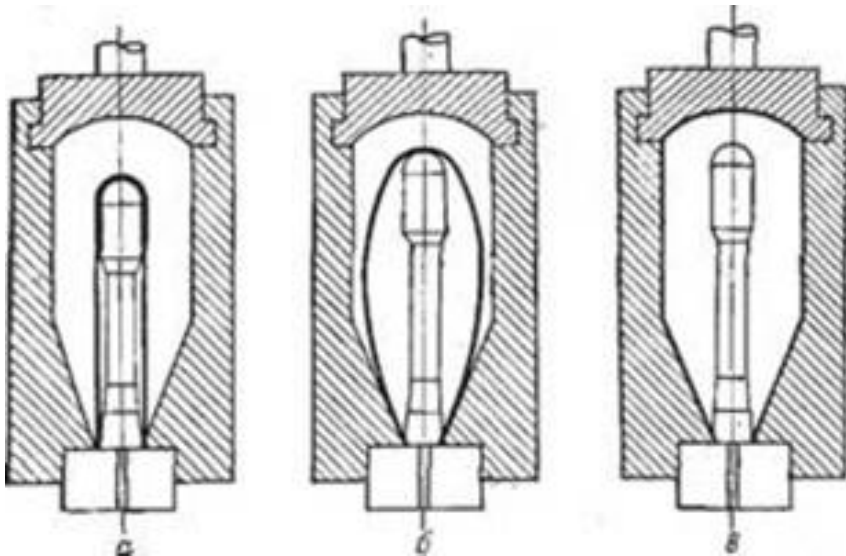
Инжекционная технология позволяет обеспечить высокую точность и контроль массы, особенно при формовании горловины с допусками $\pm 102,6$ мкм. Это важно там, где используются пробки или другой вид специального укупоривания, например пробки с защитой от несанкционированного открывания (в частности, детьми).

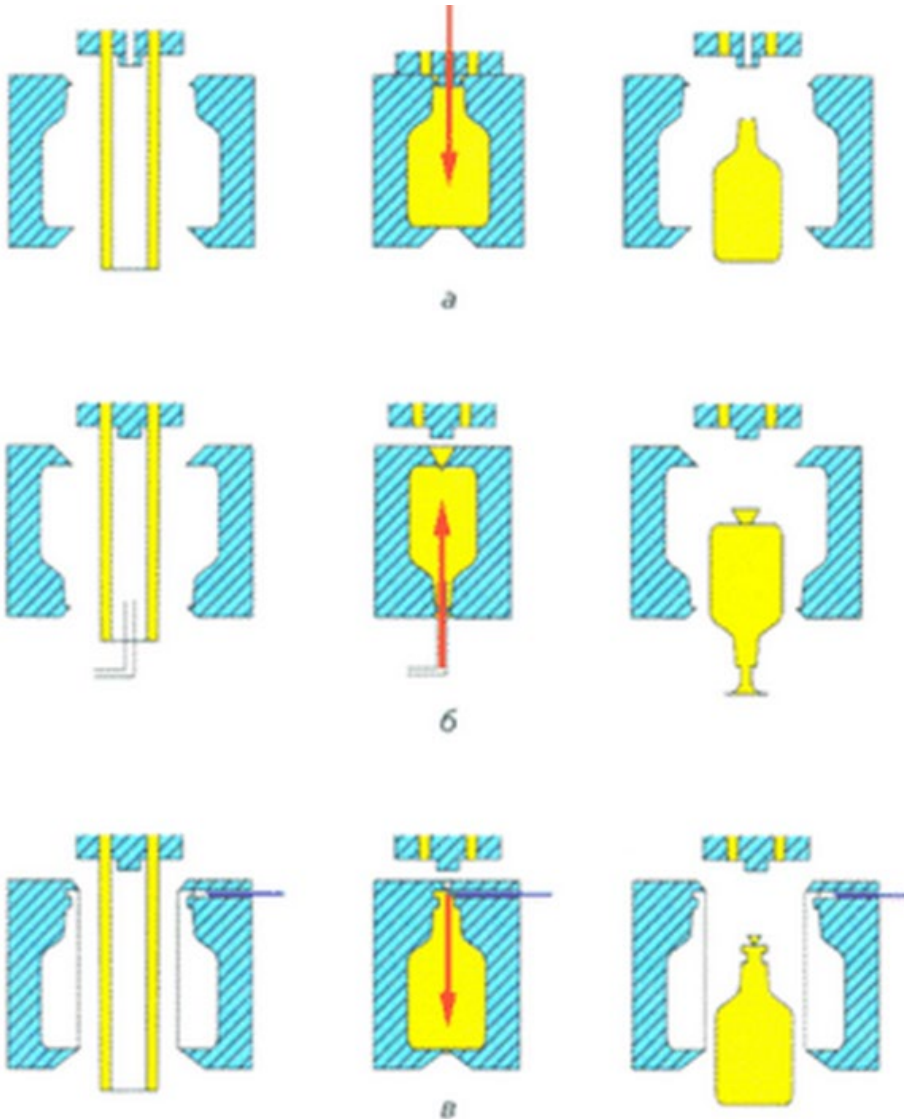


Инжекционное формование с раздувом



В настоящее время емкости могут быть изготовлены без облоя и без дополнительных заключительных операций, однако стоимость форм для такой технологии достаточно высока. Форма изделий, получаемых по технологии инжекционного формования, обычно стандартна, а их емкость не должна превышать 236,6 мл, хотя в последнее время получают распространение бутылки и емкостью 473 мл (16 унций).





Способы экструзионно-выдувного формования:
а - выдув сверху;
б - выдув снизу;
в - выдув иглой



Формование с раздувом и ВЫТЯЖКОЙ



Третий метод формования может быть использован для полимеров, способных к линейной ориентации, — например, ПЭТФ, ПВХ, ПП и аморфных полиамидов. Наибольшее применение этот метод находит при изготовлении бутылок для напитков. При его использовании предварительно отформованная преформа разогревается до температуры чуть выше температуры стеклования (во избежание кристаллизации) и растягивается, ориентируется, а в дальнейшем выдувается по одно- или двухступенчатой технологии.

При двухступенчатой технологии преформы изготавливают отдельно (обычно на другом оборудовании) и уже готовыми помещают в машину повторного нагрева и выдува. При одноступенчатой технологии все эти процессы выполняются на одной и той же линии. Операции формования преформы и ее раздува схожи с аналогичными при экструзионном формовании с раздувом. Преимущества раздува с вытяжкой заключаются в повышении прозрачности материала, глянца, ударопрочности и плотности. Этот метод позволяет также производить емкости с очень тонкими стенками, что снижает стоимость упаковки.



Формование с раздувом и ВЫТЯЖКОЙ



При двухступенчатой технологии преформы изготавливают отдельно (обычно на другом оборудовании) и уже готовыми помещают в машину повторного нагрева и выдува.

При одноступенчатой технологии все эти процессы выполняются на одной и той же линии. Операции формования преформы и ее раздува схожи с аналогичными при экструзионном формовании с раздувом. Преимущества раздува с вытяжкой заключаются в повышении прозрачности материала, глянца, ударопрочности и плотности. Этот метод позволяет также производить емкости с очень тонкими стенками, что снижает стоимость упаковки.



Формование с раздувом и ВЫТЯЖКОЙ



Особое применение формования с раздувом — это изготовление стерильной упаковки, в ходе которого этапы раздува, заполнения и герметизации упаковки сводятся в одну операцию. При этом все последовательные операции производятся в стерильной камере, где упаковка (иногда находящаяся еще в форме) заполняется предварительно стерилизованным жидким продуктом.

Герметизация упаковки производится разогретым штампом, который является или частью формовочного устройства, или отдельным укупорочным приспособлением, формирующим и присоединяющим пробку типа твист-офф (открываемую поворотом на четверть оборота).

При другой технологии изготовления стерильной упаковки емкость формируется обычным образом в стерильных условиях, заполняется предварительно стерилизованным продуктом и закрывается предварительно стерилизованной пробкой (крышкой). Как правило, конструкция такого оборудования отражает жесткие требования к стерильности. Оно изготавливается из нержавеющей стали и проектируется так, чтобы обеспечить изначальную стерильность и возможность безразборной мойки (CIP) с помощью моющих средств и пара.



Конструкция форм для метода раздува



Два наиболее важных фактора, которые следует иметь в виду при изготовлении форм для выдувного формования, — это теплообменные свойства и износостойкость. Наиболее подходящие материалы — алюминий, сталь и сплав бериллия с медью. Выбор материала зависит от технологии выдувного формования и природы пластика. Так, например, для работы с полиолефинами наиболее часто используются алюминиевые формы, подвергнутые дробеструйной обработке во избежание задержки воздуха между стенками полости изделия.

Твердый, устойчивый к коррозии сплав бериллия с медью характеризуется высокими теплопроводностью и износостойкостью. Формы из этого материала часто используют для формования изделий из ПВХ. Для получения более высокого глянца поверхности изделий формы для ПВХ полируют и покрывают хромом. Этот сплав дороже алюминия, он тяжелее и дольше обрабатывается.



Конструкция форм для метода раздува



При инъекционном формовании с раздувом полости для преформ, полости для формования жестких полимеров, горловинные кольца и формовочные стержни для всех видов пластиков изготавливают из закаленной инструментальной стали.

Участки формы для формирования горловины и основания, чтобы их было легче обрабатывать и заменять, как правило, представляют собой отдельные детали. Полуформы должны быть точно подогнаны друг к другу, так как любое несовпадение половинок приведет к утонению материала в месте соединения частей формы. Усилие запираения полуформ значительно меньше, чем форм для литья под давлением, поскольку они должны выдерживать давление в полостях лишь около 0,035 МПа.



Конструкция форм для метода раздува



Для обеспечения кратчайшего производственного цикла и одинакового состояния поверхности готового изделия необходимо соответствующее охлаждение формы. Водяные каналы в каждой полуформе могут быть либо просверлены насквозь, либо заглублены и располагаться перпендикулярно к оси формы как можно ближе друг к другу, поскольку 80% общего времени формования тратится на охлаждение, и любое улучшение системы охлаждения способствует повышению производительности.

Так как отформованное изделие обычно охлаждается в самой форме, были разработаны способы сокращения времени охлаждения и преодоления недостаточной теплопроводности большинства пластиков. Одним из таких способов стало применение в качестве раздувающего агента жидкого азота или диоксида углерода, а другим — глубоко охлажденного воздуха, содержащего водяной пар. При использовании подобных методов производительность возрастает более чем на 50%.



Оценка свойств термопластичных полимеров, применяемых при методе раздува



Особенно важен выбор материала при методе раздува. В таблице даны оценки основных технологических и эксплуатационных свойств полимеров, применяемых для изготовления полый тары. Сравнение проведено по пятибалльной системе - от пятерки - отлично, до единицы - очень плохо.

N п/п	Свойство	Полимер					
		Полиэтилен-терефталат (PET)	Поливинил-хлорид (PVC)	Поликарбонат (PC)	Полиэтилен высокой плотности (HDPE)	Полиэтилен низкой плотности (LDPE)	Полипропилен (PP)
1	Прозрачность	5	5-4	5	2	2	2-4
2	Прочность (жесткость)	5-4	4-3	5	3	1-2	3-4
3	Ударная вязкость	4-5	3-4	4	3	2	3-4
4	Ударная вязкость при низких температурах	4-5	3-4	3-4	4-5	2	2-4
5	Трещиностойкость	4-5	4-5	4-5	4-5	5	4-5
6	Барьерные свойства:						
	по воде	3-4	3	3	4-5	4	4-5
	по кислороду	4	4	5	2	4	2
7	Устойчивость:						
	к кислотам	3-4	4-5	3-4	4-5	2	4
	спиртам	4	4	4	4	4-5	4
	щелочам	2-3	4	4	4	4	4-5
	растворителям	4	5	5	3-4	4	4
	хлорсодержащим	2	4	3	5	3-4	5-4
	теплоте	2-3	2-3	2-3	4	5	4
	холоду	4	3	3	5	3	2-4
	ультрафиолету	4	3	2-3	4	4	3-4
8	Возможность выдува бутылок из преформ	5	2-3	3	1	1	2-4
9	Возможность утилизации и вторичной переработки	3	1	3	5	5	4



9.1 Метод ротационного формования

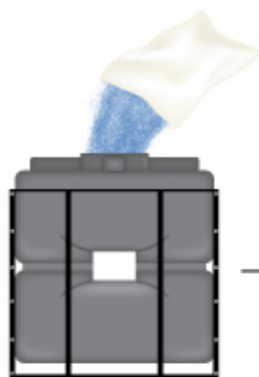


Метод ротационного формования находит все большее применение для получения крупных полых изделий из термопластов (полиэтилена). Сущность метода состоит в том, что материал в виде порошка вводится в форму, состоящую из двух половин, которая затем приводится во вращение в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Это приводит к равномерному распределению порошка по рабочей поверхности формы. Форма вводится в камеру нагрева, в которой происходит расплавление порошка и образование после остывания равномерной корки.

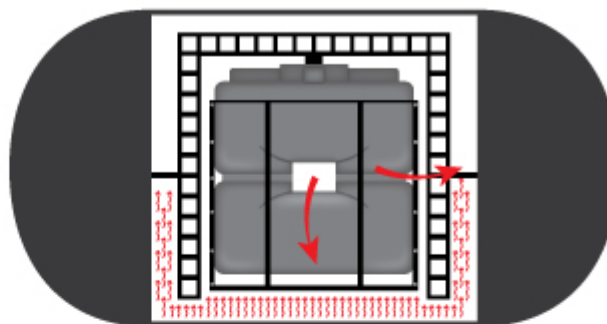
Характеристики продукта произведенного методом ротационного формования:

- монолитность и целостность - отсутствие швов;
- надежность - равная толщина стенок;
- большой срок службы;
- устойчивость к агрессивным средам продукции изготавливаемой из высококачественного полиэтилена.



ЭТАП 1

Загрузка. В форму загружается подготовленное порошкообразное сырье (чаще всего полиэтилен).



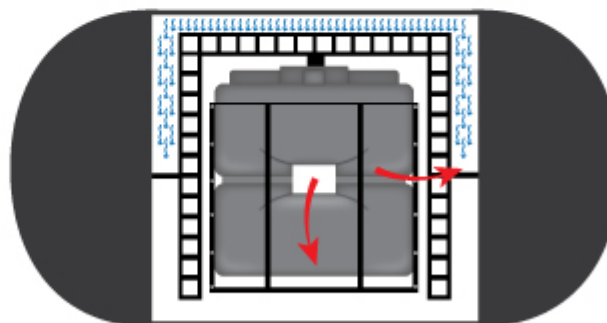
ЭТАП 2

Формование. Форма помещается в специальную камеру, в которой происходит постепенный нагрев, приводящий к расплаву сырья, при этом форма вращается в двух плоскостях.



ЭТАП 4

Извлечение. Форму открывают и извлекают готовое изделие.



ЭТАП 3

Охлаждение. Форму охлаждают, не останавливая ее движения, для обеспечения равномерного затвердевания стенок продукта.



Метод ротационного формования



Технологический процесс состоит из следующих операций:

- загрузка формы порошкообразным материалом;
- помещение формы в камеру нагрева (температура воздуха 290..350 °С) и вращение ее;
- помещение формы в камеру охлаждения и вращение ее;
- извлечение изделия и загрузка новой порцией материала.

Таким образом, установка, снабженная тремя формами, имеет три технологические позиции.



Метод ротационного формования. Форма



Форму закрывают и помещают в камеру нагрева. В которой производится нагрев и биосеовое вращение формы. При вращении полимер подплавляется и налипает на стенки формы.

Вращение формы в тепловом поле производят со скоростью от 4 до 20 об/мин. Это значительно ниже, чем при центробежном формовании полимеров. Формование заканчивают, когда весь полимер расплавится и налипнет на стенки формы.

Процесс ротационного формования происходит при атмосферном давлении, причем при вращении формы масса материала не оказывает существенное давление на ее стенку, поэтому ротационные формы могут иметь очень тонкие стенки, и они относительно дешевы.



Метод ротационного формования. Форма



Простые формы могут быть изготовлены в течение нескольких дней. Чаще всего литьевые формы изготавливают из стали или алюминия. Из металлов предпочтение отдается металлам с высокой теплопроводностью. Алюминиевые формы используют для изготовления сложных изделий. Изготовление формы производится литьем алюминия по мастер модели с последующей доработкой. Алюминиевое литье применяют также, когда необходимо изготовить несколько идентичных форм.

Для изготовления небольших изделий используют формы, изготовленные гальванопластикой или металлизацией в вакууме. Формы в процессе эксплуатации подвергаются большим термонапряжениям поскольку температура при проведении процесса многократно изменяется от комнатной до 300°C. Объем получаемого изделий на оборудовании ротационного формования определяется объемом камеры нагрева.



Метод ротационного формования. Форма



Ротационным формованием возможно получение очень крупных и объемных изделий. Изделия получаемые ротационным формованием практически не напряженные и в них отсутствует ориентация полимера. Обогрев вращающейся формы в камере нагрева производят с помощью электрических ТЭНов или сжигания природного газа.

Электрический обогрев более безопасен, но более дорогой. Одним из преимуществ ротационного формования является возможность варьирования толщиной стенки изделий простым изменением количества загружаемого материала в форму. Ротационным формованием можно получать изделия с толщиной стенки до 20 мм.





Метод ротационного формования. Охлаждение формы с изделием



Форму охлаждают потоком холодного воздуха или распыленной водой. При этом форма продолжает вращаться для обеспечения равномерности затвердевания полимера по объему изделия. Когда полимер окончательно затвердеет, вращение прекращают.

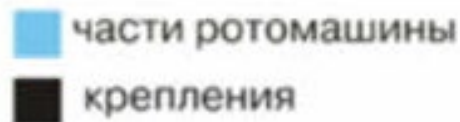




Метод ротационного формования. Извлечение изделия из формы



Форму раскрывают и готовое изделие извлекают из формы. Ротационное формование относится к безотходным процессам. При помощи специальных технологических приемов и приемов при конструировании ротационных форм можно достичь 100% выхода изделий из исходного сырья. Бракованные изделия возможно утилизировать, а полученные полимерные материалы использовать для изготовления новых изделий.





Метод ротационного формования. Оборудование для ротационного формования



Формы крепятся на так называемой «руке». «Рука» производит вращение формы и перемещает ее последовательно из зон загрузки/выгрузки изделия в камеру нагрева и охлаждения. В простых машинах камера нагрева и охлаждения совмещены и используется одна «рука». Для увеличения производительности, если позволяет объем камеры нагрева/охлаждения, на «руке» можно укрепить несколько одинаковых или разных форм.

Чаще всего используются машины карусельного типа с тремя или четырьмя «руками». Это позволяет увеличить производительность, сэкономить расход тепла и получать несколько разных изделий одновременно. Каждая «рука» находится в определенной зоне технологического цикла. Затем производится одновременное перемещение «рук» в последующую зону получения изделий.



Метод ротационного формования. Оборудование для ротационного формования



В данном случае все изделия на разных «руках» получают по единой технологической программе. Причем время нахождения «руки» в определенной зоне определяется временем формирования самого трудоемкого изделия. В настоящее время разработаны машины с независимыми «руками», позволяющими вести формование каждого из изделий по собственной программе.

Ротационным формованием можно получать многослойные изделия:

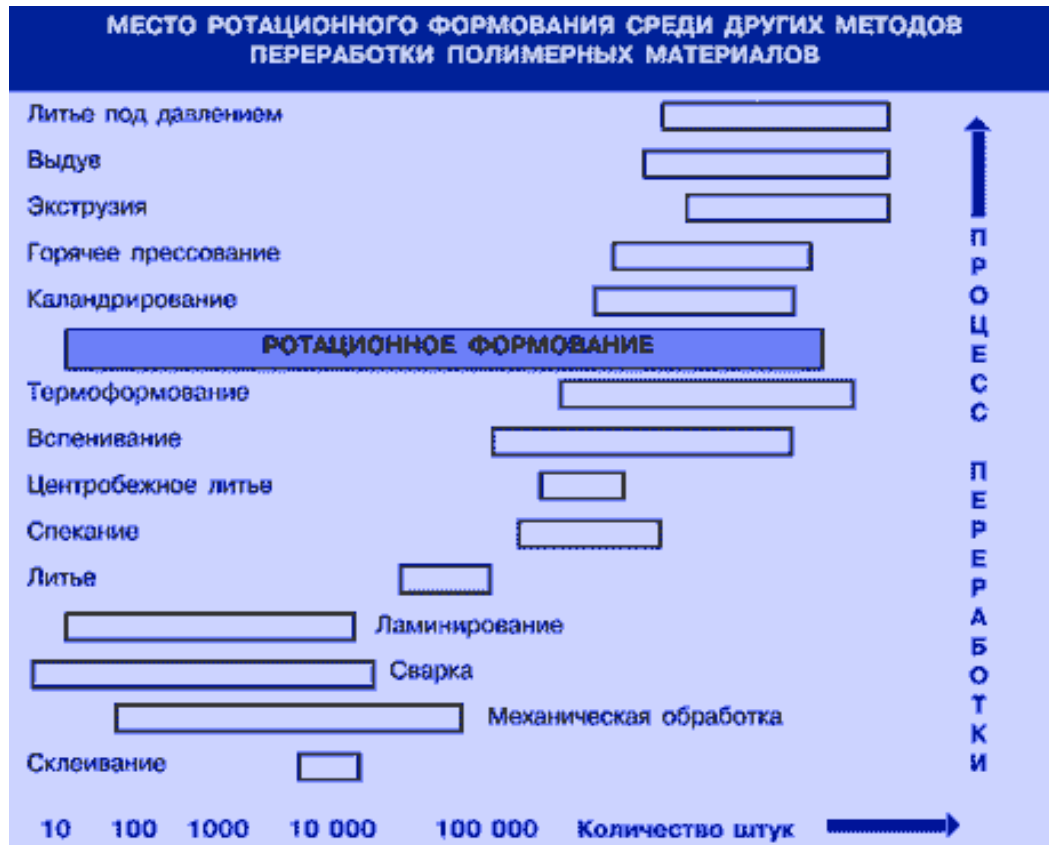
- каждый слой из которых выполнен из разных полимерных материалов;
- изделия с двойной стенкой;
- вспененные изделия.



Метод ротационного формования среди других методов переработки полимерных материалов



Как показано на диаграмме, ротационное формование относится к высокопроизводительным процессам, уступая по производительности лишь литью под давлением, выдувному и экструзионному формованию. Причем, в ряде случаев экономически целесообразно использование ротационного формования для получения партий изделий, насчитывающих всего нескольких штук.





Метод ротационного формования. Полимерный материалы для ротационного формования



При ротационном формовании чаще всего применяются порошкообразные полимерные материалы. Возможно применение гранул или жидких веществ. Доминирующую роль среди материалов для ротационного формования играет полиэтилен (ПЭ).

По данным ARM (Международной ассоциации ротационного формования) на долю полиэтиленовых изделий приходится от 85 до 95% рынка. Применяются линейные ПЭ низкой, средней, высокой плотности, пространственно сшиваемый ПЭ.

Наибольшее количество изделий выпускается из линейного полиэтилена средней плотности. На долю других полимеров приходится от 5 до 15% рынка. Среди этих полимерных материалов лидирующую роль занимают ПВХ–пластизоли, поликарбонат и полипропилен.





Метод ротационного формования. Полимерный материалы для ротационного формования



Для ротационного формования разработаны специальные марки полиамида, поликарбоната, полипропилена.

Ротационным формованием возможно изготовление изделий из термореактивных полимерных материалов, таких как полиуретаны, эпоксидные композиции и т.д. Лидерства ПЭ среди ПМ для ротационного формования объясняется следующими факторами:

- высокая термостабильность данного полимера по сравнению со многими полимерами. Время формования изделия часто составляет 15–40 мин при температуре в камере нагрева 270 С;
- хорошая перерабатываемость ПЭ гранул в порошок. Для измельчения ПЭ используют специально разработанные мельницы;
- относительно низкая стоимость ПЭ
- комплекс функциональных свойств, обеспечивающих конкурентоспособность изделий на потребительском рынке.



Метод ротационного формования. Полимерный материалы для ротационного формования



В России не производится полиэтиленового сырья, пригодного для ротационного формования, конкурентоспособность по ценам и качеству. Эта одна из основных причин тормозящих развитие процесса ротационного формования в России. Для модификации свойств полимеров и готовых изделий широко используются различные добавки.

Большое количество фирм, разбросанных в различных уголках мира, занимаются ротационным формованием. Это объясняется тем, что выгодно размещать оборудование как можно ближе к рынкам потребления. В данном случае минимизируются затраты на транспортные расходы по доставке объемных крупногабаритных изделий до потребителя.

Наибольшее количество фирм занимающихся ротационным формованием расположено в Северной Америке (США), по данным ARM, на 1996 г более 400 фирм занималось выпуском изделий ротационным формованием. В Европе – 255 фирм.



Преимущества ротационного формования:

- позволяет производить изделия практически любого объема (в некоторых случаях до 20 м.куб.);
- возможность заформовывания металлических закладных деталей;
- возможность производства одного и того же продукта с разными характеристиками (цвет, материал, толщина стенок);
- возможность конструктивно предусмотреть клапаны, отверстия и т.п.;
- производство сложных изделий «точно по чертежу», изготовление которых не возможно другими методами формования (выдув, литье под давлением);
- возможность выпуска изделий малым тиражом;
- переработка без отходов;
- незначительные затраты на оснастку;
- сравнительная простота оборудования;
- простота процесса изготовления изделий.



Недостатки метода ротационного формования



К недостаткам метода ротационного формования можно отнести:

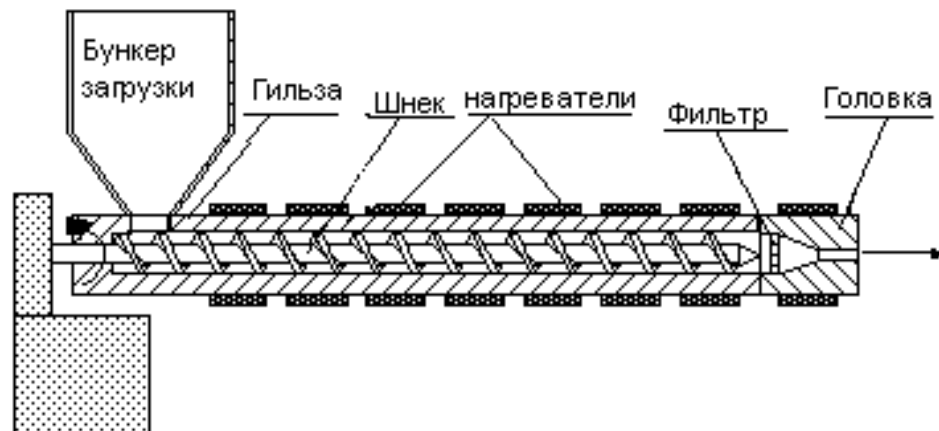
- длительный технологический цикл;
- стоимость исходных полимерных материалов относительно высока (необходимость размола, дополнительные требования по упаковке и др.);
- сравнительно ограниченный выбор полимерных материалов.

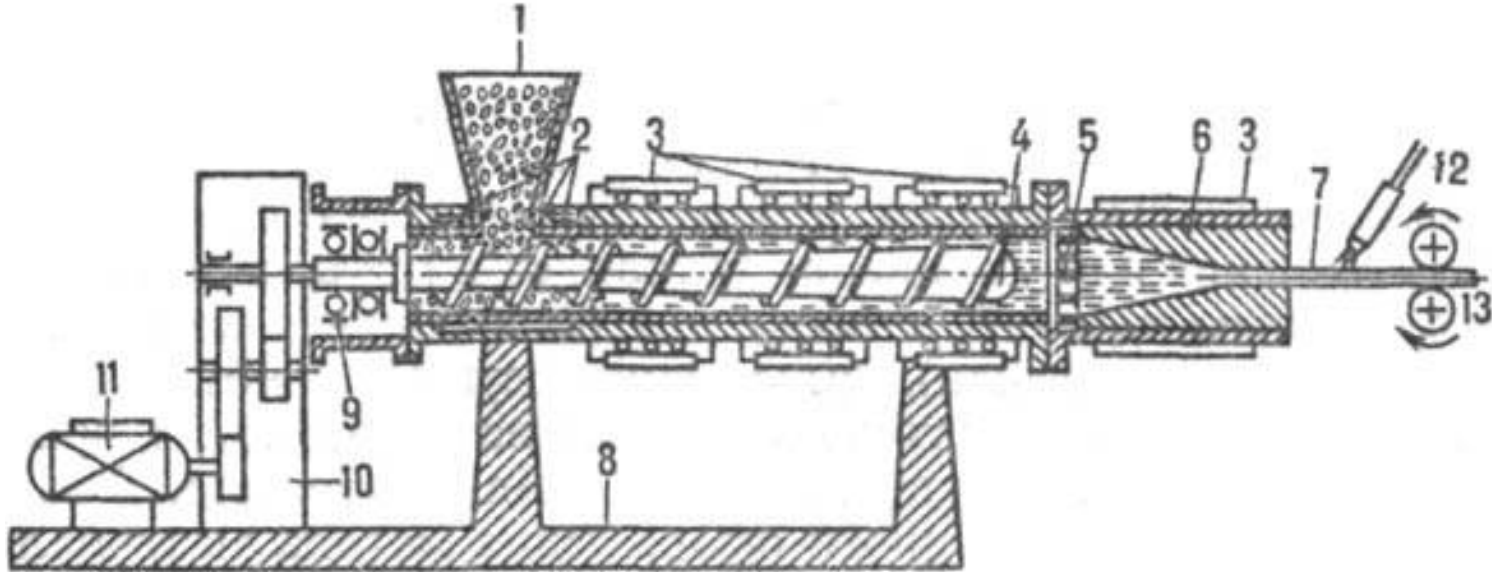
Заключение по методу ротационного формования

Ротационное формование является универсальным способом переработки полимерных материалов, позволяющим производить высококачественную конкурентоспособную товарную продукцию для различных сфер применения. Промышленность ротационного формования находится в стадии роста. Россия находится только на стадии формирования рынка, возможности ротационного формования, потребительские свойства изделий получаемых ротационным формованием малоизвестны. Отсутствие отечественной сырьевой базы является одной из основных причин тормозящих развитие процесса ротационного формования в России.

Экструзию (шприцевание, выдавливание) применяют для формования из термо- и реактопластов различных длинномерных изделий-волокон, пленок, листов, труб, профилей разнообразного поперечного сечения.

Переработка термопластов осуществляется на поршневых и винтовых машинах (экструдерах) путем выдавливания материала, переведенного в нагрет. цилиндре экструдера в вязкотекучее состояние, через формообразующую головку проходного типа (см. рисунок).

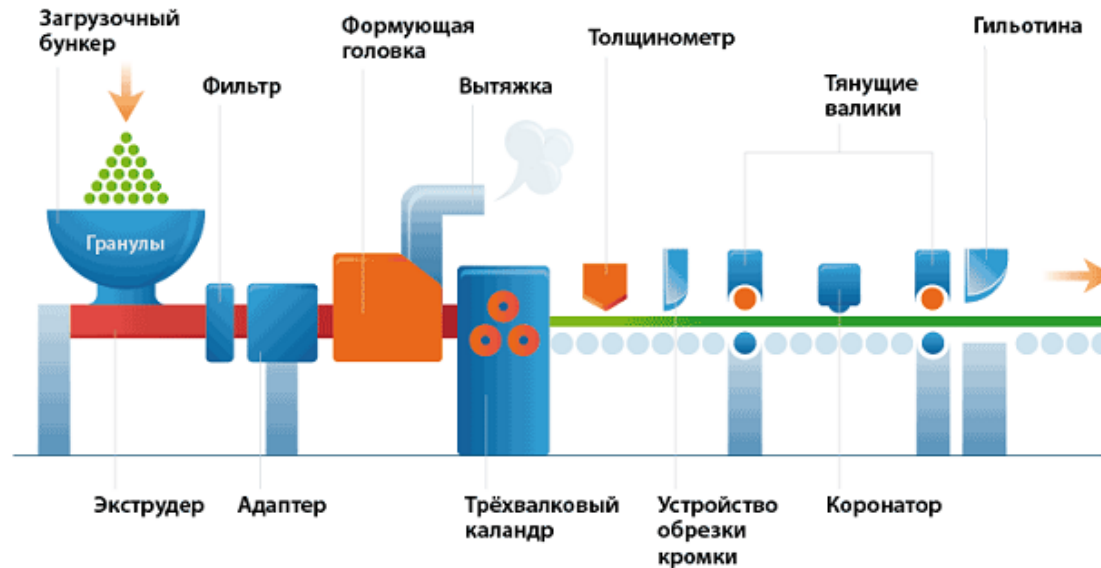




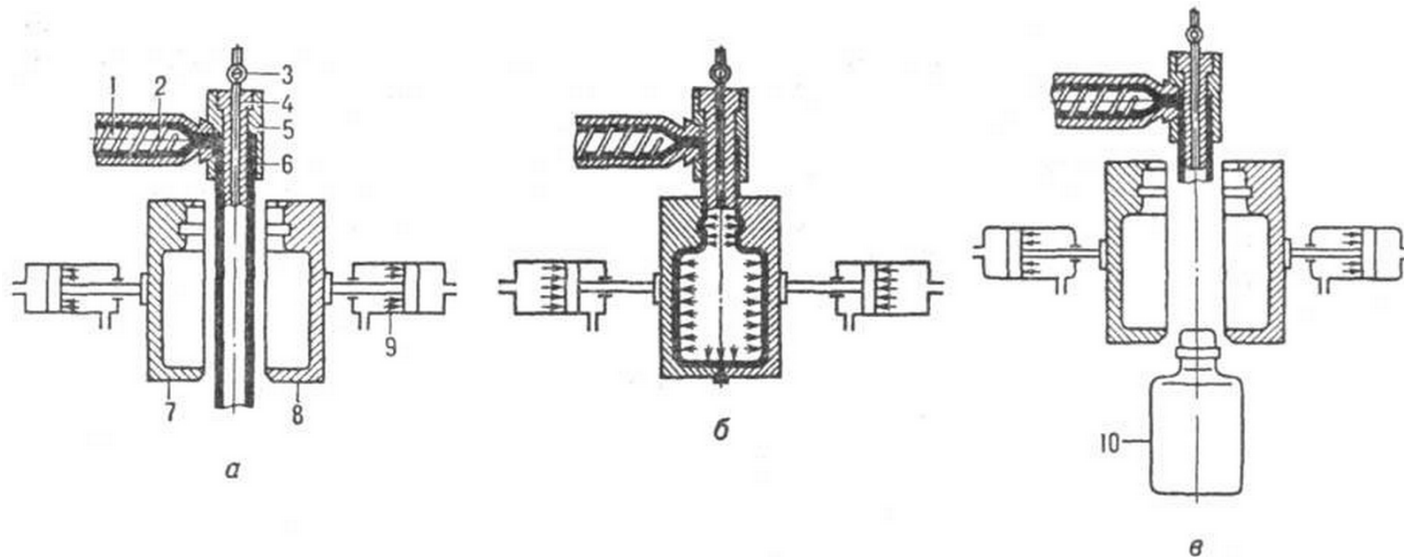
Винтовой экструдер: 1 - бункер для материала; 2 - каналы охлаждения; 3 - нагревательные элементы; 4-винт (шнек); 5-сетка; 6 - формообразующая головка; 7-изделие; 8-станина экструдера; 9-узел подшипников; 10-редуктор; 11 - электродвигатель привода; 12-форсунка для охлаждения изделия; 13-тянущее устройство.

Метод экструзии

Выходящее из головки изделие охлаждается, отводится тянущим устройством и сматывается в бухты или разрезается на отрезки необходимой длины. Скорость отвода изделия м. б. больше скорости выхода из головки, тогда происходит ориентация материала в направлении оси изделия. С помощью спец. устройств возможна поперечная ориентация материала. Методом экструзии можно также наносить на провода и кабели полимерную изоляцию.



Экструзию термопластов можно совмещать с другими методами формования, например, раздуванием (так называемое экструзионно-раздувное формование), в результате чего из заготовки получают крупногабаритные тонкостенные полые изделия



Производство изделий эк-струзионно-раздувным формованием: а-получение заготовки; б- раздувание заготовки и оформление изделия; в - извлечение изделия из формы; 1 - винт экструдера; 2 - материальный цилиндр экструдера; 3-кран для подачи сжатого воздуха; 4-дорн; 5-угловая головка; 6-заготовка; 7, 8-полуформы для раздува; 9-привод полуформы; 10-изделие.



Метод экструзии



Формование экструзией деталей из наполненных реактопластов осуществляют главным образом на поршневых машинах (штранг-прессование), т. к. расплав материала имеет слишком высокую вязкость. Конструкцию головки и распределение температуры по ее длине выбирают таким образом, чтобы материал был достаточно уплотнен и на выходе из головки имел степень отверждения, обеспечивающую формуемому изделию товарный вид и технологическую прочность. Окончательное отверждение материала может быть проведено в трубчатых печах.

Около половины производимых термопластов перерабатываются в изделия этим способом. Переработка вторичных полимеров и гранулирование также выполняются с применением экструзионного оборудования.



Метод экструзии



Экструзией получают:

- пленки,
- листы,
- трубы,
- шланги,
- капилляры,
- прутки,
- сайдинг,
- различные по сложности профили,
- наносят полимерную изоляцию на провода,
- производят многослойные разнообразные по конструкции и сочетанию применяемых пластмасс гибридные погонажные изделия.

В 2006 году около 30% производимых в России термопластов были переработаны методом экструзии.

Технологический процесс экструзии складывается из последовательного перемещения материала вращающимся шнеком в его зонах (см. рисунок): питания (I), пластикации (II), дозирования расплава (III), а затем продвижения расплава в каналах формирующей головки.

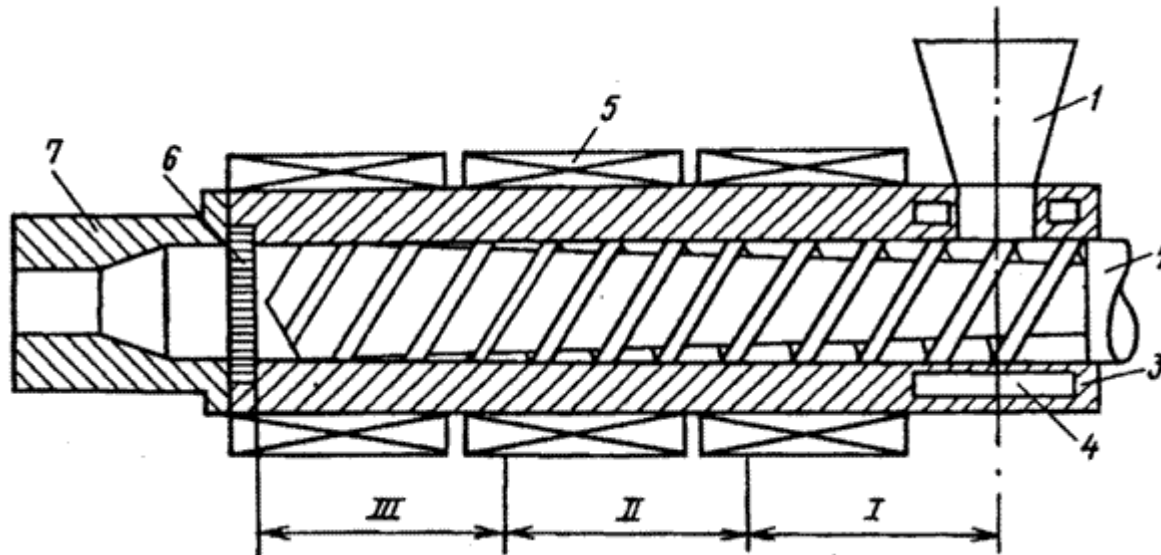


Схема одношнекового экструдера: 1- бункер; 2- шнек; 3- цилиндр; 4- полость для циркуляции воды; 5- нагреватель; 6- решетка с сетками; 7- формирующая головка



Процессы, происходящие при экструзии



Деление шнека на зоны I-III осуществляется по технологическому признаку и указывает на то, какую операцию в основном выполняет данный участок шнека. Разделение шнека на зоны условно, поскольку в зависимости от природы перерабатываемого полимера, температурно-скоростного режима процесса и других факторов начало и окончание определенных операций могут смещаться вдоль шнека, захватывая различные зоны или переходя из одного участка в другой.

Цилиндр также имеет определенные длины зон обогрева. Длина этих зон определяется расположением нагревателей на его поверхности и их температурой. Границы зон шнека I-III и зон обогрева цилиндра могут не совпадать.

Рассмотрим поведение материала последовательно на каждом этапе экструзии.



Процессы, происходящие при экструзии. Загрузка сырья



Исходное сырье для экструзии, подаваемое в бункер, может быть в виде порошка, гранул, лент. Равномерное дозирование материала из бункера обеспечивает хорошее качество экструдата.

Переработка полимера в виде гранул - наилучший вариант питания экструдера. Это объясняется тем, что гранулы полимера меньше склонны к образованию «сводов» в бункере, чем порошок, следовательно, исключаются пульсации потока на выходе из экструдера.

Загрузка межвиткового пространства под воронкой бункера происходит на отрезке длины шнека, равном $(1 - 1,5)D$. При образовании «сводов» на стенках бункера питание шнека материалом прекращается. Для устранения этого необходимо в бункер помещать ворошители.

Сыпучесть материала зависит в большой степени от влажности: чем больше влажность, тем меньше сыпучесть. Поэтому материалы должны быть вначале подсушены

Для увеличения производительности машины гранулы можно предварительно подогреть.



Процессы, происходящие при экструзии. Загрузка сырья



Применяя приспособления для принудительной подачи материала из бункера на шнек, также удастся существенно повысить производительность машины (в 3-4 раза). При уплотнении материала в межвитковом пространстве шнека вытесненный воздух выходит обратно через бункер. Если удаление воздуха будет неполным, то он останется в расплаве и после формования образует в изделии полости, что является браком изделий.

Изменение уровня заполнения бункера материалом по высоте также влияет на полноту заполнения шнека. Поэтому бункер снабжен специальными автоматическими уровнемерами, по команде которых происходит загрузка бункера материалом до нужного уровня. Загрузка бункера экструдера осуществляется при помощи пневмотранспорта.

При длительной работе экструдера возможен перегрев цилиндра под воронкой бункера и самого бункера. В этом случае гранулы начнут слипаться и прекратится их подача на шнек. Для предотвращения перегрева этой части цилиндра в нем делаются полости для циркуляции охлаждающей воды.



Процессы, происходящие при экструзии. Зона питания (I)



Поступающие из бункера гранулы заполняют межвитковое пространство шнека зоны I и уплотняются. Уплотнение и сжатие гранул в зоне I происходит, как правило, за счет уменьшения глубины нарезки h шнека.

Продвижение гранул осуществляется вследствие разности значений силы трения полимера о внутреннюю поверхность корпуса цилиндра и о поверхность шнека. Поскольку поверхность контакта полимера с поверхностью шнека больше, чем с поверхностью цилиндра, необходимо уменьшить коэффициент трения полимера о шнек, так как в противном случае материал перестанет двигаться вдоль оси шнека, а начнет вращаться вместе с ним. Это достигается повышением температуры стенки цилиндра (нагревом) и понижением температуры шнека (шнек охлаждается изнутри водой).

Нагрев полимера в зоне I происходит за счет диссипативного тепла, выделяющегося при трении материала и за счет дополнительного тепла от нагревателей, расположенных по периметру цилиндра. Иногда количество диссипативного тепла может быть достаточным для плавления полимера, и тогда нагреватели отключают. На практике такое происходит редко.

При оптимальной температуре процесса полимер спрессован, уплотнен и образует в межвитковом пространстве твердую пробку (см. рисунок). Лучше всего, если такая скользящая пробка образуется и сохраняется на границе зон I и II. Свойства пробки во многом определяют производительность машины, стабильность транспортировки полимера, величину максимального давления и т. д.

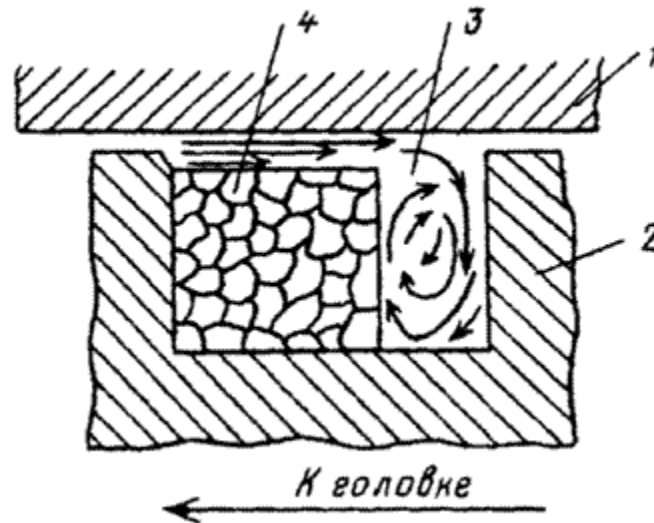


Схема плавления пробки материала в зоне II в межвитковом сечении шнека: 1- стенки цилиндра; 2- гребень шнека; 3- потоки расплава полимера; 4- спрессованный твердый полимер (пробка) в экструдере



Процессы, происходящие при экструзии. Зона пластикации и плавления (II)



В начале зоны II происходит подплавление полимера, примыкающего к поверхности цилиндра. Расплав постепенно накапливается и воздействует на убывающую по ширине пробку. Поскольку глубина нарезки шнека уменьшается по мере продвижения материала от зоны I к зоне III, то возникающее давление заставляет пробку плотно прижиматься к горячей стенке цилиндра, происходит плавление полимера.

В зоне пластикации пробка плавится также и под действием тепла, выделяющегося вследствие внутреннего, вязкого трения в материале в тонком слое расплава (поз. 3), где происходят интенсивные сдвиговые деформации. Последнее обстоятельство приводит к выраженному смесительному эффекту. Расплав интенсивно гомогенизируется, а составляющие композиционного материала перемешиваются.



Процессы, происходящие при экструзии. Зона пластикации и плавления (II)



Конец зоны II характеризуется распадом пробки на отдельные фрагменты. Далее расплав полимера с остатками твердых частиц попадает в зону дозирования.

Основной подъем давления P расплава происходит на границе зон I и II. На этой границе образующаяся пробка из спрессованного материала как бы скользит по шнеку: в зоне I это твердый материал, в зоне II- плавящийся. Наличие этой пробки и создает основной вклад в повышение давления расплава.

Также увеличение давления происходит за счет уменьшения глубины нарезки шнека. Запасенное на выходе из цилиндра давление расходуется на преодоление сопротивления сеток, течения расплава в каналах головки и формования изделия.



Процессы, происходящие при экструзии. Зона дозирования (III)



Продвижение гетерогенного материала (расплав, частички твердого полимера) продолжает сопровождаться выделением внутреннего тепла, которое является результатом интенсивных сдвиговых деформаций в полимере. Расплавленная масса продолжает гомогенизироваться, что проявляется в окончательном плавлении остатков твердого полимера, усреднении вязкости и температуры расплавленной части.

В межвитковом пространстве расплав имеет ряд потоков, основными из которых являются продольный и циркуляционный. Величина продольного (вдоль оси шнека) потока определяет производительность экструдера Q , а циркуляционного - качество гомогенности полимера или смешения компонентов.



Процессы, происходящие при экструзии. Зона дозирования (III)



В свою очередь продольный поток складывается из трех потоков расплава: прямого, обратного и потока утечек.

Прямой поток вызван движением шнека в направлении формующей головки. Обратный поток – это воображаемое течение, вызываемое высоким давлением со стороны головки; в реальности не существует. Поток утечки происходит при перетекании расплава между цилиндром и гребнем червяка.

Производительность Q экструдера с учетом распределения скоростей различных потоков составляет:

$$Q = Q_{\text{пр}} - Q_{\text{обр}} - Q_{\text{ут}},$$

где $Q_{\text{пр}}$, $Q_{\text{обр}}$, $Q_{\text{ут}}$ - производительности экструдера от прямого потока, противотока и утечек расплава соответственно.

$$Q = \alpha n - \beta \cdot (\Delta P) / (\mu \cdot L),$$

где n - частота вращения шнека; ΔP - давление на выходе из шнека (в конце зоны III); μ - эффективная вязкость расплава; L - длина шнека; α - константа скорости прямого потока, β - константа скорости обратного потока, которые зависят от геометрических параметров шнека.



Процессы, происходящие при экструзии. Основные параметры процесса экструзии



К технологическим параметрам относятся температура переработки полимера, давление расплава, температура зон головки и температурные режимы охлаждения сформованного экструдата.

При слишком высокой вязкости расплава получать изделия методом экструзии трудно из-за большого сопротивления течению расплава, возникновения неустойчивого режима движения потока. Все это приводит к образованию дефектов изделий.

Повышение температуры переработки может привести к термодеструкции расплава, а увеличение давления, мощности привода при более низких температурах - к механодеструкции, т.е. для экструзии расплавов должны применяться полимеры с довольно узким интервалом колебания вязкости.

Основными технологическими характеристиками одношнекового экструдера являются L , D , L/D , скорость вращения шнека n , геометрический профиль шнека (см. рисунок) и степень сжатия (компрессии) – отношение объема одного витка червяка в зоне загрузки к объему одного витка в зоне дозирования.

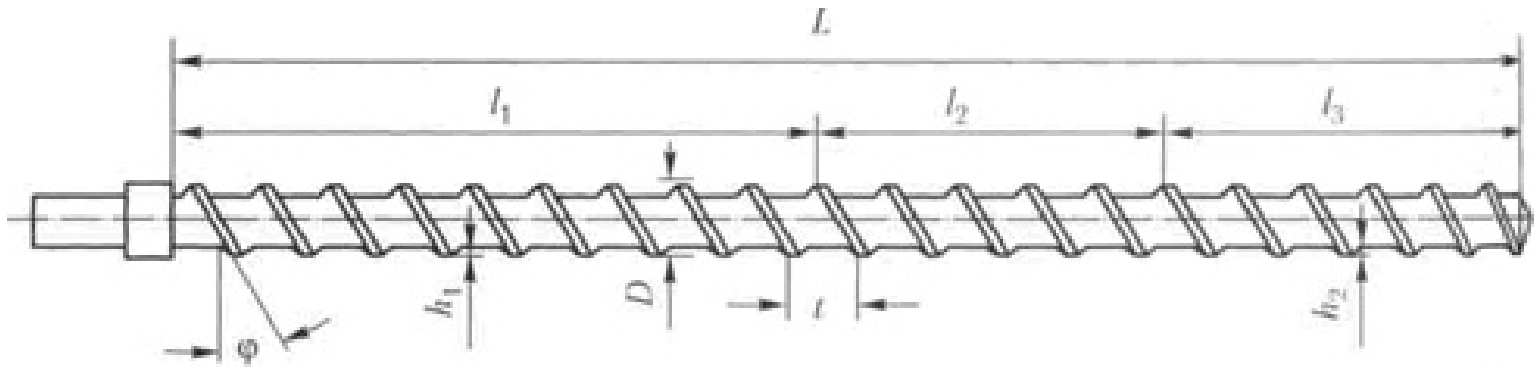


Схема зонной конструкции шнека

Короткошнековые экструдеры имеют $L/D = 12-18$, длинношнековые $L/D > 30$.
Наиболее распространены экструдеры с $L/D = 20-25$.

Показателем работы экструдера является его эффективность – отношение производительности к потребляемой мощности.



Процессы, происходящие при экструзии. Материалы



Большинство термопластов и композиций на их основе могут перерабатываться экструзией. Для этого достаточно, чтобы время пребывания расплава в экструдере при данной температуре было меньше времени термостабильности полимера при той же температуре. Наиболее широко применяется экструзия крупнотоннажных полимеров следующих типов. ПЭ, ПП, ПС ПК ПА, ПВХ (пластифицированный и непластифицированный), ПЭТФ а также смеси с неорганическими и полимерными наполнителями и более сложные композиции на их основе.

Для экструзии применяются материалы и режимы переработки при которых ПТР меняется в пределах 0,3 – 12 г/10 мин, т.к. из маловязких расплавов невозможно получить сплошную экструзионную заготовку в виде пленки, трубы, профиля. Если же используются литьевые марки полимера, то из них можно получить экструзией лишь отдельные типы изделий, так как ПТР у них находится в пределах 0,8 - 20 г/10 мин.



Процессы, происходящие при экструзии. Материалы



Так, трубы, кабельные покрытия производят из расплава полимера с ПТР от 0,3 до 1 г/10 мин. Это связано с выбором полимера большой молекулярной массы. Последняя определяет эксплуатационные свойства изделий – повышенные физико-механические характеристики.

Пленки, листы изготавливают экструзией расплава с ПТР в пределах 1 – 4 г/10 мин.

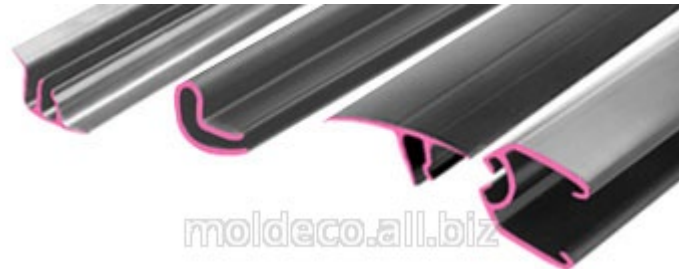
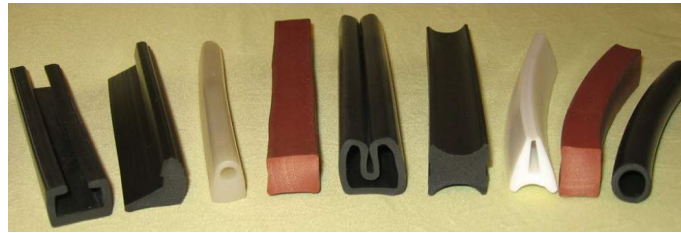
Дискретные изделия, производимые экструзией расплава с последующим раздувом в форме, получают из расплава с ПТР = 1,5 – 7,0 г/10 мин. Ламинирование с помощью экструзии происходит при ПТР расплава в пределах 7 – 12 г/10 мин



Процессы, происходящие при экструзии. Изделия



Все изделия, получаемые на основе термопластов методом экструзии, могут иметь в принципе неограниченную длину. Поперечник изделий ограничивается главным образом диаметром шнека экструдера. Чем больше D , тем шире, толще могут получаться изделия.



Экструдер в линии по
производству
пластикового плинтуса

moldeco.all.biz



11.1. Метод литья без давления



Литье без давления (химическое формование) – это формование изделий из мономеров, полимеризующихся непосредственно в форме в присутствии катализаторов без приложения внешнего давления.

Данный метод, объединив в единый технологический цикл синтез полимера и его переработку в изделия, позволяет получать изделия по уникальной схеме: мономер – готовое изделие.

При литье термопластов без давления мономер или смесь мономеров с необходимыми добавками заливается в форму, в которой процессы структурного образования и формирования изделия протекают одновременно. В результате образуются термопластичные материалы с упорядоченной структурой и высоким содержанием кристаллической фазы, что обуславливает их повышенные физико-механические свойства.



Метод литья без давления



С внедрением метода литья без давления появляется возможность непосредственно в форме при атмосферном давлении получать готовые изделия (или заготовки для них) практически любых размеров и массы с высокими физико-механическими свойствами.

Процесс литья без давления состоит из следующих стадий:

- 1) подготовка исходных материалов (сушка, очистка и т. д.) и форм (сборка, покрытие разделительным составом, контроль);
- 2) приготовление полимеризованной смеси, так называемого форполимера (введение в мономер необходимых ингредиентов, перемешивание, «созревание» смеси и т. п.);
- 3) формование (заливка смеси в форму, полимеризация и кристаллизация, охлаждение).

Формы для получения сложных по конфигурации изделий делают разборными (при серийном производстве) или цельными базового использования (при единичном производстве).



Метод литья без давления



Объем производства изделий методом литья без давления постоянно увеличивается, так как этот технологический процесс требует меньших трудозатрат и обеспечивает сокращение производственного цикла.

Известно, что классические методы переработки пластмасс (прессование, литье под давлением и др.) требуют громоздкого и дорогого оборудования и оснастки, а главное, позволяют получать изделия ограниченных размеров и массы.

Крупносерийное производство крупногабаритных изделий из пластмасс в настоящее время ограничено мощностью литьевых машин, размерами рабочих столов прессов, возможностью изготовления пресс-форм и рядом технологических трудностей.



Метод литья без давления



В зависимости от назначения изделия в состав полимеризационной смеси помимо мономера и катализатора могут входить различные добавки (ускорители, пластификаторы, стабилизаторы, красители и т. д.).

Весьма перспективно использовать несколько мономеров, что дает возможность изменять свойства получаемого материала в изделиях в желаемом направлении. Полимеризационные смеси могут быть использованы в качестве матрицы в КМ (например, стеклопластиках).

Литье термопластов без давления осуществляют двумя основными способами: горячей и холодной полимеризацией.



Метод литья без давления



При горячей полимеризации смесь заливают в предварительно нагретые формы, а процесс проводят при температурах, близких к температуре плавления полимера.

При холодной полимеризации весь процесс протекает при комнатной температуре.

Литье без давления различают и по механизму реакции полимеризации:

- радикальному,
- ионному,
- координационно-ионному.



Метод литья без давления



Все зависит от типа применяемого мономера, природы активного центра и механизма роста цепи. Практическими трудностями этого метода являются чувствительность полимеризационных смесей к ничтожным примесям различных веществ, разрушающих активные центры полимеризации.

К числу наиболее перспективных материалов, перерабатываемых данным методом, относятся полиамиды, поликрилаты, эфиры целлюлозы, полимеры аллиловых соединений и др.



Метод литья без давления



При замешивании композиций для холодной полимеризации вводят растворенную в порции мономера навеску активатора, что обеспечивает отверждение изделий без подвода внешнего тепла. После этого непосредственно в форме протекают процессы набухания и растворения полимерных частиц, полимеризация мономера и формование изделия.

При выборе материала форм большое значение имеют условия протекания процесса полимеризации (холодная или горячая полимеризация). Для осуществления горячей полимеризации (140 °С) применяют формы из алюминиевых сплавов, для холодной (80 °С) – формы из пластмасс, гипса, цемента, листового стекла, фанеры, картона.

При изготовлении небольших изделий серийного и массового производств используют формы из стали или медных сплавов с обязательным хромированием и полировкой рабочих поверхностей. Особенностью форм из пластмасс является тот факт, что они могут быть жесткими или эластичными (с жестким ограждением).

Формы для получения сложных по конфигурации изделий делают разборными (при серийном производстве) или цельными базового использования (при единичном производстве).

Рисунок 6.

Структура применяемых полимерных материалов в долях от общей массы автомобиля



Источник: Анализ RUPEC



12.1. Технологии предварительного формования заготовок, деталей и матов



В производстве изделий из ПКМ с целью ускорения производственного процесса изготовления используют предварительно отформованные заготовки, близкие по форме детали, а также маты, из которых формуются детали разной сложности прессованием в формах.

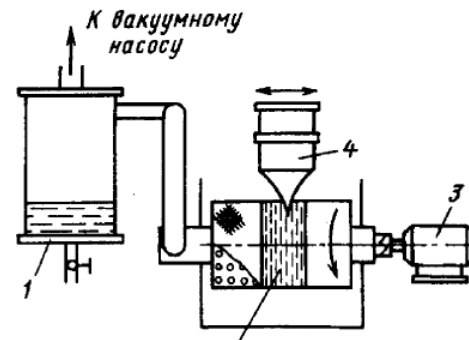
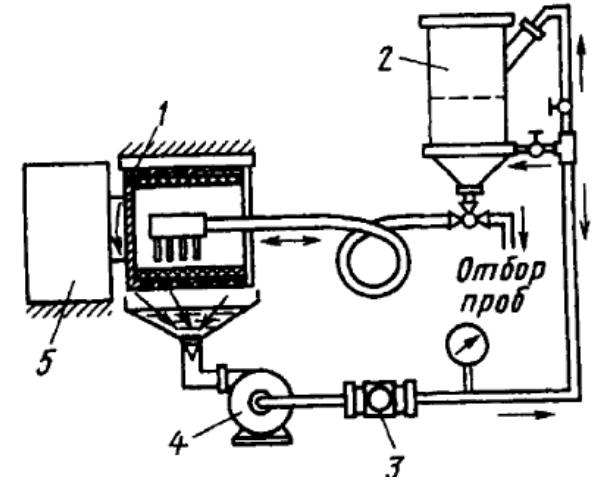
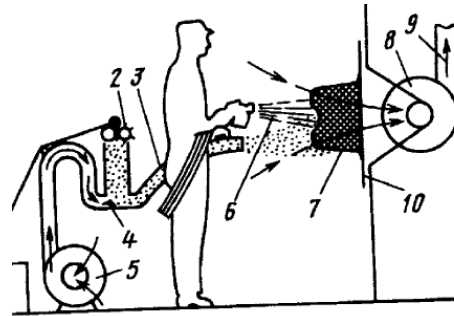
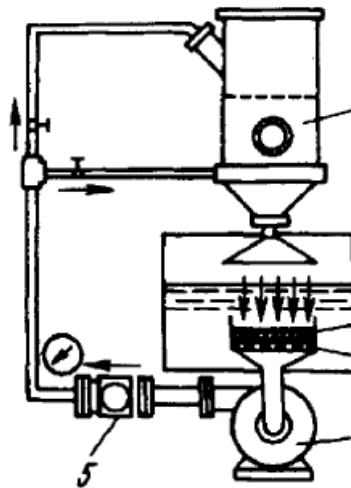
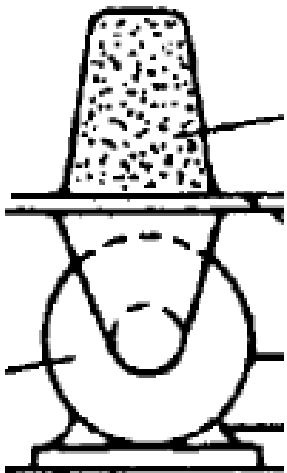
К изделиям, которые могут быть получены такими методами, относятся кузовные детали автомобилей, тракторов, ратраков; различные контейнеры, ящики, формы для отливки бетона, цветочные горшки, сидения автобусов и вагонов метро, корпуса маленьких лодок и т.п.

Детали, получаемые формованием заготовок и матов, обладают рядом преимуществ:

- низкой стоимостью оснастки,
- небольшими капитальными затратами,
- привлекательным внешним видом.

Различают следующие методы предварительного формования заготовок и матов:

- приточное насасывание;
- распыление;
- жидкостное насасывание;
- центробежная фильтрация;
- отлив пульпы.





12.1. Приточное насасывание



Метод заключается в собирании рубленого волокна на форме, придании ему очертаний изделия, которое должно быть отформовано, и сохранении его в таком состоянии до эффективной пропитки смолой. Для сбора рубленого волокна используют сетчатый каркас, имеющий форму изделия. Интенсивный поток воздуха, проходящий через сетку, затягивает в нее рубленое волокно и сравнительно равномерно распределяет по поверхности.

На волокна напыляют связующее обычно в виде водяного раствора, чтобы сохранить приданную армирующему компоненту форму. Эмульсия высушивается или отверждается, после чего заготовку извлекают из сетки и помещают в форму. Обычно для обеспечения необходимого сцепления волокон применяют около 5 % твердого связующего (от массы заготовки), но эта цифра может изменяться в зависимости от формы и размера заготовки. Волокно используют в виде непрерывного жгута, намотанного на шпули. Этот жгут проходит через резательную машину (станок), где рубится на отрезки длиной 12,7...76 мм, в зависимости от типа машины и назначения изделия.



Приточное насасывание



Для более точного контроля конфигурации детали можно использовать сочетание обрезков волокна различной длины. При глубокой вытяжке изделий со сравнительно прямыми сторонами заготовки должны быть очень плотными, в противном случае они повредятся сдвиговой кромкой матрицы при закрывании формы.

Для получения плотных заготовок требуются высокая скорость воздуха и, следовательно, большая мощность двигателя. Предельная толщина деталей, формируемых из заготовок, ограничена всасывающей способностью машины. В большинстве случаев максимальная толщина составляет 6,5 мм. Для этого требуется расход воздуха $85 \text{ м}^3/\text{мин}$ и мощность 4,5 кВт/м.

Для получения более толстых изделий можно использовать две заготовки, положенные одна на другую. В действительности это требует применения двух сеток разного размера. Если изделие имеет большую толщину только на каком-то одном участке, то в этом месте на заготовку можно поместить кусок мата.

Жгут (ровинг) поступает на резательную машину, расположенную над приточной камерой. Рубленая пряжа направляется в распределительное устройство для разделения прядей и равномерного их распределения в приточной камере. Падающие отрезки волокна втягиваются в сетку для заготовок за счет всасывания, после чего на них напыляют связующее. Сетка обычно устанавливается на вращающемся поворотном столе для лучшего распределения оседающего стекловолокна. Скорость вращения стола составляет 30...60 об/мин. После нанесения необходимого слоя стекловолокна заготовку вместе с сеткой переносят в печь, где она отверждается и высушивается. После этого заготовку извлекают из сетки, а последнюю возвращают в приточную камеру.

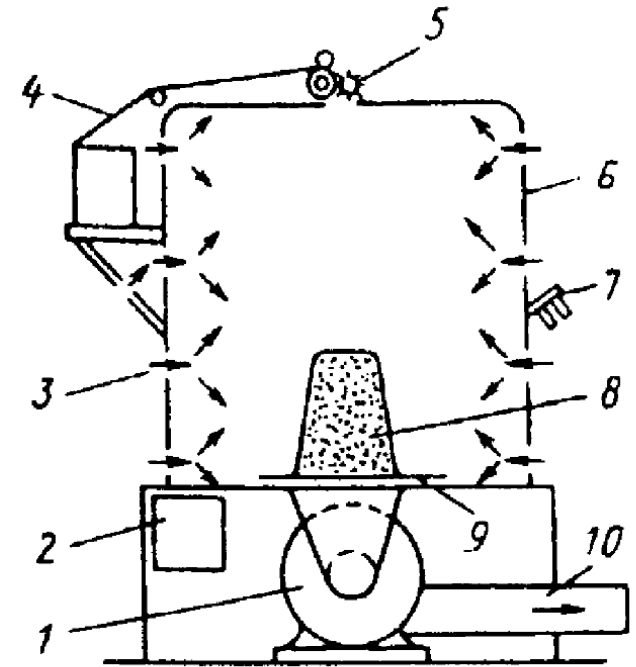


Схема получения заготовок методом приточного насасывания:

1 – вытяжной вентилятор; 2 – пульт управления; 3 – регулируемые отверстия; 4 – ровинг; 5 – резательная машина для ровинга; 6 – приточная камера; 7 – распылитель связующего; 8 – сетка; 9 – поворотный стол; 10 – выпуск воздуха



Приточное насасывание



Процесс приточного насасывания может быть механизирован путем использования двух сеток, одна из которых поступает непосредственно в печь, в то время как другая возвращается в приточную камеру.

Сетки для заготовок делают из прочной проволоки или из металла, 40 % поверхности которого перфорировано. На сетку наносят антиадгезив в виде эмульсии политетрафторэтилена, полиэтилена или кремнийорганического соединения.



Этот процесс основан на подаче рубленого волокна потоком воздуха, который направляется оператором на перфорированную сетку заготовки, при этом связующее распыляется одновременно с волокном.

Поэтому данный вид формования на производстве называют шланговым способом. Оператор управляет потоком компонентов материала заготовки в соответствии с конфигурацией сетки, обеспечивая отложение в нужных местах более тонкого слоя.

Сетка для заготовки обычно вращается для того, чтобы все поверхности попадали в сферу действия вентилятора. Резательное приспособление может автоматически отключаться после отложения на сетке необходимого количества стекловолокна.

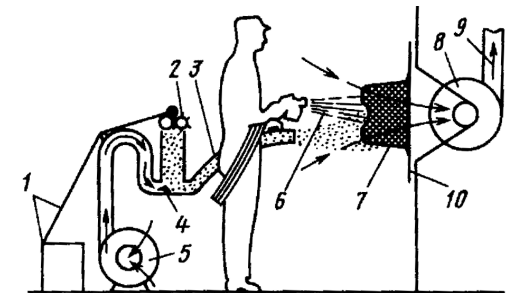


Схема получения заготовок распылением:
1 – ровинг; 2 – резательная машина для ровинга; 3 – гибкий шланг; 4 – турбулизатор потока воздуха; 5 – вентилятор; 6 – распыление связующего; 7 – сетка; 8 – вытяжной вентилятор; 9 – выпуск воздуха; 10 – поворотный стол

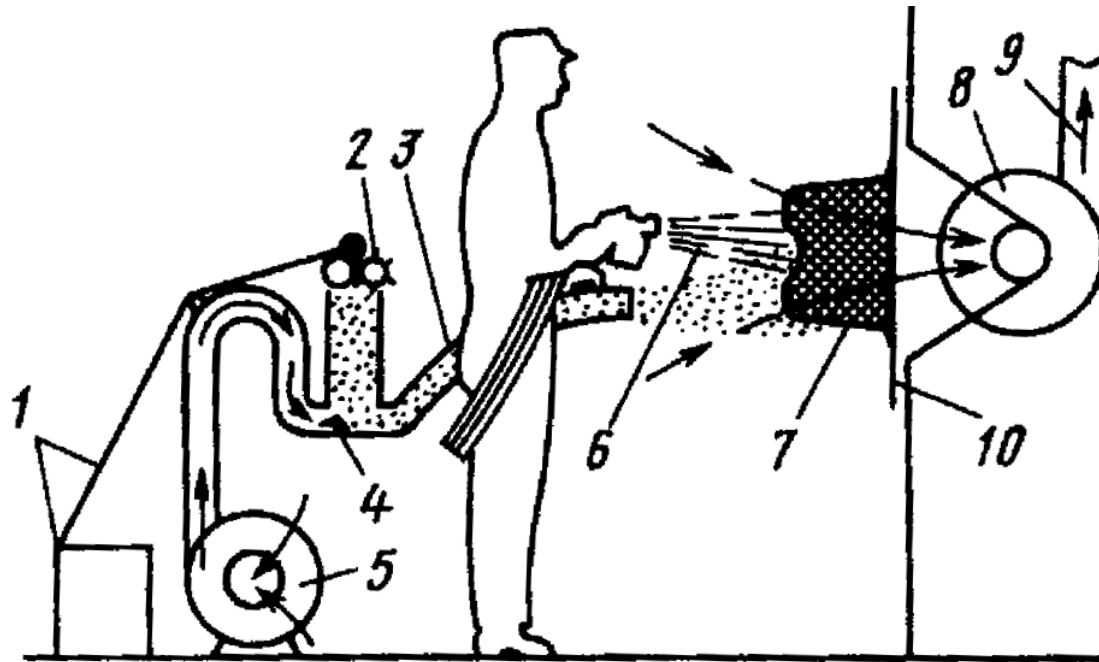


Схема получения заготовок распылением:

1 – ровинг; 2 – резательная машина для ровинга; 3 – гибкий шланг; 4 – турбулизатор потока воздуха; 5 – вентилятор; 6 – распыление связующего; 7 – сетка; 8 – вытяжной вентилятор; 9 – выпуск воздуха; 10 – поворотный стол



Распыление

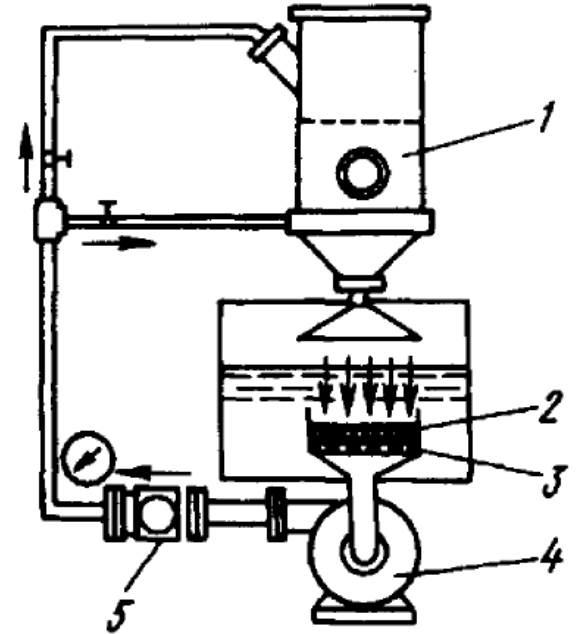


Скорость осаждения стекловолокна зависит от типа резательной машины, но обычно составляет 0,45 кг/мин. После прекращения подачи стекловолокна оператор продолжает напылять связующее, чтобы обеспечить полную пропитку стекловолокна смолой. Процесс может быть приостановлен для укладки дополнительных слоев мата в местах утолщений изделия, а затем опять возобновлен для напыления оставшегося количества рубленого волокна. После этого заготовку с сеткой переносят в печь для удаления воды из эмульсии и отверждения смолы.

Преимущество этого процесса заключается в том, что оператор может обеспечить требуемую толщину заготовок, размер которых не ограничен. К недостаткам следует отнести потери волокна при всасывании в форму и загрязненность рабочего места. Кроме того, для успешного выполнения этого процесса требуется квалифицированный оператор.

Процесс жидкостного насасывания предусматривает использование водных или органических (трансформаторное масло) суспензий, коротких волокон, нитевидных кристаллов, которые фильтруются через сетчатую форму и осаждаются на ней. Схема процесса показана на рисунке

В этой установке смоченное в суспензии (пульпе) волокно попадает на сетчатую форму, которая работает как фильтр. Центробежный насос, расположенный под камерой, откачивает из нее очищенную пульпу в смесительную камеру аппарата непрерывного приготовления пульпы. Когда на форме образуется достаточный слой материала, она поднимается из камеры и высушивается горячим воздухом. Перед прессованием заготовка смачивается связующим и окончательно пропитывается в процессе прессования в форме.



Принципиальная схема установки для получения заготовок методом жидкостного насасывания:

1 – аппарат непрерывного приготовления пульпы; 2 – слой осажденных кристаллов; 3 – сетчатая форма; 4 – центробежный насос; 5 – расходомер



Жидкостное насасывание



К недостаткам этого метода можно отнести низкую скорость фильтрации, повысить которую при жидкостном насасывании очень трудно вследствие низкой проницаемости получаемых волокнистых осадков, что объясняется повышенной сжимаемостью некоторых типов волокон и кристаллов, когда при возрастании градиента давления одновременно возрастает плотность осадка, что в свою очередь еще больше уменьшает пористость и проницаемость мата.

Ввиду указанных обстоятельств метод жидкостного насасывания, осуществляемый путем жидкостной фильтрации пульпы, имеет естественные ограничения, поэтому при переработке нитевидных кристаллов малых диаметров и некоторых типов волокон этот метод может быть рекомендован лишь для получения тонких матов.



12.4. Центробежная фильтрация



Формование заготовок происходит как за счет осаждения волокон при фильтрации пульпы, так и за счет осаждения под действием центробежных сил. Осаждение волокон при центробежном способе осуществляется на внутренней поверхности вращающегося формообразующего барабана

При этом фильтрация идет под действием столба жидкости. Благодаря воздействию центробежных сил осаждение волокон многократно ускоряется. Поэтому данный метод имеет высокую производительность и может быть рекомендован для получения матов с максимальной толщиной примерно 20...30 мм, а также для получения заготовок, имеющих форму тел вращения.

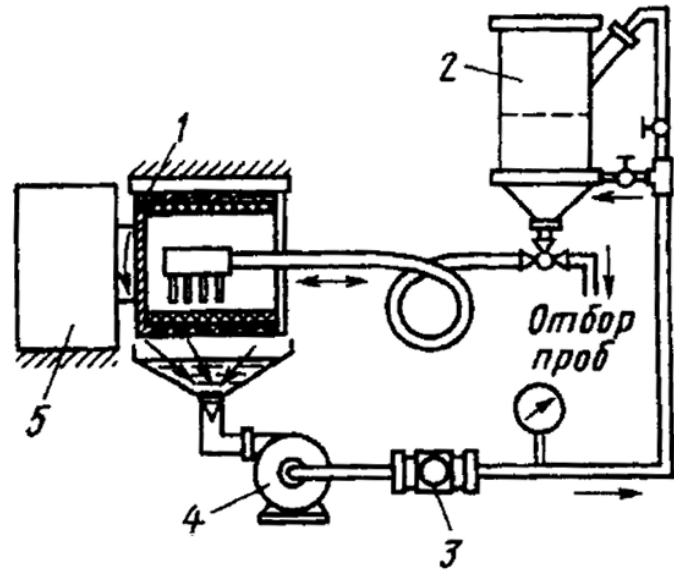


Схема установки для получения матов из нитевидных кристаллов методом центробежной фильтрации:

1 – центробежная камера; 2 – аппарат непрерывного приготовления пульпы; 3 – расходомер; 4 – центробежный насос; 5 – привод вращения барабана

Другим достоинством метода является возможность при получении заготовок одновременно осуществлять их пропитку полимерными связующими, обладающими высокой вязкостью. Кроме того, при подаче пульпы, приготовленной из высоковязкой жидкости, через специально спрофилированный трубчатый мундштук удастся получить мат с преимущественной ориентацией волокон в окружном направлении.



12.5. Отлив пульпы



Отличие этого метода от предыдущего состоит в применении вакуумного отсоса.

Схема установки для исследования технологического процесса получения полуфабрикатов и заготовок деталей из нитевидных кристаллов путем отлива пульпы одновременным вакуумным отсосом рабочей жидкости представлена на рисунке ниже. Указанным методом можно получить широкую номенклатуру заготовок деталей и полуфабрикатов, например могут быть изготовлены как плоские детали сложной конфигурации с переменной толщиной, так и оболочковые детали типа тел вращения (цилиндр, конус и т.п.).

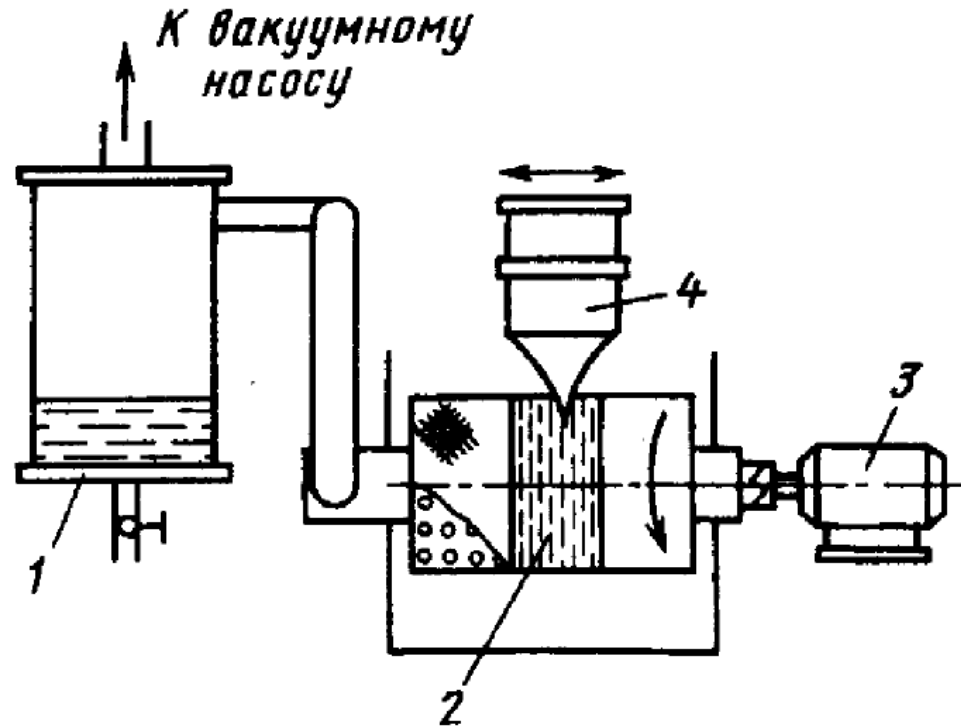


Схема установки для получения матов из нитевидных кристаллов при отливе пульпы с одновременным вакуумным обезвоживанием:

1 – отстойник; 2 – барабан для формования матов; 3 – привод барабана; 4 – бункер-дозатор подачи пульпы



Отлив пульпы



По мере роста слоя волокон и увеличения разряжения под фильтром процесс отсоса жидкости начинает осуществляться преимущественно за счет ее интенсивного испарения из прилегающих к фильтру наиболее плотных слоев волокнистого осадка. Последнее обстоятельство обеспечивает довольно высокую производительность метода фильтрации с использованием вакуумного отсоса даже и при очень низкой проницаемости получаемых осадков.

Одно из важных преимуществ данного метода - возможность получения ориентированных структур.



Заключение



В этой лекции мы рассмотрели основные технологические особенности следующих методов изготовления изделий из ПКМ:

Контактное формование:

- ручная выкладка;
- напыление;
- автоматизированная выкладка.

Формование с эластичной диафрагмой:

- вакуумный метод;
- вакуумно-автоклавное формование;
- вакуумно-пресс-камерное формование.

Формообразование давлением:

- пропитка под давлением;
- пропитка в вакууме (метод нагнетания).

Формообразование прессованием в формах:

- прямое прессование
- литьевое прессование
- термокомпрессионное прессование



Метод литья под давлением

Формообразование намоткой:

- прямая (окружная) намотка;
- спирально-винтовая намотка;
- спирально-перекрестная намотка;
- совмещенная спирально-кольцевая намотка;
- продольно-поперечная намотка;
- косослойная продольно-поперечная намотка;
- планарная (полюсная, орбитальная, плоскостная) намотка;
- тетрамотка;
- зональная намотка.

Формообразование пултрузией

Реакционное формование



Метод раздува:

- экструзионно-раздувное формование;
- инжекционное формование с раздувом;
- формование с раздувом и вытяжкой.

Метод ротационного формования

Метод экструзии

Метод литья без давления

Технологии предварительного формования заготовок, деталей и матов:

- приточное насасывание;
- распыление;
- жидкостное насасывание;
- центробежная фильтрация;
- отлив пульпы.



Выводы



В результате изучения лекции Вы узнали:

- об основных этапах создания конструкций из композитов и роли технологии в этом процессе;
- сущность технологических процессов изготовления конструкций из ПКМ;
- преимущества и недостатки каждого технологического процесса и их предельные возможности;
- о способах выбора технологических процессов для изготовления конструкций из ТКМ.



Контактная информация



E-mail: kartashov@bmstu.ru
Рабочий телефон : 18-09
Мобильный телефон: +7(926)275-0886

Спасибо за внимание!