


МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт *Политехнический*
Кафедра «Электро- и нанотехнологии»

Утверждено на заседании кафедры
«Электро- и нанотехнологии»
«11» января 2023 г., протокол №4

И.о. заведующего кафедрой
 И.В. Гнидина

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению лабораторных работ
по дисциплине
«Технология и методы обработки полимерных материалов»

**основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы магистратуры**

по направлению подготовки
18.04.01 Химическая технология

с направленностью (профилем)

Технология органического синтеза

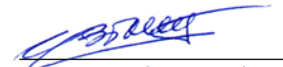
Формы обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 180401-01-23

Тула 2023 год

Разработчик методических указаний

Гнидина И.В., доцент, канд.техн.наук, доцент
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)


(подпись)

Лабораторная работа № 1
**Изучение технологий изготовления изделий из
полимерных материалов и композитов на их основе**

1. Цель работы.

Ознакомиться с технологическими процессами изготовления изделий из композиционных материалов (КМ), получить навыки работы на современном оборудовании.

2. Теоретические положения.

2.1. Основные понятия и определения

Композиционные материалы – объёмное монолитное искусственное сочетание разнородных по форме и свойствам двух и более материалов (компонентов), с чёткой границей раздела, использующее преимущества каждого из компонентов и проявляющее новые свойства, обусловленные граничными процессами.

Таким образом, к композиционным относятся материалы, обладающие следующей совокупностью признаков:

- не встречаются в природе, поскольку созданы человеком;
- состоят из двух или более компонентов, различающихся по своему химическому составу и разделённых выраженной границей;
- имеют новые свойства, отличающиеся от свойств составляющих их компонентов;
- неоднородны в микромасштабе и однородны в макромасштабе;
- состав, форма и распределение компонентов «запроектированы» заранее;
- свойства определяются каждым из компонентов, которые должны быть в материале в достаточно больших количествах (больше некоторого критического содержания).

Исходя из данного выше определения, композиционные материалы представляют собой основу из одного материала, в которую добавлен другой материал в виде волокон различной длины, слоёв, диспергированных частиц. Компонент, непрерывный во всем объёме КМ, называется матрицей; прерывистый, разъединённый в объёме композиции – наполнителем. Между матрицей и наполнителем существует четкая граница раздела – межфазная граница, имеющая свойства, отличные от свойств матрицы и наполнителя (рис. 1).

Путём подбора состава и свойств наполнителя и матрицы, их соотношения, ориентации наполнителя можно получить материал с требуемым сочетанием эксплуатационных и технологических характеристик. Кроме этого, на свойства композиционного материала в значительной степени влияют условия и методы его получения (температура, давление и другие воздействия).

Матрицами в композиционных материалах являются металлы, полимеры, цементы и керамика. В качестве наполнителей используются самые разнообразные искусственные и природные вещества в различных формах (крупноразмерные, листовые, волокнистые, дисперсные, мелкодисперсные, микродисперсные, наночастицы).

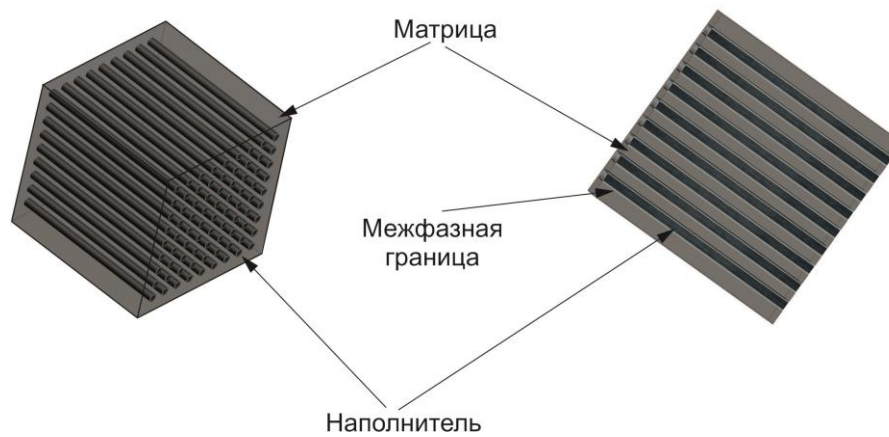


Рис. 1. Основные компоненты композиционных материалов

В настоящее время применяются также многокомпонентные композиционные материалы: полиматричные, когда в одном композиционном материале сочетаются несколько матриц; гибридные, включающие несколько разных наполнителей, каждый из которых играет свою роль.

Использование в одном материале нескольких матриц или наполнителей различной природы значительно расширяет возможности регулирования свойств композиционных материалов. Наполнитель, как правило, определяет прочность, жёсткость и деформируемость композита, а матрица обеспечивает его монолитность, передачу напряжений и стойкость к различным внешним воздействиям.

2.2. Классификация композиционных материалов

Для того чтобы систематизировать КМ по различным признакам, грамотно реализовать процедуру выбора КМ для изготовления различных деталей, упорядочить терминологию в области материаловедения композитов, необходима обоснованная классификация этих материалов.

Единой общепринятой классификации композиционных материалов нет. Это объясняется тем, что КМ представляют самый широкий класс материалов, объединяющий металлы, полимеры и керамику.

На рис. 2 представлена классификация композиционных материалов по различным классификационным признакам.



Рис. 2. Классификация композиционных материалов

Наиболее важным признаком классификации КМ является **материал матрицы** (материаловедческий принцип). КМ с металлической матрицей называют металлическими композиционными материалами (МКМ), с полимерной матрицей – полимерными композиционными материалами (ПКМ), с керамической – керамическими композиционными материалами (ККМ). КМ, содержащие два и более различных по составу матричных материала, называют полиматричными.

Название полимерных КМ обычно состоит из двух частей. В первой части называется материал наполнителя, во второй приводится слово «пластик». Например, полимерные композиты, армированные стекловолокном, называются стеклопластиками; металлическими волокнами – металлопластиками, органическими волокнами – органопластиками, борными волокнами – боропластиками, углеродными волокнами – углепластиками и т.д.

Для характеристики металлических КМ чаще используют двойное обозначение: вначале пишут материал матрицы, затем – материал волокна. Например, обозначение медь – вольфрам (Cu – W) соответствует композиционному материалу, в котором матрицей является медь, а волокнами – вольфрам.

Для керамических КМ характерно такое же обозначение, как и для металлических: например, обозначение «оксид алюминия – молибден» соответствует композиционному материалу с матрицей из Al_2O_3 и молибденовыми волокнами.

В некоторых случаях для обозначения КМ используется одно сложное слово, например бороалюминий или углеалюминий. В этом случае первая часть слова соответствует материалу волокна, а вторая – материалу матрицы.

С точки зрения **геометрии наполнителя** различают:

- порошковые или дисперсно-упрочненные КМ, где в качестве наполнителя используются порошки или гранулы;
- волокнистые КМ, армированные непрерывными и дискретными волокнами;
- слоистые КМ, состоящие из чередующихся непрерывных и дискретных пластин.

По структуре и расположению компонентов КМ делятся на группы с матричной, слоистой, каркасной и комбинированной структурой. Матричную структуру имеют порошковые и волокнистые КМ. К материалам со слоистой структурой относятся

материалы, полученные из набора чередующихся слоев фольги или листов материалов различной природы и состава. К композиционным материалам с каркасной структурой относятся материалы, полученные методом пропитки. Комбинированную структуру имеют материалы, содержащие комбинации первых трех групп.

КМ с матричной структурой делятся на хаотично-армированные и упорядоченно-армированные (рис. 3).

Хаотично-армированные КМ содержат армирующие элементы в виде дисперсных включений, дискретных или непрерывных волокон. Эти материалы являются изотропными или квазиизотропными. Термин «квазиизотропный» означает, что КМ является анизотропным в микрообъеме, но изотропным в объеме всего изделия.

Упорядоченно-армированные КМ подразделяются на однонаправленные, т. е. одноосно армированные, двухосноармированные (с расположением наполнителя в плоскости) и трехосноармированные (с объемным расположением наполнителя).

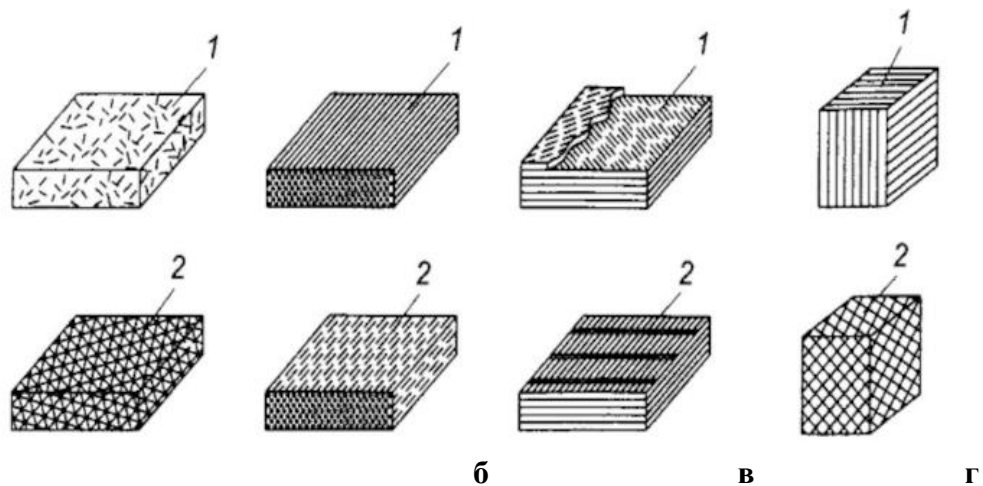


Рис. 3. Классификация композиционных материалов по конструкционному признаку: хаотично- (а); одномерно- (б); двумерно- (в) и пространственно-армированные (г); (1, 2 – различная степень дисперсности наполнителя)

По ориентации и типу наполнителя (конструкционный принцип) все КМ можно разделить на две группы – изотропные и анизотропные. Изотропными называют материалы, которые имеют одинаковые свойства во всех направлениях. Свойства анизотропных материалов зависят от направления в исследуемом объекте.

В зависимости от метода получения (технологический принцип) КМ делятся на материалы, полученные жидкофазными и твердофазными методами, а также методами осаждения–напыления, комбинированными методами.

К жидкофазным методам относятся пропитка (пропитка арматуры полимерами или расплавленными металлами) и направленная кристаллизация сплавов.

К твердофазным методам получения КМ относятся прокатка, экструзия, ковка, штамповка, уплотнение взрывом, диффузионная сварка, волочение и др. Композиционные материалы, получаемые твердофазными методами, используются в виде порошка или тонких листов.

При получении КМ методами осаждения–напыления матрица наносится на волокна из растворов солей или других соединений, из парогазовой фазы, из плазмы и т.п.

Комбинированные методы заключаются в последовательном или параллельном применении нескольких методов.

По назначению (эксплуатационный принцип) КМ делятся на общеконструкционного назначения (несущие конструкции судов, самолетов, автомобилей и др.), жаропрочные материалы (лопатки турбин самолетов, камеры сгорания), термостойкие материалы (изделия, работающие в условиях частых теплосмен), фрикционные материалы (тормозные колодки), антифрикционные материалы (подшипники скольжения), ударопрочные материалы (броня самолетов, танков), теплозащитные материалы, материалы со специальными свойствами (магнитными, электрическими) и др. Данная классификация весьма условна, поскольку часто композиты являются многофункциональными материалами.

2.3. Производство композиционных материалов и изделий из них

Важнейшей особенностью производства современных КМ является то, что композит и технология его изготовления разрабатываются для использования в конкретной конструкции. Поэтому производство самого композита и изделия из него представляет собой единую задачу, состоящую из следующих этапов:

- разработка конструкции изделия и требований к нему, исходя из условий эксплуатации;
- создание композиционного материала для его изготовления (тип, состав, требуемые свойства);
- разработка технологического процесса получения изделия.

Можно сказать, что композиционный материал и изделие из него в ряде случаев формируются одновременно непосредственно в технологическом процессе.

Учитывая отмеченное, вопросы разработки новых композиционных материалов и их технологической переработки следует рассматривать совместно и учитывать при этом назначение изделия, его форму, габариты, условия эксплуатации.

В общем случае технология производства изделий из полимерных композиционных материалов включает в себя следующие операции:

- подготовка армирующего наполнителя;
- приготовление полимерного связующего;
- совмещение матрицы с армирующим наполнителем;
- формообразование детали;
- отверждение связующего;
- механическая доводка детали (при необходимости);
- контроль качества детали.

В настоящее время разработано большое количество методов изготовления изделий из полимерных композиционных материалов, которые условно можно разделить на три группы (рис. 4):

– методы переработки полимеров, находящихся в вязкотекучем (пластицированном) состоянии, основанные на одновременном воздействии на материал температуры и давления. К данной группе относятся: литье под давлением, экструзия и соэкструзия, прессование, каландрование;

– методы переработки полимеров, находящихся в размягченном (высокоэластическом) состоянии, основанные на деформации нагретого материала. К данной группе относятся: горячая штамповка, раздувное формование, пневмо- и вакуумформование;

– методы переработки полимеров, находящихся в твердом (стеклообразном или кристаллическом) состоянии, основанные на способности материала проявлять вынужденную эластичность под действием давления. К данной группе относятся: штамповка, прокатка, протяжка (пултрузия).

Особо следует остановиться на развивающихся в последнее время технологиях 3D-печати, при которых изделие создается путем послойного нанесения материала. Трехмерный объект, который создается с использованием технологии 3D-печати, сначала моделируется с помощью системы автоматизированного проектирования, затем файл модели экспортируется в программное обеспечение для послойного разбиения и загружается на 3D-принтер.



Рис. 4. Методы изготовления изделий из полимерных композиционных материалов

В настоящее время изделия из КМ с помощью 3D-печати изготавливаются селективным лазерным спеканием (SLS) и методом послойного нанесения расплавленной полимерной нити (FDM, FFF).

SLS представляет собой процесс, в котором за счет тепловой энергии лазерного или электронного луча происходит избирательное послойное сплавление областей порошка для создания твердой структуры. В технологии FDM для печати используется нить, загружаемая в систему печати, как правило, через двигатель механизма подачи. Нить нагревается до полужидкого состояния и выдавливается через сопло. Печать осуществляется послойно до полного формирования объекта.

Фактически методы 3D-печати являются разновидностью методов первой группы с применением автоматизированного проектирования.

Выбор метода изготовления композиционного материала и изделия из него зависит от множества факторов, в том числе формы и габаритов изделия, серийностью выпуска, производительностью технологического процесса, физическими параметрами процесса, требованиями, предъявляемыми к изделию (прочность, точность и др.).

3. Объекты и средства исследования

Объектом исследований являются процессы изготовления изделий из композиционных материалов с использованием оборудования, имеющегося на кафедре ЭиНТ.

4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с методическими указаниями.
2. Ознакомиться с оборудованием, предназначенным для изготовления изделий из КМ (экструдерами, термопластавтоматами, прессами, установкой для вакуумной инфузии, 3D-принтерами, установкой для намотки). Изучить основные принципы их работы.
3. Для заданного преподавателем изделия с использованием справочной литературы [1-5] подобрать состав композиционного материала (наполнитель, связующее, их соотношение) и предложить технологию изготовления изделия из данного материала с использованием оборудования, имеющегося на кафедре ЭиНТ.
4. Сделать выводы.
5. Оформить отчет по лабораторной работе.

5. Контрольные вопросы

1. Что называется, композиционным материалом?
2. Где применяют композиционные материалы?
3. Какие вы знаете наполнители для композиционных материалов?
4. Как классифицируются композиционные материалы по типу матрицы?
5. От чего зависит выбор метода изготовления изделия из композиционного материала?

6. Список литературы

1. Бондалетова Л.И. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учебное пособие / Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.
2. Полимерные композиционные материалы : учебное пособие. Часть 2 / сост. Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – 130 с.

3. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин и др.; под ред. А.А. Берлина. - - СПб.: Профессия, 2088. – 560 с., ил.

4. Холодников Ю. В. Способы изготовления изделий из композитов //Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – №. 6-2. – С. 214-221.

5. Композиционные материалы : справочник / В. В. Васильев [и др.] ; под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарновского ; редколл. Н. А. Алфутов [и др.] . — Москва : Машиностроение, 1990. — 512 с. : ил. — ISBN 5-217-01113-0.

Лабораторная работа № 2

Изучение процесса подготовки наполнителей для композиционного материала

1. Цель работы.

Изучение процесса подготовки наполнителей для композиционных материалов на примере непрерывного стеклянного ровинга. Ознакомление и получение навыков работы на оборудовании для переработки волокна. Получение знаний о технологическом процессе подготовки наполнителей для композитных составов.

2. Теоретические положения.

2.1. Основные понятия и определения

Наполнители композиционных материалов – твердые, жидкие и газообразные органические и неорганические вещества, которые распределяются в непрерывной фазе (матрице) с образованием гетерофазной системы с выраженной границей раздела фаз.

Наполнители наряду со связующим являются важнейшим элементом структуры КМ. Как уже отмечалось, функции наполнителя в КМ весьма разнообразны - от формирования комплекса механических свойств до придания материалу разнообразных специфических свойств, таких как фрикционные, электрические, магнитные и т.п. Поэтому в качестве наполнителей в КМ выступают самые разнообразные вещества и материалы, содержание которых также может меняться в очень широких пределах.

В зависимости от химического строения, формы и размеров частиц, а также их агрегатного состояния существует ряд подходов к классификации наполнителей (рис. 1). По своей природе наполнители могут подразделяться на органические и неорганические; по агрегатному состоянию - на твердые, жидкие и газообразные; по их роли в КМ – на усиливающие дисперсные и армирующие; по форме частиц – на дисперсные, зернистые, волокнистые и слоистые. Последняя классификация представляется наиболее рациональной и является наиболее часто употребляемой.

Представляется целесообразным разделить наполнители на две группы по основным функциям, которые они несут в каждом конкретном материале.

Первая группа – собственно наполнители, как правило, в виде частиц ограниченных размеров, введение которых определяет общий комплекс свойств КМ, способствует снижению усадки, остаточных напряжений и склонности к растрескиванию.

Вторая группа – это наполнители, оказывающие решающее влияние на прочностные характеристики КМ, которые называются *армирующими элементами*. Армирующие элементы – это, как правило, волокнистые материалы достаточно больших линейных размеров, воспринимающие основную нагрузку, действующую на материал.

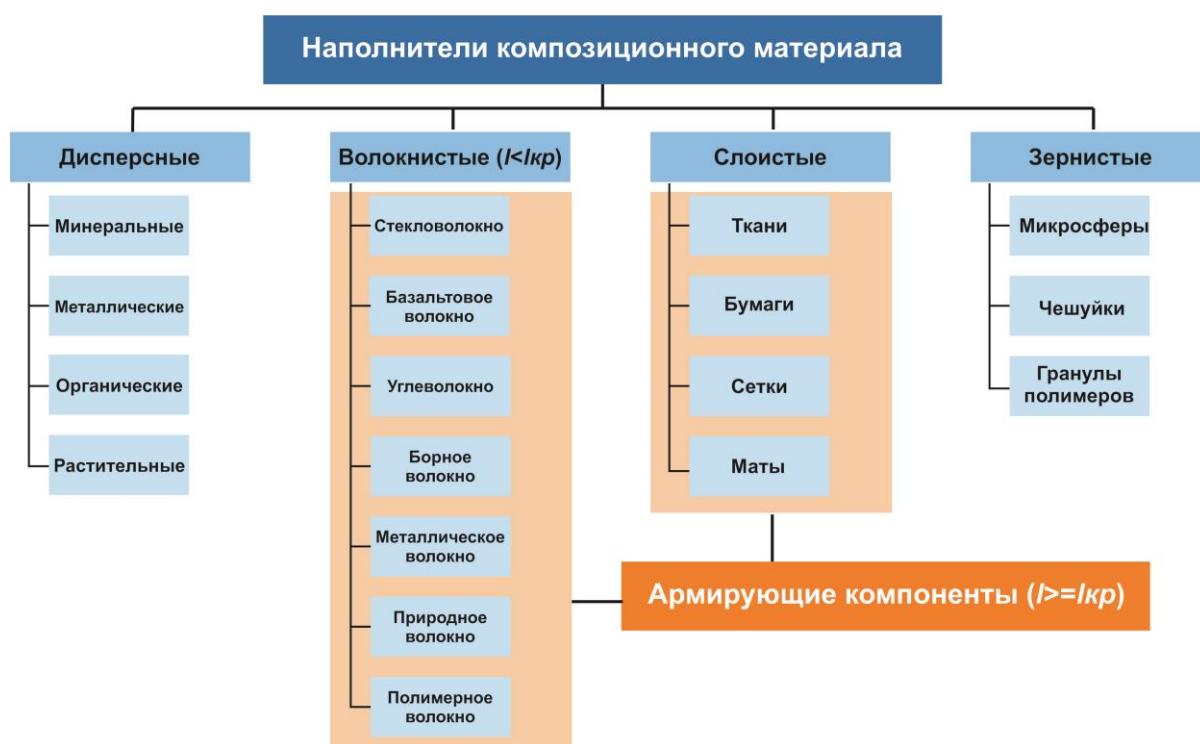


Рис. 1. Классификация наполнителей композиционных материалов

Волокнистые наполнители занимают второе место после дисперсных по объему использования среди всех наполнителей. Первые материалы на их основе были получены в начале XX в. На первых порах в качестве волокнистых наполнителей использовались природные волокна растительного (хлопок, лен, конопля) и минерального (асбест) происхождения. Однако с середины XX в. первенство среди волокнистых наполнителей прочно перешло к стекловолкну.

Стеклоанное волокно получают вытяжкой из однородной стекловидной массы, представляющей собой сплав диоксида кремния SiO_2 с оксидами различных металлов. В зависимости от входящих в состав стекла оксидов и их содержания существует несколько типов стекол, существенно отличающихся по свойствам и областям применения. Существуют 2 основных вида волокон – *непрерывное*, получаемое путем вытяжки нитей расплава с высокой скоростью, и *штапельное* (короткие обрезки), получаемое путем раздува нитей расплава струей воздуха или пара.

В первом случае элементарные волокна собираются в первичную нить, обрабатываются замасливателем и наматываются на бобину. Во втором случае раздуваемые волокна собираются на движущуюся подложку и после ориентации и уплотнения из них формируется первичная нить, сматываемая на бобину. Непрерывное волокно имеет диаметр от 3 до 25 мкм, штапельное волокно имеет диаметр 7-13 мкм при длине прядей 125-380 мм.

Преимуществом использования стеклянных волокон в качестве наполнителя является:

- низкая стоимость;
- химическая инертность
- высокая водостойкость
- низкая теплопроводность;

- высокий предел прочности при растяжении;
- низкий коэффициент теплового расширения.

Основным недостатком стеклянных волокон, ограничивающим их применение для производства большой номенклатуры деталей машин, является:

- малое удлинение и, следовательно, хрупкость;
- нестойкость к истиранию;
- большая плотность 2500 кг/м^3 .

2.2. Типы стекловолокна

Существует много типов стекловолокна для специфического применения. Основной состав всех видов стеклопластика одинаков, за исключением нескольких видов сырья. Количество всех исходных материалов в каждом типе стекловолокна различно, что придает каждому типу уникальный набор свойств.

Основное сырье, которое используется в производстве стекловолокна, включает кварцевый песок, кальцинированную соду и известняк. Другие ингредиенты включают буру, кальцинированный глинозем, Магнезит, каолиновую глину, полевои шпат и т. д. Кварцевый песок - это стеклообразователь, а кальцинированная сода и известняк снижают температуру плавления. Другие ингредиенты способствуют улучшению различных свойств. Например, бура повышает химическую стойкость.

К основным типам стекловолокна относятся:

А-Стекловолокно (A-glass), также известное как щелочное стекло или содово-известковое стекло. Это наиболее часто доступный тип стекловолокна. Около 90% стекла - это щелочное стекло. Это самый распространенный тип, который используется при производстве стеклянной тары, такой как банки и бутылки для пищевых продуктов и напитков, а также оконные стекла. Натриево-известковое стекло химически устойчиво, относительно недорого, чрезвычайно обрабатываемо и довольно твердо. Его можно многократно переплавлять и размягчать, поэтому стеклопластик типа А-стекло является идеальным типом стекла для вторичной переработки.

С-стекло или химическое стекло показывает самую высокую устойчивость к химическому воздействию. Оно обеспечивает структурное равновесие в агрессивных средах. Это свойство обусловлено наличием большого количества боросиликата кальция. Значение pH химических веществ, которые используются при изготовлении стеклопластика типа А-стекло, обеспечивает достаточно высокую стойкость стеклопластика этого типа независимо от окружающей среды (кислой или щелочной). С-стекло используется в наружном слое ламината в виде поверхностной ткани для труб и резервуаров, которые удерживают воду и химикаты.

Д-стекло - это тип стекловолокна, который известен своей низкой диэлектрической проницаемостью, что связано с присутствием в его составе триоксида бора. Благодаря этой характеристике D-glass является идеальным типом стекловолокна для использования в оптических кабелях. Д-стекло также содержит боросиликат, который придает этому типу стекловолокна чрезвычайно низкий коэффициент теплового расширения. Благодаря этим свойствам Д-стекло часто используется в электроприборах и кухонной посуде.

Электронное Е-стекловолокно более известно как электрическое стекло. Это легкий композитный материал, который используется в аэрокосмической, морской и других видах промышленности. Стеклоткань E-glass - это отраслевой стандарт, обеспечивающий баланс между производительностью и стоимостью, что делает его наиболее часто используемым. Е-стекло изначально использовалось электрической отрасли, но сейчас оно используется во многих отраслях. Это привело к производству стеклопластика в сочетании с термореактивными смолами. Листы и панели из стеклопластика достаточно широко используются практически во всех промышленных зонах. Он защищает структурную целостность от любого механического воздействия.

Стекло Advantex - это новый промышленный стандарт, который сочетает в себе механические и электрические свойства электронного стекла с кислотной коррозионной стойкостью стекловолокна типа ECR. Этот тип стеклопластика соответствует стандартам кислотной коррозионной стойкости стекла ECR по стоимости, которая аналогична E-glass. Стеклоткань Advantex имеет более высокую температуру плавления, что дает возможность ее использования при больших тепловых колебаниях. Стекловолокно Advantex содержит оксид кальция в больших количествах, как и стекловолокно ECR. Он используется в тех случаях, когда конструкции более подвержены коррозии. Кроме того, этот тип стекловолокна широко используется в нефтяной, газовой и горнодобывающей промышленности, на электростанциях и в судостроении (канализационные системы и системы канализации).

Стекловолокно ECR также называют электронным стекловолокном. Он обладает высокой механической прочностью, хорошей гидроизоляцией, а также устойчивостью к щелочной и кислотной коррозии. Самое большое преимущество ECR glass перед другими видами стекловолокна заключается в том, что его способ изготовления является экологически чистым. Стекло ECR имеет более высокую термостойкость, лучшие механические свойства, более низкую электрическую утечку, лучшую гидроизоляцию и более высокое поверхностное сопротивление по сравнению с электронным стеклом. ECR-волокно используется при изготовлении прозрачных стеклопластиковых панелей. Он изготовлен из алюмосиликатов кальция, которые обеспечивают его прочность, стойкость к кислотной коррозии и электропроводность, что делает его пригодным для применения там, где эти свойства необходимы. Срок службы ECR-стекла более длительный. Это более прочный тип стекловолокна из-за его превосходной стойкости к воде, кислоте и щелочам.

AR-стекло или щелочестойкое стекло было разработано специально для использования в бетоне. Его состав был разработан специально с цирконием на оптимальном уровне. Добавление циркония - это то, что делает этот тип стекловолокна пригодным для использования в бетоне. AR-стекло предотвращает растрескивание бетона, обеспечивая прочность и гибкость. AR-стекло трудно растворить в воде, и на него не влияют изменения pH. Кроме того, его можно легко добавлять в бетонные и стальные смеси. AR-стекловолокно используется в различных материалах для армирования бетона и строительных растворов. Он обладает высоким модулем упругости и прочностью на растяжение. Более того, в отличие от Стали, оно не ржавеет.

R-Glass, S-Glass и T-glass являются торговыми названиями для одного и того же типа стекловолокна. Они имеют большую прочность на растяжение и модуль по сравнению с волокнами из E-стекла. Смачивающие свойства и кислотная прочность этого типа стекловолокна также выше. Эти свойства получены путем уменьшения диаметра нити. Этот тип стекловолокна разрабатывается для оборонной и аэрокосмической промышленности. Он также используется при создании жесткой баллистической брони. Объем производства этого вида стеклопластика ниже, а значит, и его себестоимость относительно выше. Объем производства невелик, поскольку этот тип стеклопластика является высокоэффективным и используется только в определенных отраслях промышленности.

S2-стекловолокно - это самый высокоэффективный тип стекловолокна, который доступен. S2-стекло имеет более высокий уровень кремнезема в своем составе по сравнению с другими видами стекловолокна. В результате он обладает улучшенными свойствами, лучшими весовыми характеристиками, высокой термостойкостью, высокой прочностью на сжатие и улучшенной ударопрочностью. Прежде всего, S2-glass более экономичен. Прочность на растяжение S2-стекла примерно на 85% больше, чем у обычного стекловолокна. Это обеспечивает стабильную высокую производительность и долговечность. Он обладает лучшей прочностью волокон и модулем сопротивления, что обеспечивает улучшенные ударные характеристики готовых деталей, а также более высокую устойчивость к повреждениям и долговечность композита. Он обеспечивает примерно на 25% большую линейную упругую Жесткость и демонстрирует отличную устойчивость к повреждениям. S2-стекловолокно в основном используется в композитной и текстильной промышленности благодаря своим физическим свойствам, которые лучше, чем у обычных видов стекловолокна.

M-стекловолокно имеет в своем составе бериллий. Этот элемент придает стеклопластику дополнительную эластичность.

Z-стекло применяется во многих отраслях промышленности, в том числе в арматурной промышленности бетона, в которой оно используется для создания изделий, которые выглядят прозрачными. Он также используется для создания волокон 3D-принтера. С высоким сопротивлением механических, ультрафиолетовых, кислоты, щелочи, соли, царапин, износостойкости и температуры, волокно Z-стекла один из самых прочных и самых надежных типов стеклоткани.

2.3. Применение стекловолокна в композиционных материалах

Стекловолокно является сырьем для производства различных продуктов — стеклонитей, ровингов и рубленого волокна, из которых впоследствии изготавливаются разные материалы строительного, электроизоляционного, производственного и конструкционного назначения.

Из непрерывных стекловолокнистых нитей получают:

- стеклоткани, которые производятся таким же ткацким методом, что и обычное полотно - переплетением продольных и поперечных нитей между собой. В зависимости от вида переплетения - сатинового, полотняного, шашечного или саржевого, плотности и извивистости пряжи ткани отличаются между собой свойствами и назначением. Стеклоткани

бывают электроизоляционные, строительные, конструкционные, кремнеземные и ровинговые.

- армированное стекловолокно и ленты, отличающиеся размером ячейки, видом и плотностью пропитки и предназначенные для дорожных или строительных наружных и внутренних отделочных работ;

- пластиковое стекловолокно - композиты с разнообразными свойствами, которые задаются изначально в зависимости от условий эксплуатации. Они позволяют производить изделия любой сложности и конфигурации и поэтому именно стекловолокна в сочетании с полимерами получили самое широкое применение и распространение в самых различных сферах нашей жизни.

Из штапельных стекловолокнистых нитей и рубленых волокон можно купить стекловолокно следующего назначения:

- утеплитель — стекловату и стекломаты;
- стеклохолсты различной толщины, стеклопластики;
- такое сырье используется и как компонент строительных растворов.



Рис. 2. Непрерывная стеклянная нить Рис.3. Штапельная стеклянная нить

2.4. Подготовка стекловолокна для использования в качестве наполнителя композиционном материале

Как правило, стекловолокно производится и поставляется в виде непрерывного волокна, намотанного на катушки – стекловолоконный ровинг (нить). Для наполнения композиционного материала стекловолокном его необходимо измельчить до необходимой фракции. Для этого используют различное оборудование, такое как рубочные машины барабанного типа (рис. 4) и шаровые мельницы (рис. 5).



Рис. 4. Рубочная машина барабанного типа



Рис. 5. Шаровая мельница

Для получения волокна длиной от 3мм и более используются рубочные машины барабанного типа. Длина волокна контролируется количеством лезвий в барабане, а производительность – скоростью подачи волокна. Технологические особенности данного оборудования не позволяют получить более короткие волокна.

Для дисперсно-наполненных композиционных материалов необходимы волокна с длиной порядка 100 мкм. Для получения такой длины волокон используют различные измельчители, в том числе шаровые мельницы. В таких мельницах размер получаемого волокна контролируется диаметром и количеством шариков, а также времени размола.

3. Объекты и средства исследования

Объектом исследования является процесс получения дисперсного наполнителя различного фракционного состава для последующего использования в композиционных материалах с полимерной матрицей.

4. Порядок выполнения работы

6. Ознакомиться с теоретическими положениями.
7. Ознакомиться с объектами и процессом изготовления армирующего наполнителя.
8. Произвести подготовку материала для дальнейшего размол.
9. Произвести размол материала в соответствие с параметрами, заданными преподавателем.
10. Произвести оценку геометрических характеристик полученного наполнителя с помощью лабораторного микроскопа БМИ-1Ц.
11. Определить влияние времени и объема загрузки на длину частиц наполнителя.
12. Сделать выводы.
13. Оформить отчет по лабораторной работе.

**Параметры получения дисперсного армирующего компонента
на основе _____ волокна**

Начальная длина волокна, мкм				
Масса шариков для размола, кг				
Масса загруженного волокна, г				
Время размола, мин				
Длина волокна, мкм				

5. Контрольные вопросы

1. Что называется армирующим компонентом?
2. Какие основные характеристики армирующего волокна?
3. Какие существуют виды волокна?
4. Какие вы знаете типы стекловолокон?
5. Основные параметры, влияющие на длину армирующего компонента.

6. Список литературы

1. Михайлин Ю.А Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. — СПб.: Профессия, 2006, 624 с.; 2012, 624 с.
2. Шевченко А.А. Физикохимия и механика композиционных материалов. — СПб.: Профессия, 2010. — 224 с.
3. Брызгалин Г. И. Проектирование деталей из композиционных материалов волоконной структуры. – М.: Машиностроение, 1982,- 84 с.
4. Тамуж В.П., Тетерс Г. А. Проблемы механики композитных материалов. //Механика композитных материалов, 1979, №1, - стр. 34-45.
5. Максимов Р. Д., Плуме Э. З. Упругость гибридного композитного материала на основе органических и борных волокон. //Механика композитных материалов, 1980, №3, - стр. 399-403.
6. Максимов Р. Д., Плуме Э. З., Понаморов В. М. Прочностные свойства однонаправленно армированных гибридных композитов. //Механика композитных материалов, 1984, №1, - стр. 35-41.

Лабораторная работа №3

Изучение свойств полимерных связующих для композиционных материалов

1. Цель работы

Целью работы является изучение свойств связующих, используемых для создания композиционного материала на примере определения одной из реологических характеристик термопластов – показателя текучести расплава, исследование влияния данной характеристики на выбор метода переработки полимера и на режим формирования изделий из термопластов.

2. Теоретические положения

2.1. Связующие для композиционных материалов

Композиционные материал представляют собой основу из одного материала, в которую добавлен другой материал в виде волокон различной длины, слоёв, диспергированных частиц. Компонент, непрерывный во всем объёме КМ, называется матрицей; прерывистый, разъединённый в объёме композиции – наполнителем.

Материалы, используемые в качестве наполнителей, как правило, имеют дисперсную структуру и не являются конструкционными материалами. Для того чтобы получить композиционный материал, частицы наполнителя (волокна, частицы, слои и т.д.) необходимо соединить друг с другом, обеспечить передачу усилий между ними, зафиксировать форму изделия и взаимное расположение армирующих компонентов, т.е. создать монолитную структуру композита. Для этого используются различные связующие. В качестве связующих применяются полимерные, металлические и керамические материалы (рис. 1). В полиматричных КМ сочетаются несколько матриц.

Физико-механические и технологические свойства связующих должны позволять получать конструкции прочные, легкие, мало-энергоёмкие, технологичные. При выборе связующего, помимо удовлетворения требованиям к прочностным, технологическим, адгезионным свойствам, необходимо обратить внимание на следующее: относительное удлинение матрицы при растяжении, сжатии, сдвиге должно быть не меньше относительного удлинения волокон. Иначе при действии внешней нагрузки разрушение в первую очередь начнется в связующем, высокая прочность армирующей компоненты не будет использована полностью, что существенно снизит несущую способность конструкции. Нужно стремиться к тому, чтобы коэффициенты теплового расширения связующего и волокна были близкими. Связующее должно обладать малой вязкостью и хорошей адгезионной способностью к армирующему материалу. Малая вязкость необходима для того, чтобы связующее могло проникнуть и склеить между собой частицы наполнителя и после отверждения получить монолитную структуру. Выбранный тип связующего должен обеспечить легкость и простоту технологического формования и заполнения формы при возможно более низких температурах и давлениях.

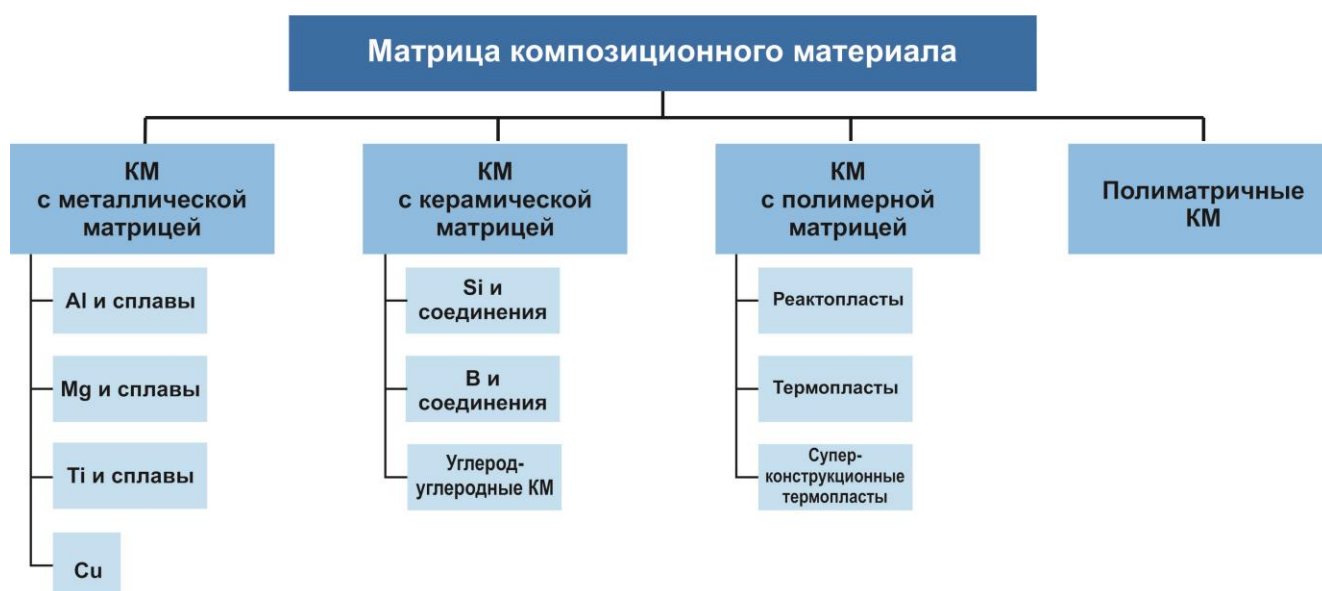


Рис. 1. Классификация композиционных материалов по виду матрицы

Композиционный материал, непрерывная фаза которого образована полимером, называют полимерным композиционным материалом (полимерным композитом, ПКМ). Именно КМ на основе полимерных матриц представляют тот класс новых материалов, который позволяет назвать настоящее время веком полимеров и композитов.

Все связующие, используемые при создании ПКМ, можно разделить на две группы: термореактивные (реактопласты) и термопластичные (термопласты).

Термопластичные полимеры (термопласты) – это полимеры, которые размягчаются при нагревании и затвердевают при охлаждении.

При обычной температуре термопласты находятся в твердом (стеклообразном или кристаллическом) состоянии. При повышении температуры они переходят в высокоэластическое и далее – в вязкотекучее состояние, что обеспечивает возможность формования их различными методами. Эти переходы обратимы и могут повторяться многократно, что делает возможной, в частности, переработку бытовых и производственных отходов в изделия.

Выбор термопласта определяется очень многими факторами: условиями эксплуатации изделия, технологическими свойствами полимера, стоимостью пластмассы, ее доступностью, способностью окрашиваться.

Свойства некоторых КМ на основе термопластичных связующих приведены в таблице 1.

Свойства ПКМ на основе термопластичных связующих

Назначение	Материалы	Свойства
Пластмассы общетехнического назначения	Полиэтилен	Плотность – 900...970 кг/м ³ ; Разрушающее напряжение при растяжении – 10...20 МПа; Разрушающее напряжение при изгибе – 15...40 МПа; Относительное удлинение – 70...700%.
	Полистирол	Плотность – 1000...1100 кг/м ³ ; Разрушающее напряжение при растяжении – 30...60 МПа; Разрушающее напряжение при изгибе – 50...100 МПа; Относительное удлинение – 1...3%.
	Полиметил-метакрилат	Плотность – 1100...1300 кг/м ³ ; Разрушающее напряжение при растяжении – 10...50 МПа; Разрушающее напряжение при изгибе – 100...120 МПа; Относительное удлинение – 50...250%.
Пластмассы инженерно-технического назначения	Полиамиды	Плотность – 1000...1200 кг/м ³ ; Разрушающее напряжение при растяжении – 50...120 МПа; Разрушающее напряжение при изгибе – 60...120 МПа; Относительное удлинение – 80...280%.
	Поликарбонат	Плотность – 1200...1400 кг/м ³ ; Разрушающее напряжение при растяжении – 50...70 МПа; Разрушающее напряжение при изгибе – 80...120 МПа; Относительное удлинение – 5...120%.
	Полиформальдегид	Плотность – 1400...1450 кг/м ³ ; Разрушающее напряжение при растяжении – 70...80 МПа; Разрушающее напряжение при изгибе – 100...120 МПа; Относительное удлинение – 15...50%.

Для большинства термопластов характерна более высокая производительность и более интенсивные методы переработки; формование деталей менее энергоемко; возможно формование крупных, сложной конфигурации деталей; возможна вторичная переработка; характерна практически бесконечная жизнеспособность препрегов (время между изготовлением и переработкой в изделие); пониженная горючесть, дымовыделение при горении и токсичность продуктов горения; высокая стойкость к излучению; сочетание высокой прочности и теплостойкости (полиэфирсульфон, полиэфиримид, полифениленсульфид) с высокой ударной прочностью и трещиностойкостью.

2.2. Свойства термопластов и их влияние на метод переработки

Выбор методов переработки полимеров и расчёт технологических параметров процесса изготовления изделий из КМ с термопластичной матрицей проводится с учётом

технологических свойств исходных материалов: текучести расплава, температуры текучести, плавления (кристаллизации), стеклования, влажности, усадки, таблетуемости, времени отверждения реактопластов, объёмных характеристик порошков и т.п. С учётом значений технологических характеристик разрабатывают новые методы переработки, технологическую оснастку и оборудование.

Одним из наиболее распространённых методов переработки является получение изделий из материалов, находящихся в момент формования в вязкотекучем состоянии. Поэтому знание реологических свойств материала является необходимым условием для разработки технологических процессов изготовления изделия из КМ.

Одной из важнейших технологических характеристик термопластов является текучесть расплава полимеров. Текучесть определяет способность полимеров к вязкому течению при взаимодействии внешних сил и численно равна обратной величине вязкости $1/\eta$; а также является реологической характеристикой расплава.

От величины текучести расплава зависит его способность заполнять все полости пресс-форм под действием приложенного давления. На основании данных о текучести полимерного материала определяют удельное давление при литье, прессовании или экструзии изделий.

Применяемое удельное давление обратно пропорционально текучести: чем выше текучесть, тем меньше должно быть удельное давление расплава, и наоборот. Очень низкая текучесть полимерного материала, как и слишком высокая, вызывает значительные трудности в его переработке.

Термопластичные материалы, обладающие низкой текучестью, плохо заполняют внутреннюю полость формы, в особенности сложного профиля, в результате чего изделия получаются плохо оформленными. Для повышения качества изделий приходится повышать давление впрыска в форму и усилие смыкания пресс-формы. Это приводит к усложнению литьевых машин, требует прочных, массивных, и соответственно, дорогих пресс-форм.

При очень высокой текучести вследствие затекания материала в мельчайшие зазоры пресс-формы образуется большое количество заусениц (облоя); материал легко вытекает из формы через незначительные неплотности, а это мешает хорошему оформлению трудно заполняемых.

О текучести термопластичных полимерных материалов судят по показателю текучести расплава (индексу расплава), измеряемому методом капиллярной вискозиметрии при строго определённых условиях.

За *показатель текучести расплава i (индекс расплава)* принимают массу полимера, выдавленную в течение 10 минут через стандартное сопло (капилляр) под давлением соответствующего груза и при заданной температуре. Индекс расплава является понятием условным, однако эта величина точно характеризует реологическое поведение полимера при переработке его в изделия литьём под давлением, экструзией и другими методами.

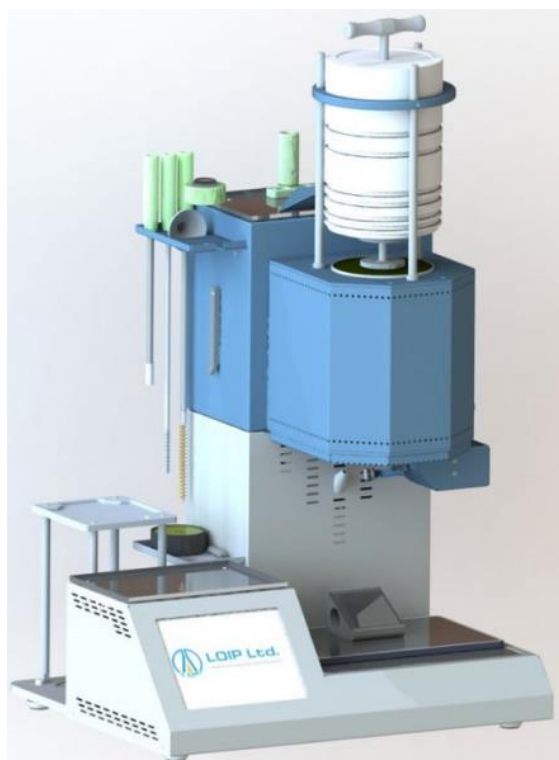
Определение производят на грузовом капиллярном вискозиметре (рис. 1), который представляет собой стальной цилиндрический корпус, имеющий продольный центральный канал. В этот канал загружают испытуемый материал, в боковой канал помещают термометр или термопару для контроля температуры. Диаметр центрального канала 9,55 мм, длина 115

мм, сечение по всей длине одинаковое. В центральном канале корпуса помещается поршень из закалённой стали. На нижнем конце поршня имеется направляющая часть, диаметр которой на 0,75 мм меньше диаметра канала. Длина направляющей части равна 6,35 мм.

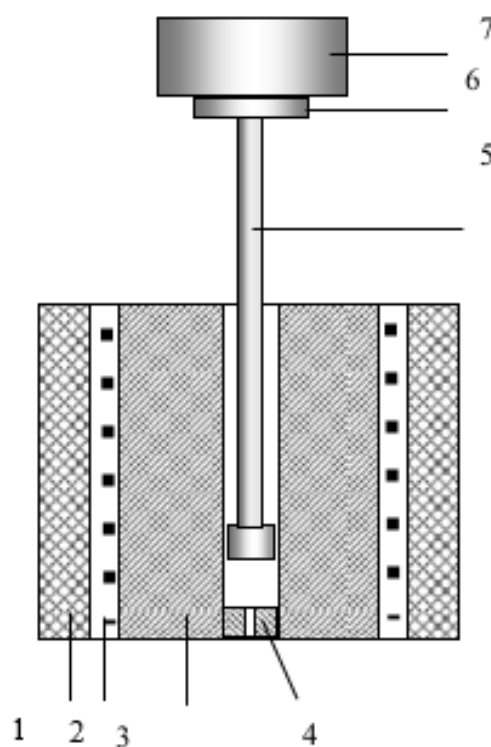
На верхней части поршня находится втулка, на которой помещён съёмный груз. В нижней части центрального канала укреплено стандартное сопло, выполненное из закалённой стали и имеющее диаметр капилляра $2,095 \pm 0,005$ и длину $8,0 \pm 0,25$ мм.

Корпус имеет электрообогрев, при помощи которого можно поддерживать в цилиндре заданную температуру. Все поверхности цилиндра, поршня и сопла, соприкасающиеся с полимерным материалом, должны быть отполированы. Прибор должен быть установлен строго вертикально и укреплён на металлическом штативе. Полимер для испытаний может применяться в виде гранул или порошка.

Условия, рекомендуемые для определения индекса расплава, регламентируются стандартами. Рекомендуются стандартные нагрузки 2,16; 5 и 10 кгс и температуры, кратные 10°C . Чаще всего индекс расплава определяют при 190°C и нагрузке 2,16 кгс. Это соответствует напряжению сдвига на стенке капилляра примерно $13,5\text{--}16\text{ кН/м}^2$.



а



б

Рис. 1. Прибор для определения показателя текучести расплава ПТР-ЛАБ-11 (капиллярный вискозиметр): а – общий вид; б – схема; 1 – теплоизоляция прибора; 2 – электронагреватель; 3 – цилиндр; 4 – сопло; 5 – шток с поршнем; 6 – втулка для установки груза; 7 – груз

Показатель текучести расплава является сравнительной характеристикой, однако, он широко используется на практике. По значению показателя текучести расплава проводится предварительный выбор метода переработки полимера и КМ. Например, экструзией можно

перерабатывать полимеры с $i = 0,3-1,2$ г/10 мин; литьём под давлением 1,2–3 г/10 мин, а для нанесения покрытий напылением полимерного порошка с последующим его оплавлением пригодны полимеры с i большим, чем 7 г/10 мин. Конечно, эти значения несколько условны, т.к. подбором температуры расплава вязкость можно изменять в достаточно широком интервале, что позволяет высоковязкие полимеры перерабатывать под давлением, а низковязкие – экструзией.

По значению индекса расплава можно ориентировочно оценивать эффективную вязкость расплава термопласта в условиях испытаний по формуле (в системе СИ):

$$\eta = \frac{0.5G\rho}{i}$$

где η – эффективная вязкость, Н·сек/м²; G – нагрузка на поршень, Н; ρ – плотность расплава, г/см³; i – индекс расплава.

Эффективную вязкость в пузах можно определить по формуле:

$$\eta = \frac{5 \cdot 10^4 G \rho}{i}$$

где η – эффективная вязкость, пз; G – нагрузка на поршень, кгс; ρ – плотность расплава, г/см³; i – индекс расплава.

Индекс расплава можно использовать для оценки среднемассовой молекулярной массы полимеров. Изменение индекса расплава в различных условиях испытания позволяет оценить превращения, происходящие в полимере в этих условиях, например, повышение текучести расплава в результате термоокислительной деструкции или понижение – в результате образования сетчатых структур.

2.3. Методика определения текучести расплава с помощью капиллярного вискозиметра

Показатель текучести расплава определяют следующим образом. На регуляторе температуры прибора, изображённого на рисунке 1, устанавливают заданную температуру и включают нагреватель. После достижения заданной температуры, например, 190 °С, выдерживают прибор при этой температуре в течение 10 мин. Для контроля температуры в центральный канал вставляют термометр с максимальной температурой изменения 300 °С.

После выдержки термометр вынимают и в центральный канал цилиндра небольшими порциями (1,0 – 1,5 см³) загружают полимер, уплотняя каждую порцию до образования однородной массы расплава. Канал цилиндра заполняют примерно на 3/4 его глубины, после чего в канал вводят поршень и выдерживают его в течение 5 мин для установления равномерной температуры, затем на поршень устанавливают стандартный груз (2,16; 5; 10 кгс) и выдавливают расплав через капилляр.

Первую выдавленную порцию расплава (приблизительно 1-2 см) отрезают ножом и отбрасывают. Через определённые промежутки времени (например, через 5 мин) выдавленный расплав в виде жгутиков срезают с сопла ножом и впоследствии взвешивают.

Масса загружаемого полимерного материала в цилиндр прибора и промежутки времени, через которые следует отрезать вытекающий из сопла расплав, зависят от предполагаемого показателя текучести расплава.

В таблице 2 приведены рекомендуемые значения масс загрузки в цилиндр и промежутки времени, через которые следует отрезать расплав, выходящий из капилляра, в зависимости от предполагаемого индекса расплава.

Таблица 2

Рекомендуемые значения масс полимера для загрузки в цилиндр

Индекс расплава, г/10 мин	Масса загрузки в цилиндре, г	Промежутки времени, с
0,15–1,0	3-4	240
1,0–3,5	4-5	60
3,5–10	6–8	30
10–25	6–8	20

За величину показателя текучести принимают среднее из трёх определений. Разница между максимальной и минимальной массой выдавленного расплава не должна превышать 10 %.

Показатель текучести расплава i (в г/10 мин) рассчитывают по формуле:

$$i = \frac{10m}{t},$$

где m – масса выдаваемого расплава полимера, г; t – время выдавливания, мин.

3. Объекты и средства исследования

Объектом исследования являются реологические свойства термопластичных полимеров, используемых в качестве связующих для композиционных материалов.

Исследования проводятся путем определения текучести полимера по стандартной методике на приборе ПТР-ЛАБ-11 с использованием образцов термопластичных полимеров в виде гранул или порошка.

4. Методика выполнения работы

14. Ознакомиться с теоретическими положениями.
15. Ознакомиться с принципом работы прибора ПТР-ЛАБ-11.
16. Произвести подготовку материалов для измерения текучести.
17. Произвести измерения текучести различных термопластов (конкретный перечень материалов задается преподавателем в ходе лабораторной работы).
18. По показателю текучести определить наиболее подходящий метод получения изделия из КМ на основе заданных термопластичных материалов.
19. Сделать выводы.
20. Оформить отчет по лабораторной работе.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое переработка полимерных материалов? Назовите методы переработки полимеров в вязкотекучем, высокоэластическом, твёрдом и жидком состоянии?
2. Какого вида изделия можно получать из полимеров при переработке в вязкотекучем, высокоэластичном, твёрдом, жидком и порошкообразном состоянии?
3. Какие технологические свойства исходных полимерных материалов учитывают при выборе метода формования изделия?
4. Что изучает реология?
5. Как влияет текучесть расплава на оформление изделия в пресс-форме и его качество?
6. Что такое показатель текучести расплава (индекс расплава)?
7. Как устроен прибор для определения показателя текучести расплава и каков принцип его действия?
8. Как влияет величина индекса расплава на выбор метода переработки полимера?
9. По какой формуле рассчитывают показатель текучести расплава?
10. Какие характеристики полимера, кроме реологических, позволяют оценивать величину индекса расплава?

6. Список литературы

1. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. — СПб.: Профессия, 2006, 624 с.; 2012, 624 с.
2. Шевченко А.А. Физикохимия и механика композиционных материалов. — СПб.: Профессия, 2010. — 224 с.
3. Брызгалин Г. И. Проектирование деталей из композиционных материалов волокнистой структуры. — М.: Машиностроение, 1982, - 84 с.
4. Тамуж В.П., Тетерс Г. А. Проблемы механики композитных материалов. //Механика композитных материалов, 1979, №1, - стр. 34-45.
5. Максимов Р. Д., Плуме Э. З. Упругость гибридного композитного материала на основе органических и борных волокон. //Механика композитных материалов, 1980, №3, - стр. 399-403.
6. Максимов Р. Д., Плуме Э. З., Понаморов В. М. Прочностные свойства однонаправленно армированных гибридных композитов. //Механика композитных материалов, 1984, №1, - стр. 35-41.

Изучение технологий изготовления изделий из полимерных и композиционных материалов методом литья под давлением

1. Цель работы.

Ознакомиться с технологическим процессом изготовления изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) методом литья под давлением, методами определения прочностных свойств ПКМ, получить навыки работы на современном оборудовании для литья под давлением различного типа.

2. Теоретические положения

Разработка полимерного композиционного материала (ПКМ) ставит конечной целью получение из него конкретного изделия. В случае получения изделия из наполненного КМ метод переработки мало влияет на прочностные характеристики изделия, однако, их необходимо контролировать его в процессе разработки технологии изготовления конкретным методом для оценки эксплуатационных свойств будущего изделия.

Метод литья под давлением является наиболее распространенным при переработке большинства промышленных термопластов. Его, но несравненно реже, используют также для изготовления деталей из некоторых разновидностей реактопластов. К основным достоинствам литья под давлением относятся: универсальность по видам перерабатываемых пластиков, высокая производительность в режиме автоматизированного процесса; высокая точность получаемых изделий, возможность изготовления деталей весьма сложной геометрической формы, недостижимой при использовании любых других технологий. Кроме того, литьем под давлением производят изделия армированные, гибридные, полые, многоцветные, из вспенивающихся пластиков и др. Метод позволяет формировать изделия массой от долей грамма до десятков килограммов.

2.1. Сущность метода литья под давлением

Процесс литья под давлением на червячной литьевой машине сводится к следующему: (рис. 1).

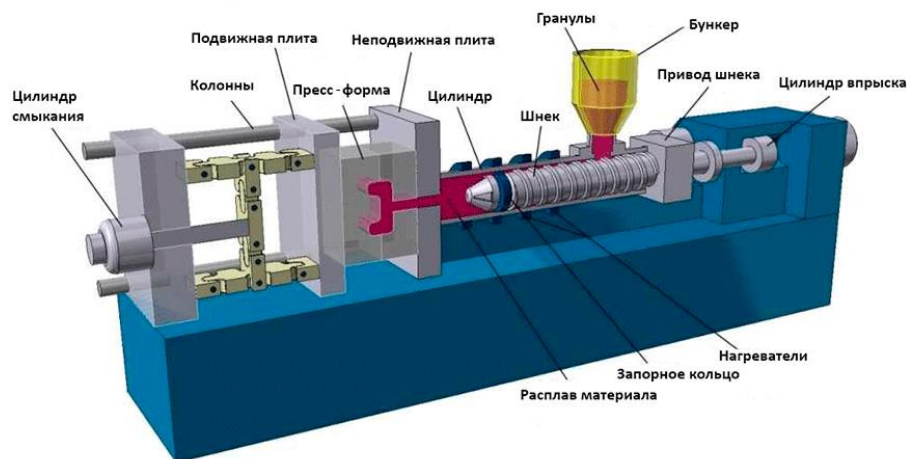


Рис. 1. Схема процесса литья под давлением на червячной литьевой машине

Материал в виде гранул засыпается в бункер, откуда равномерно и непрерывно захватывается червяком (шнеком), нагревается, пластицируется и продвигается в переднюю зону нагревательного цилиндра, где за счет тепла, получаемого от нагревателей, окончательно пластицируется (плавится и переходит в вязкотекучее состояние). Расплавленный материал периодически проталкивается через мундштук в полость предварительно сомкнутой литевой формы. При этом происходит заполнение формы под давлением (впрыск материала). Заполненная форма некоторое время выдерживается под напорным давлением материала. В противном случае изделие не получится плотным. Во время выдержки под давлением за счет охлаждения формы водой изделие в форме остывает и твердеет. После окончания впрыскивания поршень отводится в заднее (правое) положение и одновременно форма размыкается на две полуформы. Изделие толкателем выбрасывается из полости формы. Затем начинается отливка следующей детали. Нажимается кнопка пуска (при автоматическом режиме нажатия кнопки не требуется), и цикл повторяется.

Таким образом, в процесс формования изделия литьем под давлением можно выделить несколько этапов:

1. Расплавление компонентов и подача расплава в форму.
2. Создание давления с целью быстрого заполнения и равномерного распределения полимерной массы по форме.
3. Охлаждение наполненного объема до полного затвердевания пластмассы. Время, требующееся для кристаллизации полимера, зависит от многих параметров: типа применяемого пластика, вязкости расплава, температуры в форме и пр. Для негабаритных деталей процесс охлаждения длится на протяжении нескольких секунд.
4. Получение готового изделия. После полного остывания форма разъединяется с целью получения детали.

2.2. Режимы переработки пластмасс литьем под давлением.

Основные технологические факторы, определяющие процесс литья и качество готового изделия: 1) подготовка материала; 2) свойства материала; 3) температура в обогревательном цилиндре; 4) температурный режим формы; 5) давление в цилиндре и форме; 6) продолжительность цикла.

Подготовка материала. Большинство термопластов не нуждается в предварительной обработке перед загрузкой в литевую машину, если не считать окрашивания в нужный цвет. Полиамиды, этролы и поликарбонат, способные при хранении увлажняться, необходимо подсушивать. При переработке увлажненных материалов образуются пузыри, утяжины, пятна, серебристость на поверхности изделий. Подсушивание производят непосредственно перед переработкой.

Поведение материала в процессе литья. Температурно-временное поведение перерабатываемого материала имеет большое значение как в процессах пластикации, так и заполнения формы и выдержки под давлением, особенно с точки зрения подбора и поддержания температурного режима в пластикационном цилиндре литевой машины и в литевой форме. При выборе перерабатываемого материала важнейшим критерием для термопластов является текучесть как функция температуры массы (характеризуемая,

например, показателем текучести расплава), а для реактопластов - время жизнеспособности (время до начала реакции отверждения), определяемое по кривой отверждения.

Переход аморфных полимеров в вязкотекучее состояние происходит в широком интервале температур. Подобные термопласты перерабатываются без особых затруднений. Колебания температуры расплава не вызывают резкого изменения процесса литья; термопласт не вытекает через зазоры в форме. Усадка аморфных термопластов обычно $0,4 \div 0,6\%$.

В противоположность аморфным, кристаллические термопласты (капрон, полиэтилен) имеют узкий интервал температур перехода в вязкотекучее состояние, низкую вязкость и, соответственно, высокую текучесть. Это несколько усложняет их переработку, вызывает необходимость точнее поддерживать температуру расплава, делать запорные устройства к мундштуку, обеспечивать плотную посадку поршня в цилиндре. Термопласты кристаллического строения при затвердевании имеют значительно большую усадку, достигающую до 3% , чем выше температура термопласта, тем больший объем он занимает и тем больше усадка при охлаждении. Кроме термической усадки может происходить усадка вследствие изменения структуры полимера. Усадка проявляется не только в изменении размеров, но и в появлении углублений, внутренних пустот. Чем ниже температура термопласта и чем выше давление в процессе литья, тем меньше усадка, тем больше плотность материала в изделии.

При переработке термореактивных пластмасс необходимо учитывать следующие особенности. При переработке фенопластов минимальная влажность должна быть ок. 3% . Для удаления летучих компонентов в процессе пластикации вблизи загрузочной воронки необходимо предусмотреть устройство для дегазации. Аминопласты проявляют склонность к предотверждению, что проявляется в повышенной хрупкости изделий. Недостатком эпоксидных литевых масс является отверждение при относительно низких температурах и большая адгезия к литевой форме. Для устранения последнего недостатка внутренние поверхности литевых форм хромируют.

С учетом указанных факторов производится выбор температур материального цилиндра и формы.

Температурный режим нагревательного цилиндра. Нагревательный (инжекционный) цилиндр является основным технологическим узлом машины, определяющим ее производительность и качество изделий. К нагревательному цилиндру предъявляют следующие требования:

- высокий коэффициент теплопередачи от источников нагрева к материалу при небольших разностях температур стенок цилиндра и материала;
- равномерный нагрев материала и отсутствие местных перегревов.

Температурный режим формы. Режим охлаждения изделия в форме влияет как на производительность машины, так и на качество изделий. Интенсивное охлаждение увеличивает производительность машины, но может привести к снижению качества изделий из-за появления внутренних напряжений, чем выше температура затвердевания термопласта, тем выше должна быть температура формы. Температура формы перед заполнением обычно ниже температуры литья на $100 - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Основные режимы литья под давлением (температура и время подсушки, удельное давление литья, время выдержки, температура формы) подбираются по литературным данным для конкретного материала.

2.3. Особенности переработки различных термопластов

Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) характеризуется быстрым расплавлением. После охлаждения кристаллизуется и меняет твердость. Требуется соблюдать определенное давление и обеспечить максимально равномерный нагрев пресс-формы. Поэтому для охлаждения, вход воды обеспечивается возле литниковых сопел, а отвод в дальней точке. Заполнение охлаждающей жидкостью выполняется быстро с хорошей вентиляцией формы.

Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) по сравнению с полиэтиленом НП отличается лучшей кристаллизацией и меньшей степенью текучести в расплавленном виде. Литье пластмассы этого типа широко практикуется для получения изделий с тонкими стенками, но при этом обеспечивается достаточная жесткость конструкции.

Полипропилен (ПП) отличается кристалличностью, не превышающей 60%. Процесс выполняется при пониженном давлении и достаточно высокой температуре пластикации, которая в зависимости от марки материала может достигать 280 °С. Давление расплава формируется на уровне 140,0 МПа. Вязкость полученной массы регулируется скоростью сдвига и незначительно зависит от температурного режима.

Полистирол (ПС) представляет собой материал, который в результате применения технологии литья под давлением отличается легкой текучестью в расплавленном виде. Позволяет изготавливать изделия, которые характеризуются жесткостью конструкции и тонкими стенками. Полимер чувствительный к перегреву.

Полистирол ударопрочный (УПС) – полимер, отличающийся несколько большей вязкостью, чем обычный полистирол и дает при охлаждении большую усадку. Применяется для тонкостенных деталей с повышенной устойчивостью против механического воздействия.

Акрилонитрил-бутадион-стирольный пластик (АБС-пластик) характеризуется большой вязкостью в расплавленном состоянии, отличается трудной переработкой и требует повышенного давления. Применяется для изготовления деталей с тонкими стенками, но в отличие от, например, полистирола, АБС-пластик имеет высокую жесткость и устойчивость к ударам.

Полиметилметакрилат (ПММА) позволяет получать изделия разной формы и конфигурации. Отличается низкой термической стабильностью и чувствительностью к перегреву с потерей физических параметров. Требуется дополнительной сушки. В процессе обработки нужен точный температурный контроль. Особенность материала в образовании пузырей при инжектировании в холодную пресс-форму, поэтому в ней минимизируется количество плавных переходов.

Поливинилхлорид (ПВХ) широко применяется для литья под давлением, поскольку характеризуется легкостью обработки. Материал чувствителен к соблюдению температурного режима и теряет свойства при перегреве. При нахождении в расплавленном состоянии отличается нестабильностью и автокаталитической деструкцией, проявляющейся

в разном цветовом оттенке. Диапазон цвета может меняться от слоновой кости до вишневого оттенка. Для получения всех свойств полимера требуется осуществлять процесс пластикации за минимальное время.

Полиамид (ПА) представляет собой кристаллический термопласт, отличающийся гигроскопичностью и хорошей текучестью массы. При нахождении в расплавленном состоянии объем увеличивается на 15%. По причине низкой термической стабильности процесс литья пластмасс этого типа выполняется за минимальное время. В расплаве возможно образование пузырей. Материал требует дополнительного времени для тщательной просушки. Процесс пластикации обеспечивается при давлении 100 МПа. При наполнении литьевых форм допускается ориентация частиц.

Поликарбонат (ПК) является теплостойким полимером. Характеризуется высокой термостабильностью и повышенной вязкостью в расплавленном состоянии, зависящей от температурного режима. Пресс-форма нагревается до температуры 100 °С. По причине повышенной гигроскопичности материала, для нормального литья под давлением требуется предварительный прогрев в цилиндре литьевой машины и тщательная сушка.

Полиэтилентерефталат, полибутилентерефталат и полиоксиметилен (ПЭТФ, ПБТФ и ПОМ) классифицируются как полимеры, отличающиеся высокой термической стабильностью. Процесс литья пластмасс этого типа предусматривает дополнительную сушку, выполняемую до снижения влаги на уровень 0,01%. В расплавленном состоянии имеют вязкость средней степени, которая снижается при уменьшении температуры. Для получения тонкостенных изделий используется раздув с использованием воздуха.

Полифениленсульфид (ПФС) является высокотехнологичным материалом из разряда, так называемых, суперконструкционных термопластов. ПФС применяется в автомобильной и авиационной промышленности, машиностроении, нефтяной и газовой промышленности, электротехнике и электронике, светотехнике и т.д. Он успешно заменяет не только другие пластики, но, также, реактопласты и металлы. Полифениленсульфид чаще всего перерабатывается литьем под давлением. Готовые изделия отличаются высокой стабильностью размеров вследствие низкой усадки полимера. Вторично использованный материал можно добавлять к первичному в количестве до 10-20% без изменения физико-механических свойств. Рекомендуемая температура расплава по зонам ТПА: 300-340°С. Температура формы должна быть установлена в диапазоне 135-175°С, т.к. при более низких температурных значениях происходит значительное ухудшение качества поверхности деталей и возникает потенциальная возможность коробления. Полимер достаточно чувствителен к влаге, поэтому необходимо обязательно контролировать остаточную влажность после сушки.

Полифениленсульфон (ПФСУ) является одним из модификаций полисульфонов и представляет собой суперконструкционный аморфный термопластичный пластик. Материал характеризуется легким весом и высокой прочностью, чрезвычайно высокой ударной вязкостью при высоких и низких температурах. Области применения ПФСУ достаточно широки, в частности это теплостойкие детали автомобиля, детали под капотом автомобиля. Данный материал используется там, где требуются высокие эксплуатационные характеристики, как, например, подшипники и высокоточные зубчатые передачи,

функционирующие в условиях низких и высоких температур. ПФСУ используются для некоторых конструкций для герметизации ядерных реакторов в зонах максимальной радиации. При литье под давлением полимер дает усадку приблизительно 0,65%. Переработка должна осуществляться при температуре расплава 340 – 370 °С в форме, нагретой до 120 – 155 °С.

Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) это полукристаллический полимер с высокотемпературной устойчивостью. Имеет выдающиеся механические, химические и электротехнические эксплуатационные характеристики, сохраняющиеся при рабочих температурах до +310 °С. Полиэфирэфиркетон — самый устойчивый из полимеров к действию водяного пара. Имеет наименьший из пластиков уровень выделения вредных газообразных веществ под действием открытого пламени. Характеризуется очень высокой стабильностью размеров. Применяется в сферах, где необходимы улучшенные свойства устойчивости к высоким температурам или устойчивость к химически агрессивной среде, также используется при сильных радиоактивных излучениях и электрических нагрузках, что позволило этому материалу стать универсальным. Его применение стало традиционным в аэрокосмической, химической и ядерных областях.

Полиэфиркетонкетон (ПЭКК) является высокоэффективным полимером с обширным спектром применения. ПЭКК является огнестойким с пониженным дымовыделением и низкой токсичностью. Он обеспечивает высокую устойчивость к широкому спектру химикатов, в том числе при повышенных рабочих температурах. ПЭКК также может использоваться в качестве надежного диэлектрика в широком диапазоне частот с повышенной термостойкостью и устойчивостью к воздействию окружающей среды. благодаря повышенной межслойной адгезии полимер может достигать еще более высоких пределов прочности при растяжении в сравнении с полимером ПЭЭК. Скорость кристаллизации несколько медленнее, чем у полимера ПЭЭК, что существенно облегчает процесс печати и позволяет добиться лучшей межслойной адгезии.

2.4. Оборудование для литья под давлением

2.4.1. Термопластавтоматы

Современные литьевые машины (ЛМ) представляют собой сложные технические устройства, оснащенные разнообразными средствами автоматизированного управления параметрами технологического процесса. Нередко их называют термопластавтоматами (ТПА) или реактопластавтоматами (РПА) в зависимости от вида основного перерабатываемого материала.

Конструкции литьевых машин весьма разнообразны. Основными классификационными признаками ЛМ являются усилие заклипирования формы (кН), то есть смыкания формы, создаваемое прессовым блоком, и объем впрыска или мощность, выражаемая числом кубических сантиметров расплава, которые могут быть подготовлены машиной для однократной подачи в литьевую форму. Выпускаемые промышленностью серийные литьевые машины, как правило, объединены в типоразмерные ряды по двум указанным выше параметрам.

В настоящее время наибольшее распространение получили горизонтальные одношнековые с совмещенной пластикацией ТПА. Они обеспечивают объемы впрыска от 4 см³ до 70000 см³ при усилии запыриания формы от 25 до 60000 кН.

На рис. 1 представлена типовая схема термопластавтомата, а на рис. 2 – внешний вид ТПА ДЕ3727.Ф1, используемого при проведении лабораторной работы №1.



Рис. 2. Внешний вид термопластавтомата ДЕ3727.Ф1

2.4.2. Ручные литьевые машины

В условиях мелкосерийного производства изделий, а также для проведения экспериментально-исследовательских и опытно-конструкторских работ на промышленных предприятиях, конструкторских бюро и в сфере частного предпринимательства используются ручные литьевые машины. Принцип действия ручной литьевой машины аналогичен термопластавтомату. Отличие состоит в том, что все операции выполняются вручную.

На рис. 3 приведен внешний вид ручной литьевой машины РЛМ, используемой при проведении лабораторной работы №2.



Рис. 3. Ручная литьевая машина

Максимальные размеры формы, устанавливаемой на РЛМ, 200х92х80 мм (40 мм х 2, две половинки), расстояние от стенки до сопла 40 \pm 0.5 мм. Диаметр нижней части сопла \varnothing 10 мм, угол сопла 45°. Литник делается между двумя половинками для удобного извлечения из формы после литья.

2.5. Литьевые формы

Литьевые формы предназначены для непосредственного получения изделий из расплава, подготовленного в узле пластикации ЛМ. Поэтому их функция состоит в приеме расплава, его распределении по формообразующим полостям, в формовании изделий и затем в их выталкивании. Конструкции литевых форм весьма разнообразны, что вызвано двумя главными причинами: широчайшим ассортиментом получаемых изделий и разнообразием перерабатываемых полимерных материалов. Кроме того, на конструкцию литевых форм влияет вид материала (термо- или реактопласт), тип оборудования, характер производства, особые требования к изделиям и др.

С точки зрения состояния полимерного материала в течение цикла производства изделия литевые формы для термопластов подразделяются на холодноканальные и горячеканальные. В холодноканальных формах в течение цикла формования затвердевает весь объем поступившего в форму материала. В горячеканальных определенная зона формы, горячая, постоянно заполнена расплавом, часть которого периодически поступает в формующие полости, расположенные в охлаждающей зоне.

Формы для реактопластов принципиально сходны с холодноканальными с тем отличием, что вместо охлаждающей системы они имеют нагревательные устройства, поддерживающие в формующей камере температуру, требуемую условиями отверждения полимера (160÷200 °С).

По числу формообразующих полостей (гнезд) литевые формы могут быть одно- и многогнездными (до 720), что в свою очередь определяет особенности литниковых систем.

Холодноканальные формы наиболее распространены в литье под давлением. Достоинствами таких литевых форм являются: сравнительно невысокая стоимость, простота изготовления и обслуживания, сравнительно невысокая стоимость ремонтно-восстановительных операций и универсальность по виду перерабатываемых полимеров, включая ПКМ.

На рис. 4. приведен пример типовой конструкции литевой формы.

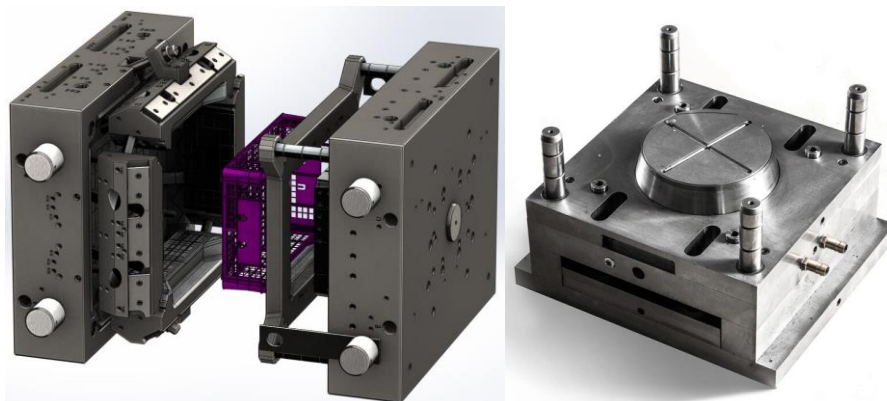


Рис. 4. Типовая литевая форма

2.6. Исследование прочностных свойств ПКМ

Под термином «прочность» понимают способность материала сопротивляться воздействию внешнего механического поля, при действии которого в ПКМ возникают механические напряжения. Если значения напряжений равно или превышает разрушающее напряжение, то ПКМ разрушается. Прочность ПКМ является сложной функцией упругих и релаксационных свойств. В процессе эксплуатации деталей, изготовленных или восстановленных с использованием ПКМ, эти свойства непрерывно меняются.

Оценивая прочность деталей из ПКМ, чаще всего используют два понятия:

- напряжение, которое определяет уровень нагруженности;
- разрушающее напряжение, которое определяет предел нагруженности.

В зависимости от соотношения вектора внешней нагрузки, напряжения подразделяют на нормальные σ и касательные (или тангенциальные) τ .

$$\sigma_p = \frac{N}{S}; \sigma_u = \frac{M}{W}$$

$$\tau_c = \frac{N}{S}; \tau_{кр} = \frac{M_{кр}}{W_p}$$

где σ_p – нормальные напряжения растяжения (сжатия); σ_u – нормальные напряжения изгиба; M – изгибающий момент от действия приложенного усилия; W – момент сопротивления сечения; N – приложенное усилие; S – площадь наименьшего по вектору поперечного сечения; $M_{кр}$ – приложенный крутящий момент; W_p – полярный момент сопротивления сечения образца.

Расчетные значения напряжений не должны превышать допускаемые $[\sigma]$, $[\tau]$:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_p}{n}; [\tau] = \frac{\tau_c}{n}$$

где n – коэффициент запаса прочности.

Для обеспечения работоспособности изделий из ПКМ необходимо выполнение условий $\sigma \leq [\sigma]$ и $\tau \leq [\tau]$.

При приложении усилий может иметь место изменение геометрических размеров деталей из ПКМ, которое чаще всего оценивают понятием «относительное удлинение» ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} 100\%$$

где l_0 – исходный размер ненагруженного образца; Δl – изменение размера образца под действием приложенной силы.

Относительное удлинение при растяжении ε_p определяют путем растяжения образцов с постоянной скоростью до разрыва. При проведении испытаний проводят измерение силы при заданных удлинениях и в момент разрыва образца, а также удлинение образца в момент разрыва. Образец для испытаний изготавливается из ПКМ методом литья под давлением и имеет форму двухсторонней лопатки. Форма образцов для определения механических характеристик ПКМ устанавливается следующими стандартами: ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы». Метод испытания на растяжения» (рис. 5.а), ГОСТ 568710-2015 «Пластмассы». Метод испытания на растяжения» (рис. 5.б) и ГОСТ 204651-2014

«Пластмассы». Метод испытания на растяжения» (рис. 5.в). Испытания проводят при температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ и скорости движения активного захвата (500 ± 50) мм/мин. Допускается проводить испытания при повышенных температурах.

По результатам испытаний получают диаграмму растяжения, записанную в координатах «деформация – нагрузка».

Пластичность характеризует свойства твердых тел деформироваться под действием нагрузки и, как только нагрузка исчезает, мгновенно возвращаться в исходное состояние с сохранением своих первоначальных размеров. Получаемая энергия «хранится» в материале. Общим свойством всех твердых тел является их пластичность до определенного предела, который называют пределом упругости. За этим пределом пластическая деформация становится необратимой и часть энергии рассеивается в виде тепла.

Модуль упругости при деформации сдвига G (модуль сдвига), определяется из уравнения:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)},$$

где μ – коэффициент Пуассона, характеризующий изменение поперечного сечения в процессе продольного растяжения; E – модуль упругости.

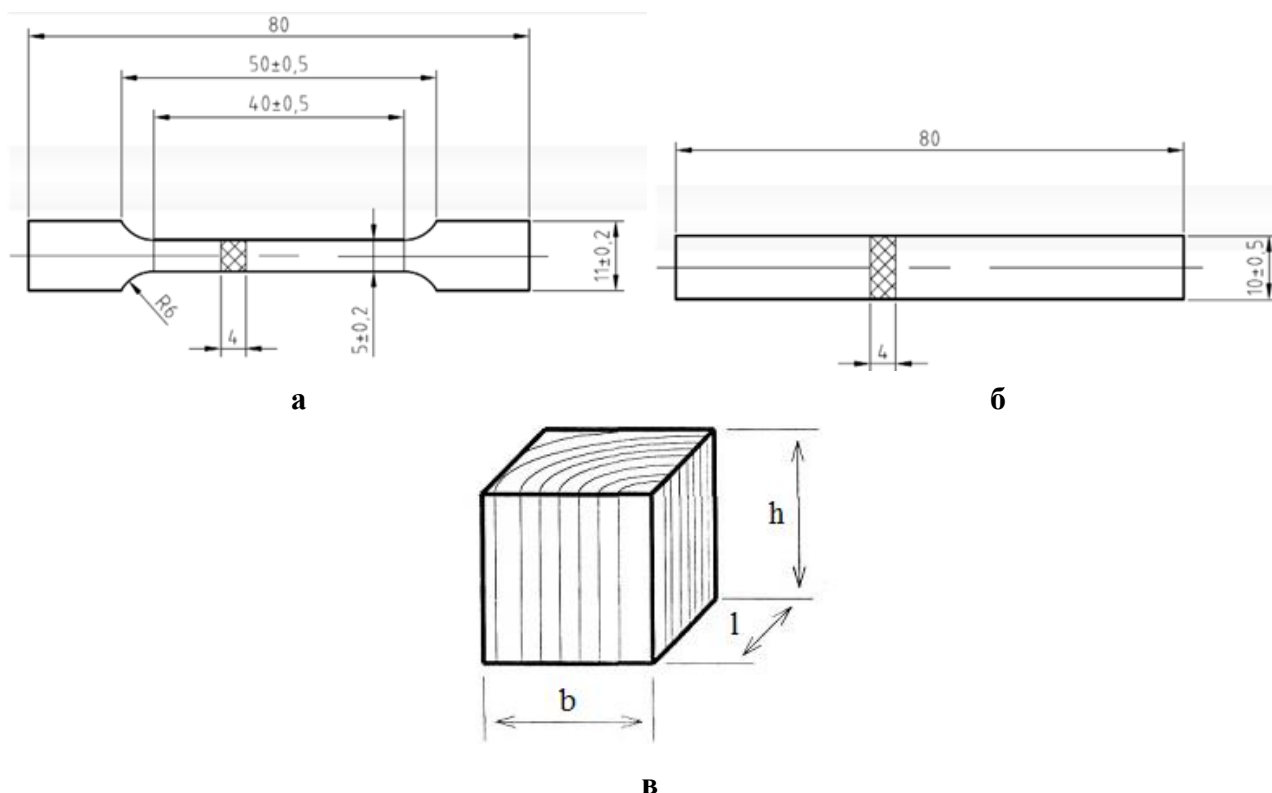


Рис. 5. Форма образцов для механических испытаний:

а - испытания на растяжение по ГОСТ 11262-2017; б - испытания на изгиб по ГОСТ 568710-2015; в - испытания на сжатие по ГОСТ 204651-2014

Модули упругости E и сдвига G не являются постоянными величинами для данного ПКМ, поскольку их величины существенно зависят от температуры.

Пластичность и модуль упругости ПКМ наиболее эффективно определяются с использованием метода динамомеханического анализа (ДМА). Динамомеханический анализ – это метод термического анализа, в котором свойства материала измеряются в процессе его периодической деформации под действием динамической нагрузки и контролируемой температуры. Метод ДМА применяется для исследования вязкоупругих свойств материалов (модуля упругости E' , модуля вязкости E'' , тангенса угла механических потерь $\tan \delta$ и др.) в зависимости от времени, температуры, частоты и значений приложенной циклической нагрузки.

3. Объекты и средства исследования

В ходе лабораторной работы производится подготовка образцов для испытаний из различных ПКМ методом литья под давлением с использованием термопластавтомата ДЕ3727.Ф1 или ручной литьевой машины РЛМ.

4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими положениями.
2. Ознакомиться с принципом работы термопластавтомата ДЕ3727.Ф1
3. Для заданных преподавателем вариантов ПКМ с использованием справочной литературы [1-7] подобрать режимы литья: температуру материального цилиндра, температуру формы, давление литья, время выдержки под давлением.
4. В соответствие с выбранными режимами изготовить образцы заданной формы (см. рис. 5).
5. Произвести испытания образцов на изгиб плоских образцов по ГОСТ 568710-2015.
6. Сделать выводы о свойствах различных ПКМ.
7. Оформить отчет по лабораторной работе.

5. Контрольные вопросы

1. Назовите основные этапы процесса литья под давлением.
2. Как назначаются режимы литья под давлением?
3. Перечислите основные узлы термопластавтомата.
4. Каковы области применения ручных литьевых машин?
5. Охарактеризуйте особенности литья под давлением АБС-пластика.
6. Перечислите основные прочностные свойства ПКМ.

6. Список литературы

1. Бондалетова Л.И. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учебное пособие / Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.
2. Полимерные композиционные материалы: учебное пособие. Часть 2 / сост. Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – 130 с.

3. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин и др.; под ред. А.А. Берлина. - - СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
4. Холодников Ю.В. Способы изготовления изделий из композитов //Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – №. 6-2. – С. 214-221.
5. Композиционные материалы: справочник / В.В. Васильев [и др.]; под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарновского ; редколл. Н. А. Алфутов [и др.]. — Москва: Машиностроение, 1990. — 512 с.: ил. — ISBN 5-217-01113-0.
6. Sheryshev M.A. Analysis of constructional causes of defects of thin-walled injection molded products / M.A. Sheryshev, N.S. Dikanova, V.M. Kropachev // Advances in chemistry and chemical technology. – 2017. – Vol.31. – No.11. – P.37–39.
7. Кахраманов Н.Т., Азизов А.Г., Осипчик В.С., Мамедли У.М., Арзуманова Н.Б. Наноструктурированные композиты и полимерное материаловедение. //Пластические массы, Москва, 2016, №1-2, с. 49-57.

Изучение технологий получения дисперсно-наполненных композитов на основе термопластов методом экструзии

1. Цель работы.

Ознакомиться с технологическим процессом изготовления дисперсно-наполненных композиционных материалов на основе термопластов методом экструзии, ознакомиться с принципами работы экструдеров, получить навыки работы на них.

2. Теоретические положения

Наполнители наряду со связующим являются важнейшим элементом структуры композиционного материала (КМ). Функции наполнителя в КМ весьма разнообразны - от формирования комплекса механических свойств до придания материалу разнообразных специфических свойств, таких как фрикционные, электрические, магнитные и т.п. Поэтому в качестве наполнителей в КМ выступают самые разнообразные вещества и материалы, содержание которых также может меняться в очень широких пределах.

По форме частиц наполнители подразделяются на дисперсные, зернистые, волокнистые и слоистые (рис. 1).

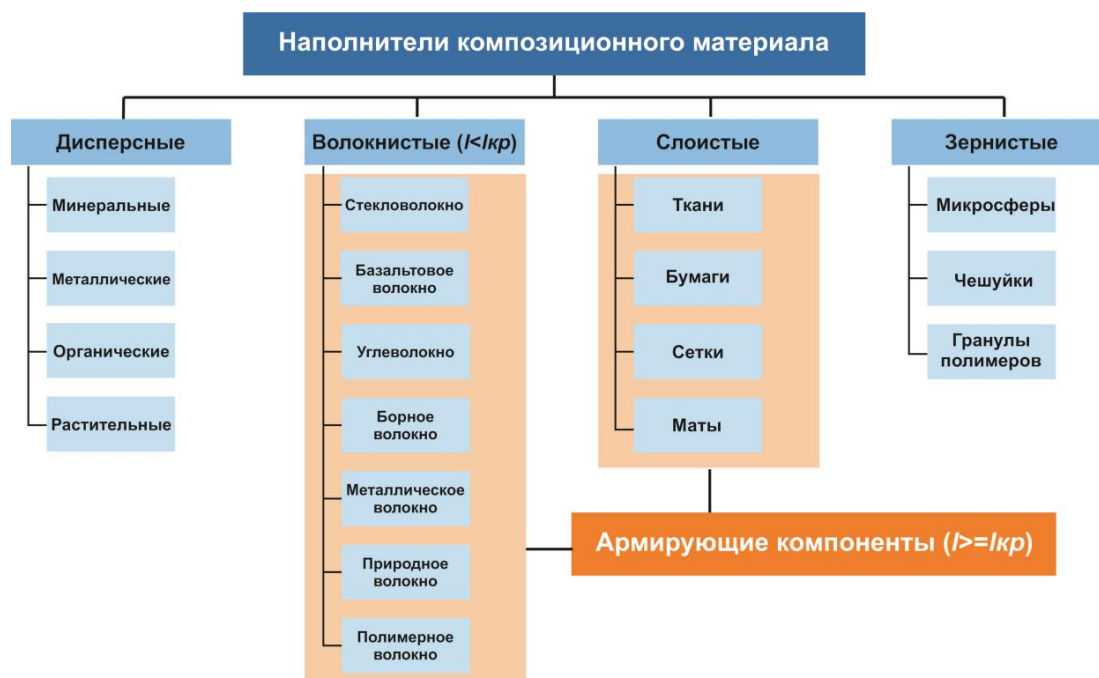


Рис. 1. Классификация наполнителей композиционных материалов

Представляется целесообразным разделить наполнители на две группы по основным функциям, которые они несут в каждом конкретном материале, положив в основу понятие критической длины волокна. **Критическая длина волокна $l_{кр}$** – это длина (l) волокна, до которой напряжение, воспринимаемое собственно волокном в пластике, возрастает и при $l=l_{кр}$ становится равным прочности волокна.

Первая группа – собственно наполнители, как правило, в виде частиц ограниченных размеров, введение которых определяет общий комплекс свойств КМ, способствует

снижению усадки, остаточных напряжений и склонности к растрескиванию (*дисперсные наполнители*). Для данной группы средний размер частиц l оценивается как $l < l_{кр}$.

Вторая группа – это наполнители, оказывающие решающее влияние на прочностные характеристики КМ, которые называются *армирующими элементами*. Армирующие элементы – это, как правило, волокнистые материалы достаточно больших линейных размеров, воспринимающие основную нагрузку, действующую на материал, для которых $l \geq l_{кр}$.

Дисперсные наполнители – наиболее распространенный вид наполнителей, в качестве которых выступают самые разнообразные вещества органической и неорганической природы. Как правило, в качестве дисперсных наполнителей выступают порошкообразные вещества с различным размером частиц от 2-10 до 200-300 мкм. Обычно размер частиц не превышает 40 мкм, однако в последнее время при создании нанокомпозитов используются частицы размером менее 1 мкм. Содержание дисперсных наполнителей в КМ меняется в широких пределах – от нескольких процентов до 70-80%. Такие материалы, как правило, изотропны, однако асимметричная форма частиц при условии заметной ориентации в процессах переработки может приводить к возникновению некоторой анизотропии свойств, хотя последняя более характерна для волокнистых наполнителей.

К числу важнейших требований, предъявляемых к дисперсным наполнителям, относятся способность совмещаться с полимером или диспергироваться в нем, хорошая смачиваемость расплавом или раствором полимера, отсутствие склонности к агломерации частиц, однородность их размера, а также низкая влажность (как правило, необходима сушка).

2.1. Смешение как способ получения КМ

Из определения следует, что композиционный материал представляет собой дисперсионную среду, в которой распределена дисперсная фаза. Для достижения равномерного распределения частиц дисперсной фазы в полимерной матрице чаще всего прибегают к процессу смешения. Смешение это основной процесс получения полимерных композиционных материалов (ПКМ). Поэтому понимание закономерностей этого процесса очень важно при создании композиционных материалов.

Смешение – это механический процесс распределения исходных компонентов по всему объему системы. Со статистической точки зрения смешение – это механический процесс, целью которого является превращение исходной системы, характеризующейся определенным упорядочением в расположении компонентов, в систему с неупорядоченным, статистически случайным распределением. При смешении на смесь действует напряжение сдвига, которое вызывает в системе сдвиговые деформации и перемещение частиц относительно друг друга. Направление сдвиговой деформации в процессе смешения изменяется, в результате чего происходит распределение частиц дисперсной фазы по объему.

Идеальной называется смесь, в любой точке которой вероятность присутствия каждого компонента остается постоянной. Однако из-за большого числа факторов, действующих при смешении, идеального смешения в гетерогенной системе достигнуть невозможно.

Различают распределительное (простое) и диспергирующее смешение. В процессе простого смешения размер частиц дисперсной фазы не изменяется, а происходит только распределение этих частиц по объему материала.

При диспергирующем смешении дополнительно происходит уменьшение размера частиц дисперсной фазы (диспергирование). Например, смешение полимера с наполнителем относят к диспергирующему смешению. При смешении происходит разрушение агломератов наполнителя под действием сдвиговых напряжений. В большинстве процессов получения различных ПКМ смешением имеет место диспергирующее смешение.

Распределительное и диспергирующее смешение не следует рассматривать как совершенно различные физические процессы. При диспергирующем смешении всегда в той или иной мере проявляется распределительное смешение. Однако при распределительном смешении диспергирующее смешение может иметь место лишь при наличии твердого компонента, имеющего предел прочности и лишь тогда, когда напряжения, действующие на данный компонент, превысят этот предел (рис. 2).

Для получения композиционного материала на основе полимера и дисперсного наполнителя необходимо не только равномерно распределить и хорошо диспергировать наполнитель в полимерной матрице, но и обеспечить хорошее смачивание поверхности наполнителя полимером. Для этого полимер должен находиться в вязкотекучем (жидком) состоянии хотя бы на одной из стадий процесса приготовления КМ.

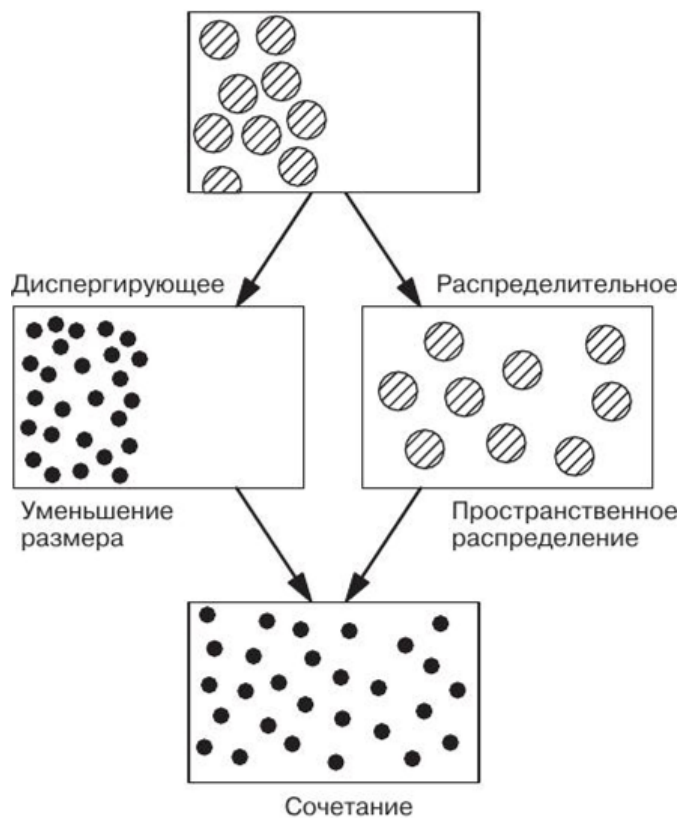


Рис. 2. Типы смешения

С учетом этих требований используются следующие наиболее распространенные способы получения ПКМ с дисперсным наполнителем.

1. Смешение наполнителя с полимером, находящимся в вязкотекучем состоянии (выше температуры текучести или выше температуры плавления).

2. Смешение раствора полимера с наполнителем с последующим удалением растворителя.

3. Введение наполнителя в латекс полимера с последующей коагуляцией латекса и удалением воды.

4. Введение наполнителя в мономер с последующей полимеризацией мономера (полимеризация мономера в присутствии наполнителя).

При получении наполненных ПКМ на основе термопластов, резиновых смесей и реактопластов наиболее распространенным является первый способ смешения. Смешение ведут в двухроторных смесителях или в многошнековых экструдерах (чаще всего в двухшнековых). Экструдеры работают по непрерывной схеме, роторные смесители – по периодической. При малых объемах производства или в лаборатории возможно проводить смешение на вальцах.

К достоинствам способа относятся: высокое качество диспергирования наполнителя; универсальность; отсутствие больших количеств вспомогательных веществ (растворителей, коагулянтов и т.д.).

2.2. Оборудование для смешения ПКМ

Как уже отмечалось ранее, основной способ получения ПКМ - это смешение компонентов ПКМ с полимером, находящимся в вязкотекучем состоянии (высоковязкий раствор или расплав). Полимеры в вязкотекучем состоянии, как и их растворы, характеризуются очень высокой вязкостью. Поэтому получить ПКМ можно только в специальном оборудовании, рассчитанном на смешение очень вязких масс. К такому оборудованию относятся вальцы, двухроторные смесители закрытого типа, двухроторные лопастные смесители открытого типа и различного типа экструдеры. В этих смесителях можно смешивать высоковязкие полимеры с дисперсными наполнителями, другими полимерами и жидкостями. Смесители бывают периодического и непрерывного действия. Вальцы, двухроторные смесители закрытого типа и двухроторные лопастные смесители относятся к смесителям периодического действия, экструдеры – к смесителям непрерывного действия.

Вальцы позволяют смешивать материалы с эффективной вязкостью от 10 до $1 \cdot 10^4$ Па·с. Двухроторные смесители закрытого типа предназначены для смешения масс с вязкостью от 10 до $1 \cdot 10^3$ Па·с. Двухроторные лопастные смесители открытого типа могут смешивать материалы с вязкостью от 0,1 до 100 Па·с. В экструдерах возможно смешение материалов с вязкостью от 1 до $1 \cdot 10^3$ Па·с.

В силу того, что экструдеры являются аппаратами непрерывного действия, их применение в процессах смешения ПКМ позволяет улучшить качество получаемых смесей. Во-первых, непрерывность процесса позволяет повысить степень автоматизации производства и уменьшает ручной труд. Во-вторых, позволяет получать продукцию более стабильного качества, без колебаний свойств между разными замесами. В-третьих, перечисленные изменения позволяют улучшить экономические показатели производства.

Именно поэтому экструдеры на данный момент являются наиболее распространенным оборудованием для получения смесей ПКМ.

Существует большое количество разновидностей экструдеров и их модификаций (рис. 3). Бывают экструдеры одно-, двух- и многошнековые (планетарные), дисковые. Они значительно различаются по производительности, стоимости и смесительному воздействию.

Наиболее распространены в настоящее время одно- и двухшнековые экструдеры.

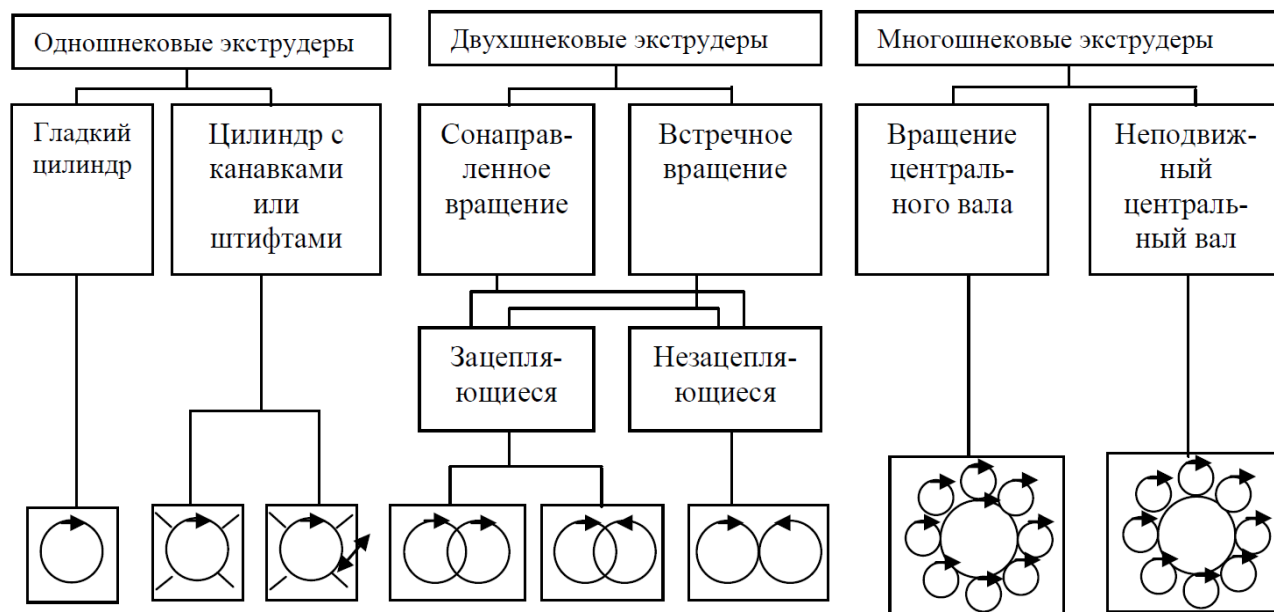


Рис. 3. Классификация шнековых экструдеров по числу и направлению вращения шнека

2.2.1. Одношнековые экструдеры

Смесительное воздействие в одношнековом экструдере обусловлено в основном тем, что часть расплава образует противоток в рабочем цилиндре экструдера, в результате чего возникает циркуляция материала в пространстве между витками шнека. Противоток возрастает при увеличении сопротивления прохождению материала по цилиндру. В частности, этого можно добиться путем установки пакета фильтрующих сеток на выходе из цилиндра экструдера. Однако трудно получить в одношнековом экструдере с прямой нарезкой шнека большое смесительное воздействие. Одношнековый экструдер хорошо работает как насос, но смесительную функцию он выполняет плохо.

Принципиальное устройство одношнекового экструдера показано на рис. 4. Он действует следующим образом. Полимерный материал из бункера 3 поступает в материальный цилиндр 2, захватывается вращающимся шнеком 1 и транспортируется к формующей головке, фрагмент которой показан позицией 7. При этом полимер в первой (питающей) зоне шнека (I_3) размягчается и уплотняется в пробку, в зоне сжатия (I_2) он расплавляется, а в зоне дозирования (I_1) гомогенизируется и подготавливается к подаче в формующую головку. Для обеспечения требуемого теплового режима и условия транспортирования на материальном цилиндре установлены зонные кольцевые нагреватели 5 с индивидуальными вентиляционными устройствами; участок цилиндра вблизи загрузочного отверстия охлаждается водой по каналам 4, а для контроля температуры служат

термопары **6**. Конструкция шнека, как правило, предусматривает его внутреннее охлаждение водой, подаваемой и отводимой через устройство **10**. Шнек получает вращение от электромеханического привода, состоящего из электродвигателя **12** постоянного или переменного тока, и редуцирующей механической передачи **9**. Осевое усилие, действующее на шнек в направлении, противоположном транспортированию расплава, воспринимается подшипниковым узлом **11**.

Все рабочие узлы экструдера смонтированы в корпусе **8**. Следует отметить, что в современных экструдерах материальный цилиндр и электромеханический привод нередко располагаются в горизонтальной, плоскости, что позволяет существенно уменьшить вертикальный габаритный размер машины.

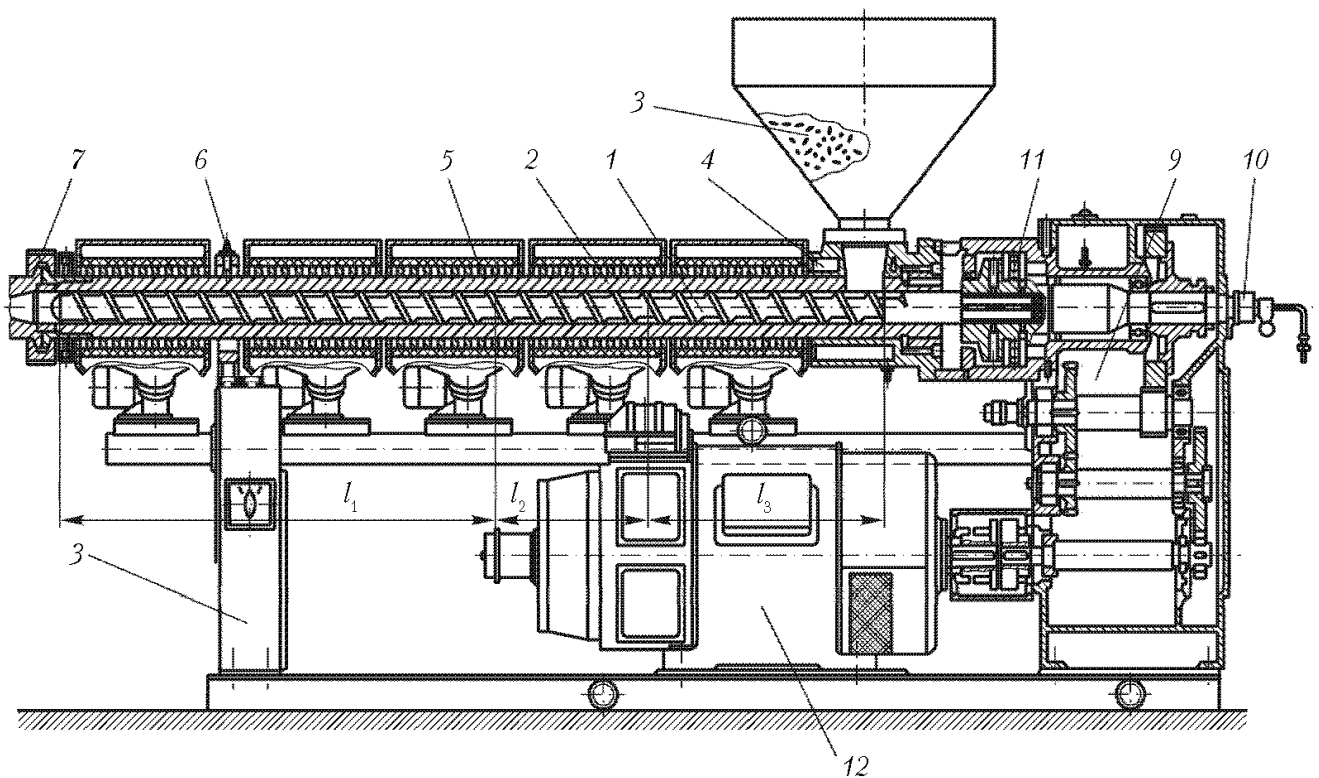


Рис. 4. Принципиальное устройство одношнекового экструдера. Пояснения в тексте

Расчет производительности одношнекового экструдера в настоящее время производится на основе анализа процессов, происходящих в зоне дозирования.

В дозирующей зоне существуют три основных потока. Вынужденный поток (прямой поток) Q_D представляет собой поступательное течение расплава, которое возникает как следствие относительного движения цилиндра и шнека. Противоток Q_p , возникающий под действием давления, развивающегося в формирующем инструменте, можно рассматривать как течение расплава в обратном направлении. Третья разновидность потоков – это поток утечки Q_δ в кольцевом зазоре между цилиндром и гребнем шнека. Перепад давления, возникающий вследствие существования повышенного давления в головке, между двумя боковыми поверхностями стенки канала вызывает появление утечки через кольцевой зазор между гребнем шнека и внутренней поверхностью корпуса.

Обычно утечка по сравнению с двумя другими упомянутыми выше потоками очень незначительна и ею в расчетах пренебрегают. Таким образом, производительность дозирующей зоны равна разности между расходом вынужденного потока и расходом противотока и потока утечки:

$$Q = Q_D - Q_p - O_{\delta}.$$

Вынужденный поток Q_D представляет собой поступательное течение расплава, возникающее вследствие наличия вязкости у жидкости и существования относительного движения шнека и цилиндра. Основными параметрами, определяющими величину объемного расхода вынужденного потока, являются глубина и ширина канала, диаметр шнека и скорость его вращения.

Противоток Q_p возникает в результате существования избыточного давления расплава в головке экструдера.

Если пренебречь потоком утечек O_{δ} , объемную производительность одношнекового экструдера можно описать следующим уравнением:

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 \sin \alpha \cos \alpha \left(1 - \frac{ie}{t}\right) h N}{2} - \frac{1 \Delta p}{12 \mu L} h^3 \sin^2 \alpha \cdot \pi D \left(1 - \frac{ie}{t}\right), \quad (1)$$

где D – наружный диаметр шнека; t , h , W – шаг, глубина и ширина винтового канала соответственно; e – ширина гребня нарезки вдоль оси; i – число заходов винтовой нарезки шнека; L – длина зоны дозирования шнека; α – угол подъема винтовой нарезки; N – скорость вращения шнека; μ – динамическая вязкость расплава; Δp – падение давления на длине зоны дозирования шнека.

Первый член уравнения (1) представляет собой производительность вынужденного потока Q_D , а второй – производительность потока под давлением Q_p . Очевидно, что Q_D зависит только от геометрических параметров и частоты вращения N шнека, а поток под давлением – от свойств перерабатываемого материала и режимов экструзии.

2.2.2. Двухшнековые экструдеры.

В середине 30-х годов XX века появляется новый тип шнековых экструдеров для переработки пластмасс – двухшнековый, в конструкцию которого был заложен принципиально другой механизм продвижения материала, чем водношнековым, – принудительный. Несомненными преимуществами двухшнековых экструдеров являются хороший захват исходного сырья в зоне загрузки вне зависимости от агрегатного состояния и формы частиц материала, принудительное продвижение материала к формующему инструменту и взаимная самоочистка шнеков.

В экструдерах данного типа два шнека расположены в общей рабочей камере, которая представляет собой два цилиндра, сообщающиеся по образующей (рис. 5).

Основными рабочими органами двухшнековых экструдеров являются два шнека 2, вращающиеся в материальном цилиндре 1, на котором размещены кольцевые электронагреватели 3. Для компенсации тепловой инерции нагревателей на каждой зоне обогрева имеются индивидуальные воздушные вентиляторы 4. При использовании порошкообразных материалов экструдеры часто снабжаются дополнительными шнеками 5 с

индивидуальным приводом **7**, транспортирующими полимер от бункера **6** к загрузочному отверстию материального цилиндра. Установка подобных дополнительных шнеков гарантирует полное и равномерное заполнение в зоне загрузки межвиткового пространства рабочих шнеков. Так же, как и в одношнековых машинах, зона вблизи загрузочного отверстия материального цилиндра охлаждается водой (на схеме каналы охлаждения не показаны). Во многих конструкциях экструдеров для удаления газообразных продуктов в материальном цилиндре и шнеках предусматривается зона дегазации. В этом случае экструдер может быть снабжен вакуумным насосом **11**. Привод рабочих шнеков с бесступенчатым регулированием частоты вращения может осуществляться различными способами. На схеме изображен электромеханический привод, состоящий из электродвигателя **10** и редуктора **9**. Осевые усилия, возникающие при работе экструдера, воспринимаются узлом упорных подшипников **8**. Все узлы и агрегаты экструдера монтируются на станине **12**.

Шнеки экструдера могут вращаться в одну сторону (сонаправленное вращение) или в разные стороны (встречное вращение) – рис. 6. При сонаправленном вращении геометрия обоих шнеков абсолютно идентична. При встречном вращении один шнек по конфигурации является полным зеркальным отражением другого.

Шнеки бывают с полным (плотным) зацеплением витков (рис. 6, строка 1), с частичным зацеплением (строка 2) и без зацепления витков шнека (строка 3). В последнем случае расстояние между шнеками больше их диаметра. Нарезка шнеков бывает одно-, двух- и трехзаходной. С увеличением числа заходов нарезки уменьшается транспортирующая способность экструдера, но увеличивается его смесительная эффективность.

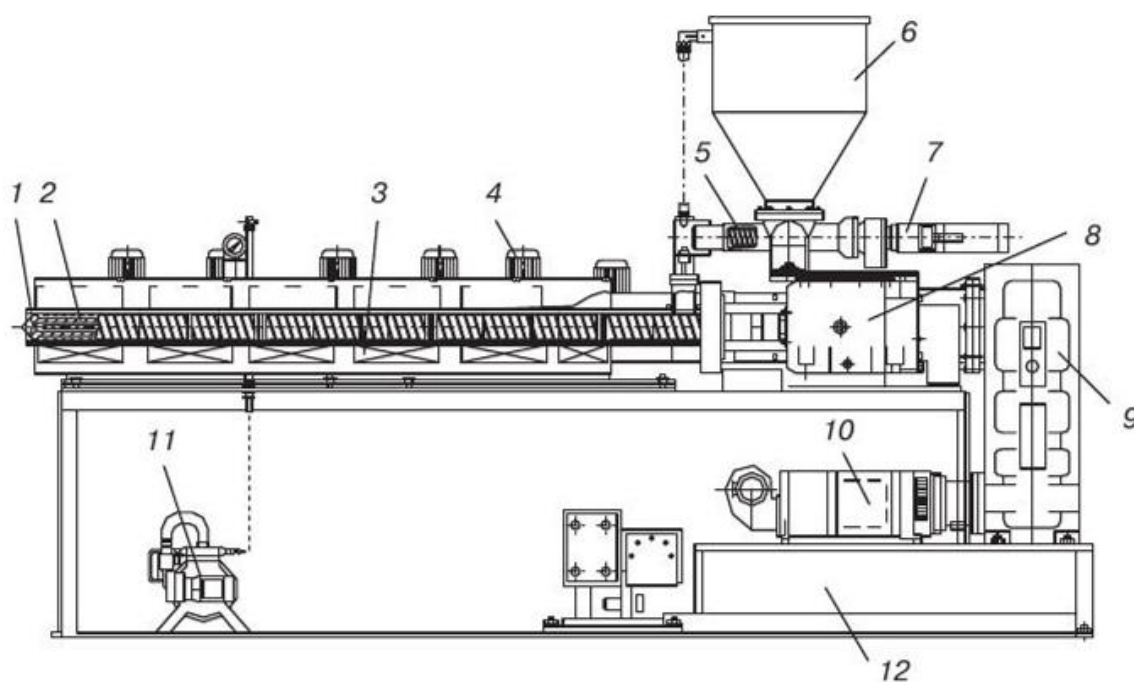


Рис. 5. Принципиальное устройство двухшнекового экструдера. Пояснения в тексте

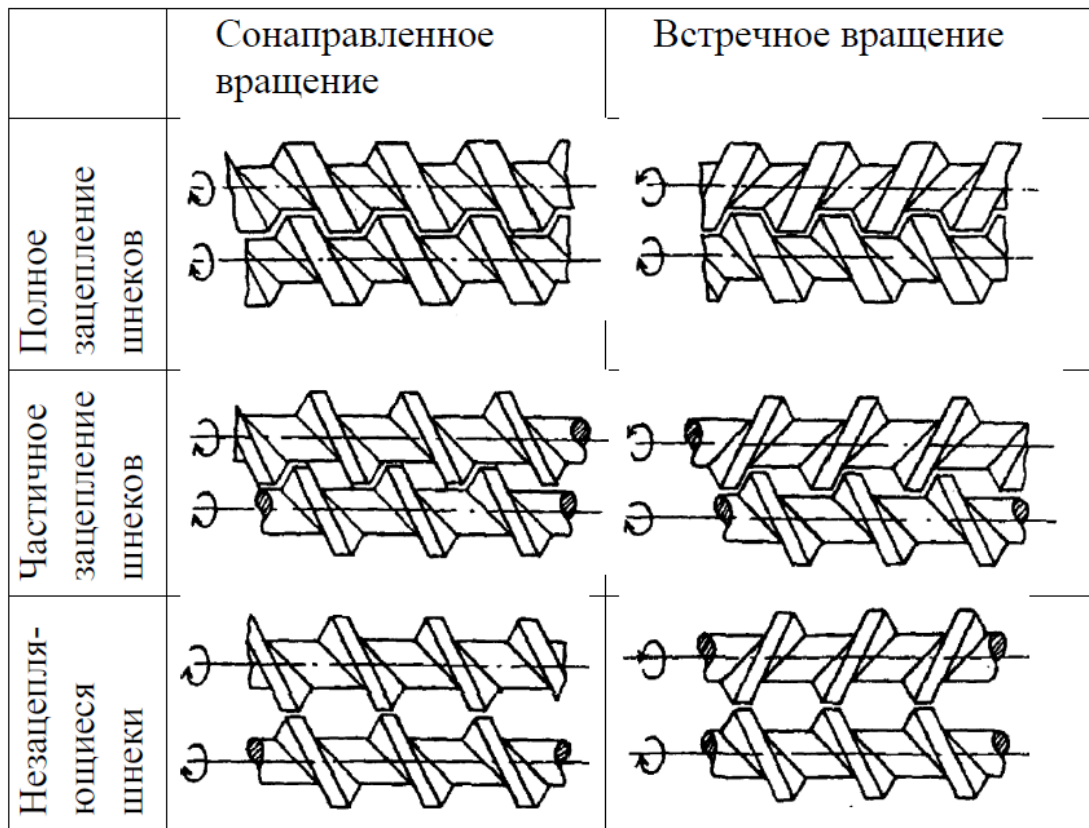


Рис. 6. Расположение шнеков в двухшнековых экструдерах

В двухшнековых экструдерах с плотно зацепляющимися шнеками в отличие от одношнековых экструдеров противоток материала по каналу нарезки практически невозможен. Шнеки продвигают материал вперед путем вытеснения, как насос. Смесительное воздействие происходит из-за многократного перетекания материала между нарезками разных шнеков. Диспергирующее воздействие в двухшнековых экструдерах с плотнозацепляющимися витками обусловлено высокими сдвиговыми воздействиями на материал в зазорах между двумя шнеками и между шнеком и стенкой цилиндра. Благодаря этому в двухшнековых экструдерах достигается хороший эффект диспергирования агломератов. Особенно высокие сдвиговые деформации возникают в зазоре между шнеками, вращающимися сонаправленно, поскольку соприкасающиеся поверхности шнеков движутся в разные стороны. Но в таких экструдерах опасно перерабатывать материалы, чувствительные к высоким температурам и механическим воздействиям.

Двухшнековые экструдеры с плотно зацепляющимися шнеками нашли самое широкое применение в производстве ПКМ на основе пластиков. Их выпускают с диаметром шнеков от 18 до 380 мм, соотношением L/D до 64, со скоростью вращения шнеков до 1200 об/мин, производительностью до 40 т/ч и мощностью привода до 10 МВт.

Производительность двухшнекового экструдера можно представить в виде:

$$Q_{max} = iNh(2\pi - \alpha')(\pi D \tan \alpha - e)(D - h), \quad (2)$$

где D – наружный диаметр шнека; h – глубина винтового канала; e – ширина гребня нарезки вдоль оси; i – число заходов винтовой нарезки шнека; N – скорость вращения шнеков; α' – угол перекрытия, который определяется по формуле:

$$\cos \alpha' = 1 - \frac{2h}{D-h} + \frac{h^2}{2(D-h)^2}.$$

Уравнение (2) определяет максимальную производительность двухшнекового экструдера, когда С-образные секции винтовых каналов полностью изолированы друг от друга, и считается, что весь материал, заполняющий объем секций, выдавливается из каждого шнека за один оборот.

Однако в реальности наличие зазоров в зацеплении шнеков, сопротивление, возникающее в формирующем инструменте (головке), а так же наличие относительного движения стенок винтовых каналов и цилиндра является причиной возникновения утечек. Поэтому реальная производительность двухшнекового экструдера Q_R намного меньше теоретической Q_{\max} , рассчитанной по уравнению (2).

2.2.3. Сравнение одно- и двухшнековых экструдеров

В табл. 1 приведено сравнение возможностей одно- и двухшнековых экструдеров.

Таблица 1

Двухшнековый экструдер	Одношнековый экструдер
Используется в профильной экструзии, при смешении и экструзии реакционноспособных (химически активных) материалов	Используется в простой профильной экструзии и соэкструзии
Часто используется модульная конструкция шнека и цилиндра, обеспечивая большую гибкость	Модульная конструкция шнека и цилиндра используется редко, незначительная гибкость
Предсказание режима работы экструдера является затруднительным	Предсказание режима работы экструдера является менее трудным, чем для двухшнекового экструдера
Хорошая загрузка можно использовать гранулы, порошки, жидкости	Удовлетворительная загрузка использование скользящих добавок может создать проблемы
Хорошее плавление, обусловленное дисперсионным механизмом плавления твердых материалов	Удовлетворительное плавление, обусловленное совмещением различных механизмов плавления твердых материалов
Хорошее дистрибутивное Хорошее диспергирующее смешение Хорошая дегазация	Хорошее дистрибутивное смешение Хорошее диспергирующее смешение Удовлетворительная дегазация
Экструдеры с зацепляющимися шнеками могут быть полностью самоочищающимися	Нет самоочистения: цилиндр очищается, а основание шнека и стороны лопасти шнека нет

Высокая стоимость модульного двухшнекового экструдера	Одношnekовый экстру дер относительно недорог
Экструдеры с двумя однонаправленно вращающимися шнеками могут работать при очень высоких скоростях шнека до 1400 об/мин	Одноднешнековые экструдеры обычно работают при скоростях 10-150 об/мин. Высокие скорости шнека возможны, но используются редко

2.3. Линия компаундирования термопластичных композиционных материалов

Компаундирование представляет собой процесс смешения расплава полимера с наполнителем, выхода компаунда из сопла в виде стренги, отверждения и грануляции. Линия для компаундирования *Scientific* состоит из двухшнекового экструдера, охлаждающей ванны и гранулятора (рис. 7).

Двухшнековый экструдер LTE20-44 серии *Scientific* имеет два шнека диаметром $D = 20$ мм и длиной $44D$. Длина шнеков и его наборных частей обычно выражается в диаметрах шнека; сами шнеки могут характеризоваться соотношением длины к диаметру L/D (в нашем случае $L/D 44$).

Основные характеристики экструдера:

- шнеки соосные, наборные, однонаправленные;
- модульный сборный цилиндр, каждый модуль имеет длину $4D$. Цилиндр имеет открывающуюся уравновешенную верхнюю часть для облегчения доступа к шнекам;
- водяное охлаждение и электрический нагрев каждого модуля цилиндра;
- стандартный редуктор с мотором мощностью 5.5 кВт, максимальная скорость вращения до 800 об/мин;
- система дегазации цилиндра с патрубками, оборудованная смотровым стеклом и манометром. Экструдер оборудован двумя зонами дегазации, к каждой из которых можно подключить систему вакуумной дегазации;
- стандартный одношnekовый бункерный питатель. Имеет переменную скорость вращения шнека и лопастную мешалку (ворошитель) над шнеком
- стренговая фильера с 2-мя отверстиями, присоединенная к экструдеру при помощи навесных винтов, может отводиться вбок на шарнире. Фланец фильеры имеет легко удаляемую решетку, которая может быть заменена распорным кольцом.

Водяная охлаждающая ванна LW-100 имеет рабочую длину 150 см. Ванна оборудована тремя погружными роликами, независимо регулируемыми по высоте. Три погружных ролика с пазами для предотвращения спутывания стренг закреплены с одной стороны, что обеспечивает свободный доступ к стренге. Система вакуумной сушки обеспечивает удаление влаги со стренги при входе в гранулятор.

Гранулятор LZ-120 оборудован фрезой, имеющей 20 режущих кромок и вращающейся с переменной скоростью от 50 до 1200 об/мин. Имеет управляющую панель с цифровыми программируемыми регуляторами длины гранул и скорости грануляции. Камера гранулятора оборудована системой подачи сжатого воздуха для эффективного удаления материала с фрезы и из камеры. Защитная крышка из поликарбоната оборудована датчиками,

останавливающими вращение фрезы при открытии.



Рис. 7. Линия компаундирования термопластичных композиционных материалов на основе двухшнекового экструдера LTE20-44

2.3.1. Изготовление дисперсно-наполненного ПКМ методом смешения на линии Scientific

Исходными данными являются:

- скорость основной подачи пластика – не менее 10 об/мин;
- навеска пластика – не менее 10 г/мин;
- соотношение скорости основной подачи и скорости вращения шнеков – $1/2 \div 1/3$;
- скорость боковой подачи – не более 450 об/мин.

Подача непрерывного волокна с катушки осуществляется через боковую подачу, расположенную между зоной загрузки цилиндра и зоной вакуумной дегазации. Волокно (предпочтительно в виде ровинга) затягивается и измельчается шнеками боковой подачи с постоянной скоростью. Дальнейшее диспергирование наполнителя осуществляется в цилиндре экструдера.

Подбор и корректировка скорости подачи волокна – трудоемкий процесс. Не рекомендуется устанавливать скорость боковой подачи более 450 об/мин (рекомендованный диапазон: 200-300 об/мин).

По этим причинам подбор технологических режимов следует начинать с подбора режима для подачи волокна в следующей последовательности:

1. Отмерить и отрезать 5 м ровинга.
2. Взвесить ровинг, определить массу 1 метра (если масса 1 метра менее 1.5 г, допускается подавать два ровинга одновременно).
3. Установить скорость боковой подачи 200 об/мин и измерить время, за которое подача «затянет» 5 м ровинга.
4. Рассчитать, сколько метров ровинга подача «затянет» в минуту.
5. Рассчитать, какая масса ровинга поступит в экструдер за минуту при подаче 200

об/мин.

6. Рассчитать, сколько грамм пластика в минуту потребуется подавать при полученной массе ровинга и заданном проценте заполнения.

7. Если расчетная требуемая масса пластика менее 10 г – повторять пункты 3-6 с постепенным повышением подачи на 50 ед. Если расчетная требуемая масса пластика более 10 г – перейти к п.8.

8. Отвести бункер основной подачи от зоны загрузки, развернуть к оператору

9. Засыпать в бункер пластик (не менее 100 г)

10. Установить скорость основной подачи 15 об/мин и измерить, сколько грамм пластика подается за 1 мин.

11. Сравнить полученное значение со значением, полученным в п.7. При необходимости провести корректировку скорости подачи и повторить измерение массы подаваемого пластика.

12. После окончания подбора скорости подачи пластика, вернуть бункер подачи в исходное положение.

13. При запуске скорость вращения шнеков установить вдвое большей, чем скорость подачи. Наблюдая через смотровое стекло стакана в зоне загрузки, оценить эффективность подачи пластика (он не должен накапливаться на шнеках). Увеличивать скорость вращения шнеков до достижения необходимого результата (пластик все время присутствует на шнеках, но не накапливается).

2.4. Оценка качества смешения

Характеристики получаемых ПКМ напрямую зависят от качества смешения. Поэтому при разработке рецептур, технологий и при производстве ПКМ постоянно приходится оценивать качество смешения.

При простом смешении качество смеси оценивается по равномерности распределения компонентов по объему. В случае диспергирующего смешения дополнительно оценивается степень измельчения диспергируемого компонента – степень диспергирования.

2.4.1. Оценка равномерности распределения компонентов

Концентрация веществ в различных точках материала - величина статистически случайная. Поэтому для оценки качества распределения компонентов в материале прибегают к статистическим методам анализа. Рассмотрим их.

Самый простой подход для оценки равномерности смеси состоит в определении отклонения концентрации компонентов в различных точках системы от ее среднего значения. Для его реализации отбирают случайным образом несколько проб с различных участков смеси. Как правило, количество таких проб должно быть не менее 5. Для более качественной оценки берут 20 – 25 проб. В каждой пробе экспериментально определяют концентрацию компонентов.

Если это смесь полимера с порошкообразным наполнителем, то определяют концентрацию наполнителя. В зависимости от природы полимера и наполнителя используют

различные методы измерения концентрации. Концентрацию наполнителя можно определить по удельному весу материала, путем определения массы остатка после сжигания или термического разложения полимера, по оптической плотности материала и др.

На основании полученных данных определяют среднюю концентрацию наполнителя:

$$\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i, \quad (3)$$

где M – число проб; x_i – концентрация частиц наполнителя в i -ой пробе; \bar{x} – среднее значение концентрации наполнителя в смеси для M проб.

С помощью этих данных можно рассчитать экспериментальное значение выборочной дисперсии концентрации наполнителя в пробах s^2 :

$$s^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

Величина $\sqrt{s^2}$ показывает разброс концентрации наполнителя по объему материала и тем самым характеризует равномерность его распределения. О равномерности распределении компонентов, как правило, судят про величине относительного разброса концентрации наполнителя по объему смеси v , который равен:

$$v = \frac{\sqrt{s^2}}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Величину v часто называют коэффициентом неоднородности смеси. Чем ниже значение v , тем равномернее смесь. На практике полученный таким образом разброс концентрации наполнителя сравнивают с максимально допустимым его значением для конкретной смеси. Максимально допустимый разброс получают экспериментальным путем анализа его влияния на комплекс свойств материала. Получение максимально допустимого разброса концентрации экспериментальным путем – весьма трудоемкая и сложная задача, поскольку нельзя поменять только равномерность распределения наполнителя, не оказав влияния на другие параметры смеси, такие как качество диспергирования наполнителя, степень механохимической и термоокислительной деструкции полимера.

2.4.2. Оценка качества диспергирования наполнителя

Важной характеристикой материала, полученного диспергирующим смешением, является размер частиц дисперсной фазы. Исходя из требования однородности и воспроизводимости свойств композиционного материала желательно, чтобы все частицы дисперсной фазы были одного размера. А, исходя из требования получения максимальных прочностных свойств, – чтобы частицы наполнителя были как можно мельче. Однако из-за большого числа факторов, определяющих процесс диспергирования, одинакового и очень мелкого размера частиц достичь не удастся. Как правило, наблюдается некоторое распределение частиц по размерам, иногда весьма широкое.

Наиболее полной характеристикой качества диспергирования наполнителя являются данные о распределении частиц наполнителя в полимере по размерам. Данные о

распределении частиц наполнителя по размерам в ПКМ можно получить с помощью оптической или электронной микроскопии. Для этого из анализируемого ПКМ готовят тонкие пленки толщиной 0,2-5 мкм. Пленки можно изготовить прессованием расплава, отливкой из раствора или срезанием на микротоме. Предпочтительным и наиболее универсальным способом является микротомирование, поскольку в наименьшей степени влияет на степень диспергирования наполнителя. Пленки ПКМ просматривают с помощью микроскопа. Для частиц размером более 10 мкм используют оптический микроскоп, при размере частиц менее 10 мкм - электронную просвечивающую микроскопию. Далее вручную или с помощью электронной камеры и специального программного обеспечения определяют линейные размеры и площадь проекции каждой частицы. Из этих данных рассчитывают условный диаметр каждой частицы как диаметр диска, имеющего одинаковую площадь с площадью проекции частицы (в большинстве случаев достаточно точным можно считать диаметр частицы, рассчитанный как корень квадратный из площади проекции частицы). Эти данные для удобства анализа сводят в таблицу или график.

На рис. 8 приведен пример образца ПКМ на просвечивающем электронном микроскопе с контурами частиц наполнителя.

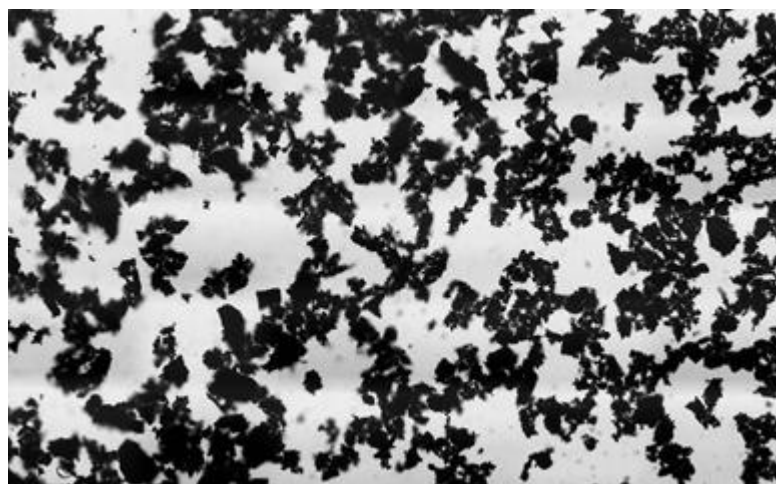


Рис. 8. Пример распределения частиц наполнителя, наблюдаемая с помощью просвечивающего электронного микроскопа

Экспериментально полученное распределение частиц по размерам сравнивают с требуемым распределением и делают вывод о качестве смеси. Требуемое качество диспергирования (размер частиц и их распределение по размерам) определяется из зависимости свойств материала от размера частиц наполнителя в нем.

Однако такой анализ требует наличия специальной дорогостоящей техники, в первую очередь это касается использования электронной микроскопии, весьма трудоемок и длителен. Существуют упрощенные методы, которые не дают исчерпывающей информации о качестве диспергирования наполнителя, но представляют наиболее важную информацию о нем. Они основываются на факте, что наибольший урон свойствам ПКМ наносят самые крупные агломераты наполнителя. Поэтому по вышеописанной методике оценивают только

число или долю крупных агломератов, начиная, как правило, с 10 мкм и более (а в некоторых случаях начиная со 100 мкм).

Диспергирование считается удовлетворительным, если измеренное число агломератов каждого размера (размерного диапазона) не превышает максимально допустимого значения. Например, ASTM D 2663 предлагает шкалу оценки качества диспергирования частиц технического углерода в каучуке, представленную в табл. 2. Этот способ, связанный с препарированием тонких пленок образцов, их просмотром в оптический микроскоп, также довольно длителен и трудоемок.

Таблица 2

**Зависимость качества диспергирования технического углерода в полимере
от доли крупных агломератов согласно ASTM D 2663**

Объемная доля частиц размером более 5 мкм, %	Качество диспергирования
Менее 1	Очень хорошее
1 - 3	Хорошее
3-5	Среднее
5-8	Низкое
Более 8	Очень низкое

3. Объекты и средства исследования

В ходе лабораторной работы производится ознакомление со структурой и принципами работы линий компаундирования на основе одно- и двухшнековых экструдеров. На основании изученных материалов и теоретических расчетов производится обоснование выбора типа экструдера для изготовления дисперсно-наполненных ПКМ. Затем производится подготовка исходного сырья, изготовление дисперсно-наполненных ПКМ методом смешения, оценка равномерности распределения и степени диспергирования наполнителя в образцах ПКМ.

4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими положениями.
2. Ознакомиться с техникой безопасности по работе на экструзионном высокотемпературном оборудовании.
3. Изучить устройство линии компаундирования термопластичных композиционных материалов, ознакомиться с порядком работы.
4. Составить структурно-функциональную схему линии компаундирования.
5. По формулам (1) и (2) рассчитать теоретическую производительность одно- и двухшнекового экструдера, входящих в состав линии компаундирования.

6. На основании структурно-функциональных схем, результатов расчета производительности и теоретических положений обосновать выбор типа экструдера для изготовления дисперсно-наполненных ПКМ.

7. Изготовить образцы дисперсно-наполненных ПКМ по методике, описанной в п. 2.3.

8. Оценить равномерность распределения и качества диспергирования наполнителя в полученных образцах методами, описанными в п. 2.4.

9. Сделать выводы о взаимосвязи скоростных и температурных режимов экструдирования и процента наполнения ПКМ.

10. Оформить отчет по лабораторной работе.

6. Контрольные вопросы

1. Какой тип смешения характерен для расплава полимеров?
2. Каким может быть сопряжение шнеков в двушнековом экструдере?
3. Экструдеры с каким типом вращения шнеков обеспечивают лучшее качество смешения?
4. Перечислите основные единицы оборудования в линии компаундирования.
5. На какие типы подразделяются полимеры в зависимости от структурной организации?
6. Приведите классификацию термопластов по уровню физико-механических и теплофизических характеристик.
7. Назовите основные требования к наполнителям термопластичным композитов.
8. Перечислите основные элементы двушнекового экструдера.
9. Какие технологии применяются для формирования изделий из дисперсно-наполненных композитов?

6. Список литературы

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин и др.; под ред. А.А. Берлина. - - СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
2. Герасимова Н.С. Полимерные и композиционные материалы: учебное пособие. М.: МГТУ им. Баумана, 2019. 46 с.
3. Андреева А. В. Основы физикохимии и технологии композитов: учебное пособие для вузов. — М.: ИПРЖР, 2001. 192 с.
4. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров. — М.: Химия, КолосС, 2005. 568 с.

**Изучение технологии FDM-печати изделий
из термопластичных и композиционных материалов**

1. Цель работы.

Ознакомиться с технологическим процессом изготовления изделий из термопластичных и композиционных материалов методом FDM-печати, ознакомиться с принципами работы 3D-принтеров, получить навыки работы на них.

2. Теоретические положения

Среди всех методов 3D-печати наиболее распространенным является метод FDM (Fused-Deposition Modeling), основанный на экструзии материала через печатающую головку 3D-принтера.

Принципиальная схема процесса FDM-печати представлена на рисунке 1. Во время печати исходный материал в виде нити (филамента) разматывается с катушки и подается в печатающую головку, которая нагревает материал до полужидкого состояния выше температуры стеклования. Затем он выдавливается из сопла и наносится на встроенную платформу (стол) принтера. Подаваемая от катушки твердая нить выполняет функцию поршня, выталкивающего расплавленную нить из сопла. Усилие, прилагаемое нитью для выдавливания расплава, должно быть достаточным для преодоления перепада давления на печатающей головке, который зависит от реологических свойств расплавленного материала и геометрии пути потока. Таким образом, нить должна быть достаточно жесткой и не должна разрушаться при изгибе. Печатающая головка или платформа стола перемещаются по осям X и Y, что позволяет осаждать расплавленный материал для формирования двумерных слоев детали. По завершении каждого слоя печатающая головка перемещается по оси Z на величину толщины слоя, что позволяет нанести следующий слой поверх предыдущего. Полужидкое состояние материала, осаждаемого с наконечника сопла, позволяет смежным слоям сплавляться друг с другом. Наконечник сопла прижимает расплавленный материал к предыдущему слою. Из-за давления и высокой температуры поверхность предыдущего слоя повторно расплавляется. Это обеспечивает сплавление нового слоя с ранее напечатанным. После нанесения материал нити быстро затвердевает. Процесс послойного нанесения продолжается до тех пор, пока не будет напечатана вся заданная геометрия изделия. Также доступны принтеры с двумя экструзионными головками, в которых одно сопло подает базовый материал для сборки детали, а второе - материал для несущей конструкции (поддержки).

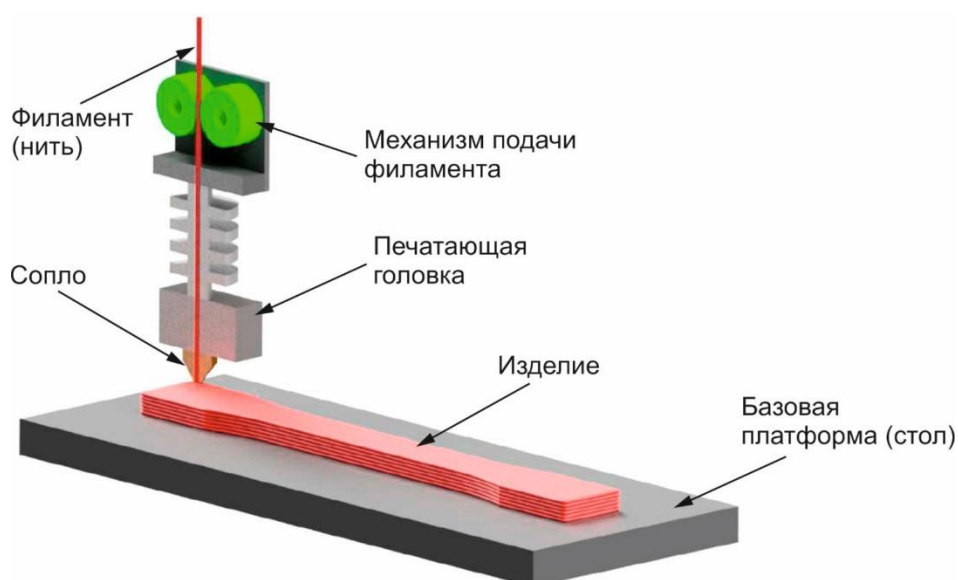


Рис. 1. Принципиальная схема процесса FDM-печати

В настоящее время технология FDM-печати является наиболее широко используемой с точки зрения количества установленных по всему миру 3D-принтеров. Это самая доступная настольная технология 3D-печати, что делает ее очень популярной среди отечественных потребителей, любителей и образовательных учреждений.

1.1. Материалы для FDM-печати

Исходное сырье для FDM-печати представляет собой нить (филамент), обычно изготовленную из термопластичного материала, характеризующуюся бесконечной длиной по отношению к поперечному сечению. В настоящее время промышленно выпускаются нити диаметром 1.75 и 2.85 мм.

Метод FDM используется для печати термопластичных полимеров, композитов с полимерной матрицей, биокompозитов или полимерно-керамических композитов, нанокомпозитов и композитов, армированных волокнами. Наиболее часто используемыми термопластичными полимерами являются акрилонитрил-бутадиен-стирол (АБС), полилактид (ПЛА), полиамид (ПА), полиэтилентерефталат (ПЭТ), полиэтилентерефталат, модифицированный гликолем (ПЭТГ) и поликарбонат (ПК). В последнее время область применения FDM-печати существенно расширилась за счет суперконструкционных термопластов таких, как полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), полиэфиркетонкетон (ПЭКК) и полиэфиримид (ПЭИ) [15, 16].

На рисунке 2 представлена пирамида термопластичных материалов, используемых для FDM-печати.

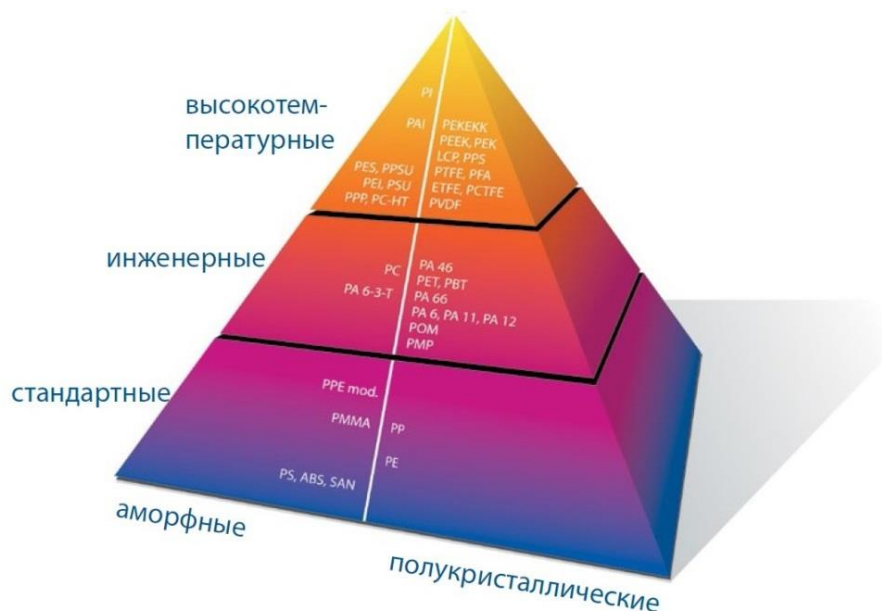


Рис. 2. Пирамида термопластичных полимеров, используемых в технологии FDM-печати

Для достижения лучших механических, оптических, тепловых и электрических свойств по сравнению с чистыми полимерами в технологиях FDM-печати в последнее время все чаще используются композиционные материалы на основе термопластичных матриц. В качестве наполнителей в таких материалах выступают углеволокно, стекловолокно, кевлар, дерево, металлический порошок и т.д. Непрерывное армирование волокнами нитей для 3D-печати также становится возможным благодаря различным технологиям.

Поскольку материал напрямую влияет на поведение детали при печати и физические свойства готового изделия, выбор его становится одним из главных вопросов, решаемых на этапе предварительной подготовки.

В настоящее время основными термопластами, используемыми при FDM-печати вследствие низкой температуры плавления, являются АБС, ПЛА и ПА. Кроме этого, эти термопласты являются наиболее распространенными матричными материалами в композитах, используемых при 3D-печати. Именно поэтому в качестве модельных (стандартных) термопластичных материалов при дальнейших исследованиях рассматривается один из этих материалов – АБС-пластик.

1.2. Параметры процесса FDM-печати

Как любой технологический процесс, процесс FDM-печати предполагает наличие различных параметров, оказывающих большое влияние на время печати, качество и физико-механические свойства напечатанных изделий. Выбор правильного сочетания технологических параметров позволяет прогнозировать характеристики будущего изделия и управлять ими.

Все технологические параметры процесса FDM-печати можно условно разделить на три группы (рис. 3):

- параметры оборудования (геометрия экструдера);

- параметры обработки, обусловленные реологическими свойствами материала (температура камеры, температура экструзии, температура стола);
- структурные параметры печати (ориентация печати, толщина растра, ширина растра, заполнение, межрастровый зазор и т.д.).

1.2.1 Параметры оборудования

Как отмечалось выше, к параметрам оборудования относятся геометрические размеры экструдера – диаметр сопла и его ширина. Типичными размерами сопел являются 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8 и 1.0 мм. Очевидно, что через сопло большего размера будет выдавливаться больше материала в единицу времени, что позволит сократить время печати. С другой стороны, диаметр сопла оказывает существенное влияние на качество поверхности напечатанного изделия. Поэтому в настоящее время для печати сложных деталей используется сопла с диаметром менее 0.4 мм, а для деталей большего размера для сокращения времени печати – диаметром более 0.4 мм. Современные принтеры комплектуются сменными соплами, однако, в большинстве исследований диаметр сопла является величиной постоянной и составляет, как правило, 0.4, 0.6 мм.

1.2.2 Параметры обработки

Параметры обработки выбираются в зависимости от материала нити и типа принтера и включают в себя температуру экструзии, температуру камеры, температуру стола и скорость печати (см. рис. 3).

1.2.2.1 Температура экструзии

Вязкость расплавленного материала, выходящего из сопла, регулируется температурой экструзии. С повышением температуры экструзии вязкость расплавленного материала уменьшается. Это позволяет расплаву легче проходить через печатающую головку при меньшем перепаде давления. Повышение температуры экструзии также улучшает сплавление между последовательными растрами экструдированного материала, что повышает механическую прочность печатаемого изделия. При более высокой температуре часть полимера быстро разлагается и внутри сопла остается осадок, который может загрязнить дальнейший расплав.

1.2.2.2 Температура камеры

Очевидно, что температура камеры имеет значение только в случае оснащения принтера закрытым корпусом. Наличие корпуса может повысить производительность печати, не допуская попадания внутрь посторонних загрязнений и поддерживая температуру окружающей среды постоянной в течение всего цикла печати. Исследования влияния температуры камеры на характеристики изделий, напечатанных методом FDM, практически не проводятся в силу сильной зависимости данного параметра от типа используемого 3D-принтера.

1.2.2.3 Температура стола

Стол принтера обычно нагревается для улучшения сцепления первого слоя печатаемого изделия. Для достижения оптимальной адгезии печатаемого изделия со столом температуру стола рекомендуется поддерживать выше температуры стеклования материала нити. Системные исследования влияния температуры стола на характеристики изделий, напечатанных методом FDM, так же отсутствуют.

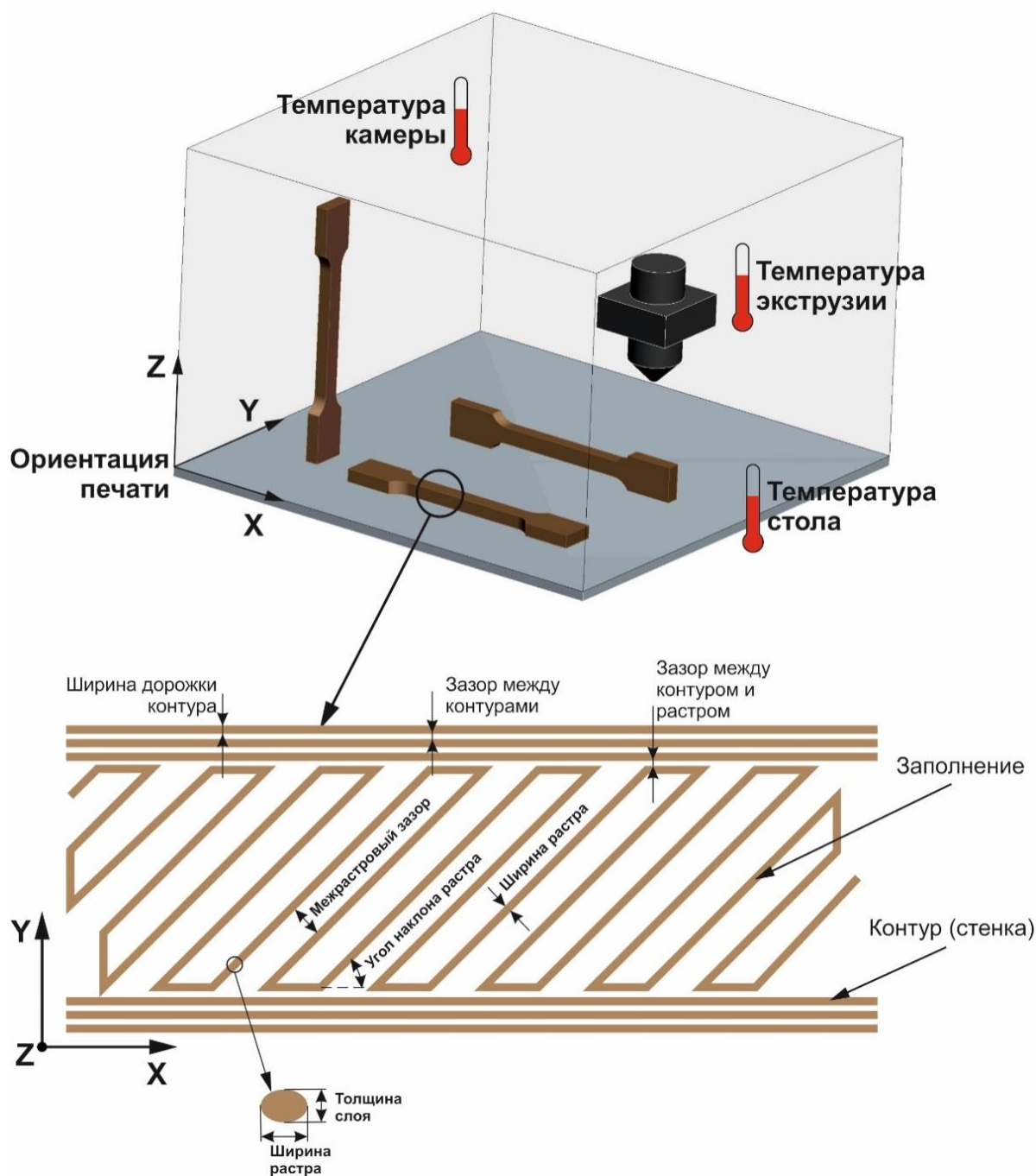


Рис. 3. Параметры процесса FDM-печати

1.2.2.4 Скорость печати

Скорость печати – это скорость перемещения печатающей головки вдоль плоскости XY во время выдавливания. Типичная скорость печати для FDM-принтера варьируется от 30 до 80 мм/с.

Скорость печати напрямую влияет на время печати изделия. С увеличением скорости сокращается время печати. Для получения более высокой точности рекомендуется использовать низкую скорость печати, так как при более высокой скорости увеличивается динамическое воздействие приводной системы, что приводит к резким движениям. Скорость также ограничена максимальным объемным расходом головки экструдера. Максимальную скорость можно рассчитать по уравнению:

$$V_{max} \frac{Q}{H_L \cdot B_R}, \quad (1)$$

где Q – максимальный объемный расход; H_L – высота слоя; B_R – ширина раstra.

Кроме этого, скорость печати влияет на тепловой цикл каждого слоя, и при увеличении скорости время, необходимое для нанесения следующего слоя, уменьшается. Увеличение скорости печати снижает скорость охлаждения, поскольку последующий слой наносится на предыдущий за меньшее время, что так же может влиять на механические свойства готового изделия.

1.2.3 Структурные параметры печати

Основными особенностями FDM-печати являются послойное изготовление и возможность получения пористых изделий. С этим особенностями связано появление структурных параметров печати. Эта категория параметров более обширна и не имеет ограничений на использование различных материалов. Структурные параметры печати представлены в нижней части рисунка 3.

1.2.3.1 Ориентация печати

Ориентация печати – это расположение печатаемого изделия на столе относительно системы координат принтера (см. рис. 3).

Ориентация печати является одним из ключевых технологических параметров, который оказывает существенное влияние на лестничный эффект на поверхности печатаемого изделия и необходимость создания и объем так называемых поддержек – вспомогательных несущих конструкций для нависающих элементов изделия. Лестничный эффект влияет на точность размеров и качество поверхности готового изделия. В то время как создание несущей конструкции увеличивает требования к постобработке, количеству материала и времени печати. Кроме этого, ориентация печати определяет направление, в котором, как правило, наблюдается наибольшая анизотропия механических свойств изделия. Это связано с тем, что при FDM-печати анизотропия свойств по оси Z является самой высокой из-за слабого межслойного сцепления.

1.2.3.2 Толщина слоя

Толщина слоя – это высота каждого слоя печати вдоль оси Z принтера. Типичная толщина слоя для FDM-принтеров варьируется от 0.05 до 0.4 мм. Рекомендуется, чтобы толщина слоя составляла $0.25 \div 0.8$ диаметра сопла.

Толщина слоя напрямую влияет на качество поверхности и время печати. При уменьшении толщины слоя лестничный эффект на поверхности сводится к минимуму, в то время как время печати увеличивается. При меньшей толщине слоя улучшается качество поверхности готового изделия. Кроме того, при меньшей толщине слоя программное обеспечение, используемое в 3D-печати, обеспечивает более точную разбивку CAD-модели на отдельные слои, что в конечном итоге устраняет потенциальные пустоты и зазоры. В ряде исследований отмечается так же, что меньшие значения толщины слоя повышают прочность на растяжение.

1.2.3.3 Ширина раstra

Ширина раstra – это ширина капли материала, выдавливаемого из сопла. Ширина раstra зависит от диаметра экструзионного сопла, объемного расхода и скорости печати. Замечено, что меньшие значения ширины раstra повышают прочность на растяжение.

1.2.3.4 Угол наклона раstra

Угол наклона раstra – это угол, под которым сопло перемещается для нанесения каждого слоя относительно оси X принтера (см. рис. 3). Именно этот параметр играет важную роль в формировании механических свойств и анизотропии готового изделия. Возможность варьировать значения угла наклона раstra от 0 до 90°, наносить последующий слой с изменением угла на 90° по сравнению с предыдущим предусмотрена в большинстве современных FDM-принтеров. Наиболее часто используемые значения углов наклона раstra – 0°/90°, 30°/-60° и 45°/-45°.

Изменяя угол наклона раstra, можно контролировать прочность, ударопрочность или механизм разрушения.

1.2.3.5 Параметры заполнения

Одним из преимуществ 3D-печати является возможность печати как сплошных, так и полностью или частично полых изделий. С точки зрения производства это не только снижает расход материалов, но и уменьшает конечный вес изделия.

Как правило, изделие представляет собой контур (оболочку) и внутреннюю область, называемую заполнением, с различными параметрами, к которым относятся: схема заполнения, плотность заполнения и межрастровый (воздушный) зазор (см. рис. 3).

С точки зрения физико-механических свойств готового изделия наибольший интерес представляют параметры заполнения.

Схема заполнения представляет собой рисунок (шаблон) укладки растров во внутренней области печатаемого изделия. Выбор схемы заполнения обычно производится в зависимости от времени печати и требуемых физико-механических характеристик изделия. Существует два типа шаблонов заполнения: 2D и 3D. В программном обеспечении для 3D-печати, как правило, доступно множество шаблонов обоих типов. На рисунке 4 представлены наиболее часто используемые 2D схемы заполнения.

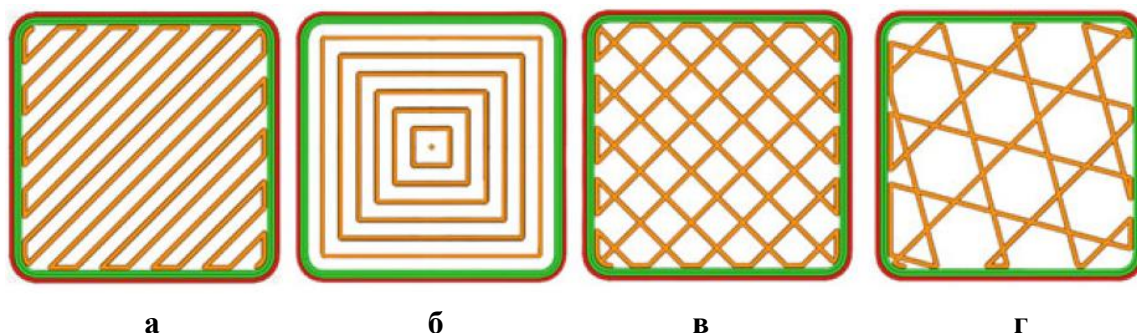


Рис. 4. Типовые 2D схемы заполнения для FDM-печати:

а – линейная; б – концентрическая; в – сетчатая; г - звездчатая

Параметром, тесно связанным со схемой заполнения, является плотность заполнения – процентное соотношение заполнения внутренней области изделия материалом нити.

Плотность может варьироваться от 0% (полностью пустотелая) до 100% (полностью твердая). Более высокая плотность заполнения обеспечивает более высокую прочность и вес детали. На рисунке 5 представлены различные варианты плотности заполнения для звездчатой схемы.

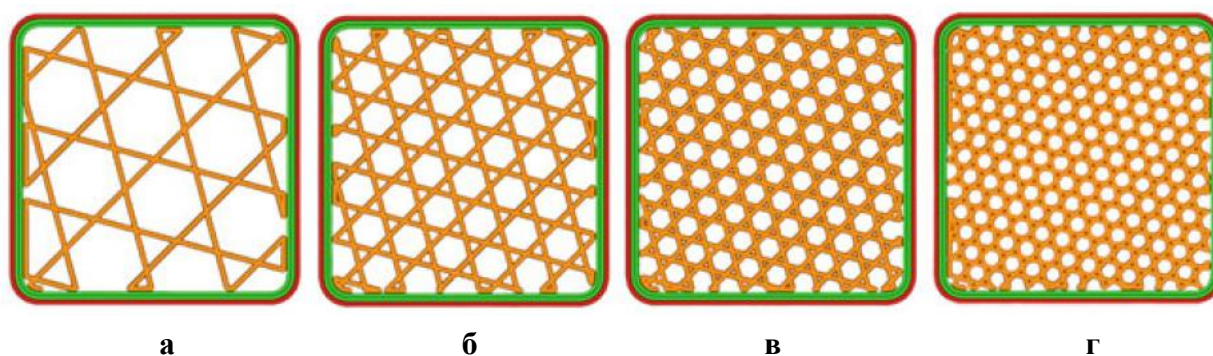


Рис. 5. Варианты плотности заполнения: а – 20%; б – 40%; в – 60%; г – 80%

Третьим параметром заполнения, оказывающим существенное влияние на физико-механические характеристики готового изделия, является межрастровый зазор – расстояние между соседними растрами в одном слое (см. рис. 3). Значение межрастрового зазора может быть положительным, нулевым или отрицательным (рис. 6). Положительное значение зазора – расстояние δ между двумя соседними слоями (рис. 6, а). В случае нулевого зазора два соседних растра соприкасаются, δ при этом равно 0 (рис. 6, б). При отрицательном зазоре соседние растры перекрывают друг друга на заданное значение δ (рис. 6, в).

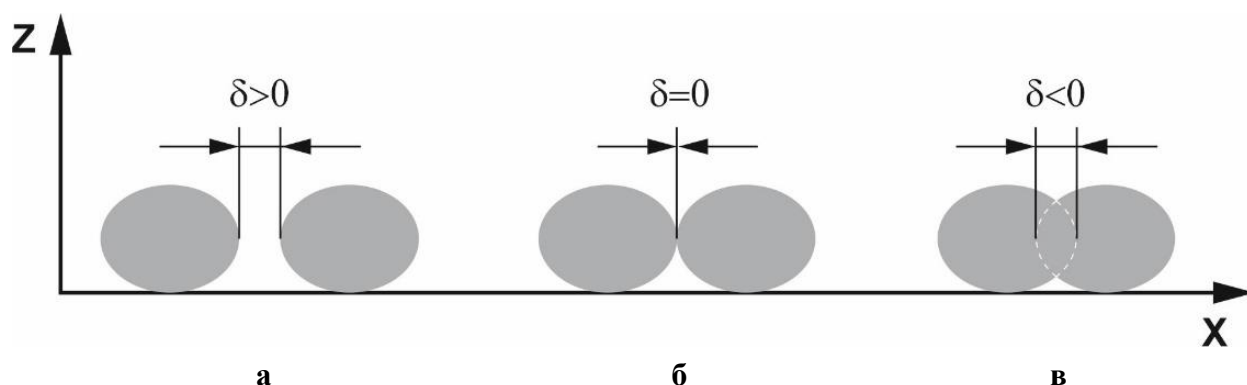


Рис. 6. Различные варианты значений межрастрового зазора δ :
а – положительное; б – нулевое; в – отрицательное

Очевидно, что при положительном зазоре создается менее плотная внутренняя структура, а время печати уменьшается. Наоборот – отрицательный зазор обеспечивает относительно плотную структуру при большем времени печати. Для улучшения механических свойств предпочтителен нулевой или отрицательный межрастровый зазор.

Таким образом, очевидно, что различные технологические параметры процесса FDM-печати прямым или косвенным образом влияют на время печати, механические характеристики, качество поверхности и точность размеров печатаемого изделия.

2. Объекты и средства исследования

Объектом исследований являются образцы в форме лопаток (рис. 7), напечатанные в соответствии с ГОСТ 11262-2017 на 3D-принтере при различных параметрах печати (Приложение).

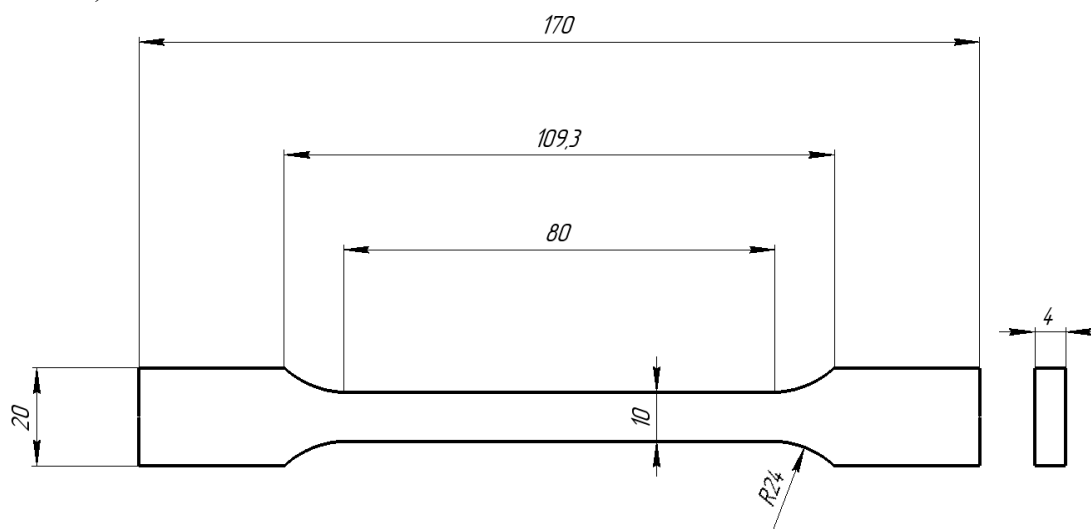


Рис. 7. Чертеж образца для испытаний на растяжение по ГОСТ 11262-2017

Исследования прочности на растяжение проводятся на универсальной испытательной машине РЭМ50А_РЭ в соответствии с ГОСТ 11262-2017 по стандартной методике.

3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими положениями.
2. Ознакомиться с техникой безопасности по работе на 3D-принтере.
3. Напечатать образцы из различных материалов при заданных параметрах печати (см. Приложение).
4. Произвести испытания прочности напечатанных образцов на растяжение.
5. Оформить отчет по лабораторной работе.

4. Контрольные вопросы к лабораторной работе

1. Опишите принцип FDM-печати?
2. Какие материалы являются наиболее используемыми при FDM-печати?
3. Что относится к параметрам оборудования при FDM-печати?
4. Какую форму имеют образцы для испытаний на растяжение?

5. Список литературы к лабораторной работе

1. Кравченко, Е. Г. Аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие / Е. Г. Кравченко, А. С. Верещагина, В. Ю. Верещагин. — М.: Ай Пи Ар Медиа, 2021. — 139 с. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/105721.html>. — Режим доступа: для авториз. пользователей
2. Антонова, В. С. Новейшие достижения аддитивных технологий: учебное пособие / В. С. Антонова, И. И. Осовская. — СПб: Санкт-Петербургский государственный университет

промышленных технологий и дизайна, 2019. — 60 с. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/102536.html>. — Режим доступа: для авториз. пользователей

3. Трофимов, А. В. Компьютерные технологии в машиностроении. Аддитивные технологии [Электронный ресурс]: учебное пособие / Трофимов А. В. — СПб: СПбГЛТУ, 2019. — 72 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/120060>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

4. Преображенская, Е.В. Технологии, материалы и оборудование аддитивных производств. Часть 1: Учебное пособие. / Преображенская Е. В., Боровик Т. Н., Баранова Н. С. — М.: РТУ МИРЭА, 2021. — 173 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/182471>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

5. Преображенская, Е.В. Технологии, материалы и оборудование аддитивных производств. Часть 2: Учебное пособие. / Преображенская Е. В., Зуев В. В., Мышечкин А. А. — М.: РТУ МИРЭА, 2021. — 164 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/182474>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

Приложение

Параметры печати для выполнения лабораторной работы

Температура печати, °С	235
Температура камеры, °С	105
Толщина слоя, мм	0.1; 0.2
Угол наклона растра, °	0; 45; 90
Скорость печати, мм/с	40
Количество слоев стенки	2
Количество слоев крышки	3
Количество слоев дна	3
Заполнение, %	60; 80; 100