

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технологии металлов»

МАТЕРИАЛЫ АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности
1-36 07 02 «Производство изделий
на основе трехмерных технологий»
очной и заочной форм обучения*

**МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ
ПОЛИМЕРОВ И ИЗДЕЛИЯ ИЗ НИХ**



Могилев 2023

УДК 669.01
ББК 30.3
М34

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «25» ноября 2022 г.,
протокол № 9

Составители: канд. техн. наук, доц. А. С. Федосенко;
А. С. Оленцевич

Рецензент А. Е. Науменко

В методических рекомендациях рассмотрены вопросы, связанные с материалами на основе металлов, применяемыми для изготовления изделий в области аддитивного производства. Отражены основные методы изучения структуры и свойств порошков и изделий.

Учебно-методическое издание

МАТЕРИАЛЫ АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА

Ответственный за выпуск	Д. И. Якубович
Корректор	Т. А. Рыжикова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2023

Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Определение температуры разложения термопластичных полимеров	4
2 Лабораторная работа №2. Определение температуры разложения терморективных полимеров.....	7
3 Лабораторная работа № 3. Определение зольности выжигаемых полимеров.....	10
4 Лабораторная работа № 4. Изготовление восковых моделей методом 3D-печати	14
5 Лабораторная работа № 5. Структура изделий из пластмасс, полученных послойным синтезом.....	18
6 Лабораторная работа № 6. Механические свойства пластмассовых материалов, полученных послойным синтезом	22
7 Лабораторная работа № 7. Композиционные пластмассы с волокнистыми и слоистыми наполнителями.....	26
8 Лабораторная работа № 8. Композиционные пластмассы с порошкообразными наполнителями.....	30
9 Лабораторная работа № 9. Механические свойства композиционных пластмасс с волокнистыми и слоистыми наполнителями.....	34
10 Лабораторная работа № 10. PLA- и ABS-пластики и их сравнительные характеристики	37
11 Лабораторная работа № 11. Химическая обработка пластмассовых изделий, полученных методами аддитивных технологий	40
12 Лабораторная работа № 12. Фотополимерные материалы, применяемые в области аддитивных технологий	44
Список литературы.....	48

1 Лабораторная работа № 1. Определение температуры разложения термопластичных полимеров

Цель работы: изучить процессы, протекающие с термопластическими полимерами в процессе термического разложения.

Оборудование и инструмент: трубчатая печь SNOL 0,5/1250, тигель керамический, весы аналитические RADWAG AS220, микроскоп тринокулярный стереомикроскоп Альтами, образец из терморезистивного полимера.

Общие сведения

Полимерные материалы в процессе эксплуатации могут терять свои свойства, разрушаться. Процесс разрушения полимеров называется деструкцией.

Этот процесс протекает с разрывом связей основной макромолекулярной цепи, что приводит к понижению молекулярной массы полимера, кроме того, возможно изменение химических и физических свойств. Деструкция – один из видов старения полимеров. Этот процесс необратим.

Основными разрушающими факторами для полимерных материалов в обычных условиях эксплуатации при атмосферных воздействиях являются окислители – кислород воздуха, озон и ультрафиолетовое излучение. При действии жидких агрессивных сред возможно их проникновение в надмолекулярную структуру и набухание полимера. При этом нарушаются силы сцепления между отдельными молекулами и его прочность резко снижается. Возможно разрушение и вследствие адсорбционного действия среды, когда поверхностно активные вещества при нагружении материала проникают в дефекты структуры, облегчая возникновение и развитие трещин.

Таким образом, разрушение полимерного материала под действием внешней среды обуславливается изменением его структуры, нарушением внутримолекулярных связей – обрывом цепей молекул, уменьшением их размеров. В то же время могут идти и обратные процессы – агрегирование пачек молекул, что приводит к повышению жесткости – хрупкости полимерного материала.

Виды деструкции:

1) химическая – протекает под действием химических реагентов (кислот, щелочей, кислорода, фенолов, аммиака;

2) механическая деструкция происходит при приложении механических напряжений. Возникающие при этом свободные радикалы вступают в различные химические реакции, что может приводить к образованию пространственных и даже сетчатых полимеров. При этом происходит изменение структуры и свойств полимеров;

3) окислительная деструкция происходит при одновременном действии кислорода и теплоты;

4) фотохимическая деструкция. Изделия из полимерных материалов при эксплуатации на воздухе всегда подвергаются действию света. Это приводит к их преждевременному старению, связанному с разрывом полимерной цепи под

действием энергии света. Фотохимическая деструкция зависит от продолжительности и интенсивности освещения.

С целью предупреждения или замедления процессов старения полимеров к ним добавляют различные стабилизаторы: антиоксиданты, фотостабилизаторы и т. п.;

5) термическая деструкция происходит при нагревании и в значительной степени зависит от химического строения.

Для предотвращения горючести или ее уменьшения к полимерам добавляют антипирены, из которых наибольшее распространение получили галогенсодержащие органические соединения: гексабромбензол, октабромдифенил и др.

Деструкция полимеров под действием тепла и химических сред.

Среди физических факторов, способных инициировать химические реакции в полимерах, тепловое воздействие занимает одно из первых мест и определяет их термостабильность – верхнюю температурную границу пределов эксплуатации.

Термический распад макромолекулярной структуры является одной из причин старения полимеров – ухудшения их механических свойств до опасного для дальнейшей эксплуатации уровня и выделения токсичных низкомолекулярных продуктов. Часто снижает сроки службы изделий из полимеров совместное воздействие теплоты и агрессивных сред.

При действии высоких температур большинство полимеров претерпевает деструкцию, т. е. распад макромолекул на более мелкие молекулы. В зависимости от химического строения макромолекул одни полимеры деполимеризуются полностью, т. е. разлагаются до мономеров, в других происходит случайный разрыв связей и образование устойчивых макромолекул пониженной молекулярной массы. Иногда отщепляются низкомолекулярные продукты за счет реакций боковых групп без существенного изменения исходной молекулярной массы или происходит беспорядочное сшивание макромолекул с образованием разветвленных и сетчатых структур. Скорости реакций радикальной полимеризации и деполимеризации возрастают с температурой и при некоторой температуре могут стать равными. Это можно установить по равенству вязкости растворов продуктов полимеризации и деструкции, что свидетельствует об одинаковой их молекулярной массе. Установлена важная зависимость характера продуктов деструкции от теплоты полимеризации. Деполимеризуются в основном до мономера полимеры с четвертичными атомами углерода в цепи и низкой теплотой полимеризации. Если полимер содержит в цепях вторичные и третичные атомы углерода и имеет высокое значение теплоты полимеризации (выше 60 кДж/моль), то при термической деструкции мономер практически не образуется, а процесс заканчивается образованием устойчивых макромолекул пониженной молекулярной массы. Цепной радикальный процесс термической деструкции включает в себя стадии инициирования, роста, передачи и обрыва реакционной цепи. Радикальные реакции передачи цепи идут за счет отрыва водорода от макромолекулы полимеров, содержащих атом водорода у третичного атома углерода или б-метиленовые группы у двойных связей. Такие полимеры, например полиметилакрилат, без двойных связей на концах макромолекул, почти не дают мономеров при термическом распаде.

Даже при одном термическом воздействии наблюдается большое разнообразие реакций и получающихся продуктов в зависимости от химического строения полимеров. Термическое воздействие может приводить к получению ценных и термостойких полимеров (ПВХ) и образованию систем сопряженных двойных связей в линейных макромолекулах (ПВХ, поливинилацетат), т. е. не к ухудшению, а к улучшению их качества.

Стойкость полимеров к термическому старению (термостабильность) оценивают по потере массы при нагревании и по составу летучих продуктов. Скорость термодеструкции характеризуется величиной массы полимера, разлагающегося за 1 мин при 350 °С, или температурой полураспада, при которой происходит потеря 50 % исходной массы за 40 мин. Термостабильность повышается при наличии шестичленных или конденсированных циклов или системы сопряженных кратных связей в основной цепи полимеров. Важная характеристика термической стойкости полимеров – температура начала термораспада. Сопоставление этих температур, полученных в инертной среде или вакууме, с теплотами полимеризации указывает на то, что чем меньше теплота полимеризации, тем ниже температура начала термораспада (таблица 1.1). Кислород резко активизирует термодеструкцию полимеров.

Таблица 1.1 – Теплоты полимеризации и температуры начала термораспада для различных полимеров

Полимер	Теплота полимеризации, кДж/моль	Температура начала термораспада, °С
Полиэтилен	91,9	320
Полистирол	71,0	310
Полипропилен	71,3	300
Полиакрилонитрил	71,1	298
Полиметилакрилат	83,6	292
Поли-б-метилстирол	39,7	260

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите основные виды деструкции.
- 2 Чем обусловлено разрушение материала под действием внешней среды?
- 3 Опишите процесс термической деструкции полимера.
- 4 Как определяется скорость термодеструкции полимера?
- 5 Как оценивают термостабильность полимера?

Ход работы

- 1 Нагреть печь до температуры 400 °С.
- 2 Получить образец полимера у преподавателя, взвесить с точностью до 0,001 г, затем поместить его в керамический тигель. Тигель поместить в нагретую печь.

3 После выдержки в течение времени, заданного преподавателем, извлечь тигель с образцом.

4 Визуально изучить общий вид образца после нагрева.

5 Взвешиванием определить разницу массы образца до и после нагрева.

6 Записать в отчет результаты изучения образца после деструкции, а также его массу до и после термического воздействия.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Основные теоретические положения.

3 Результаты наблюдений и измерений массы исследуемого образца.

2 Лабораторная работа № 2. Определение температуры разложения терморезистивных полимеров

Цель работы: изучить процессы, протекающие с терморезистивными полимерами в процессе нагрева до температуры деструкции

Оборудование и инструмент: трубчатая печь SNOL 0,5/1250, тигель керамический, весы аналитические RADWAG AS220, микроскоп тринокулярный стереомикроскоп Альтами, образец из терморезистивного полимера.

Общие сведения

К терморезистивным полимерам относят эпоксидные, фенолформальдегидные, полиэфирные и другие смолы. Всех их объединяет одно – при нагреве до определенной температуры они переходят в твердое, нерастворимое и неплавкое состояние. Эпоксидными смолами называют олигомеры, содержащие одну или более эпоксидных групп. Наиболее распространенной является эпоксидная диановая (ЭД) смола.

Эпоксидные смолы отверждают путем введения отвердителей или катализаторов, которые обеспечивают, в определенных условиях, образование трехмерной сетчатой структуры с химическими связями между макромолекулами.

Эпоксидные смолы широко используются в качестве компонентов клеев, красок, в заливочных и пропитывающих составах, в электротехнической и радиоэлектронной промышленности, авиакосмической отрасли, судостроении и машиностроении. Они широко используются в производстве ПКМ, в которых выступают в роли полимерного (терморезистивного) связующего.

Деструкция терморезистивных полимеров.

За счет прочной сшитой трехмерной структуры терморезистивные полимеры нерастворимы и тугоплавки, трудно поддаются деструкции, что, с одной стороны, позволяет изготавливать изделия, работающие в тяжелых условиях, а с другой – является главным препятствием для утилизации таких полимеров и изде-

лий на их основе. В промышленности существует несколько способов деструкции реактопластов. Ниже рассмотрены наиболее распространенные термические и химические методы.

Пиролиз фенолформальдегидных смол.

Основным продуктом при термическом разложении является углеродистый остаток. Так, при пиролизе фенолформальдегидных смол при температуре выше 600 °С образуется более 50 % углеродистого остатка и менее 30 % жидких продуктов.

Основными продуктами пиролиза фенолформальдегидной смолы являются фенол и метилзамещенные фенолы. В продуктах пиролиза также присутствуют H₂O, CO, CO₂, CH₄, C₂H₆, H₂, метанол и ароматические углеводороды.

Механизм пиролиза фенолформальдегидной смолы (ФФС).

Механизм деструкции ФФС протекает в три стадии. При этом основные процессы протекают при температурах 216 °С, 376 °С и 513 °С.

Для первой стадии пиролиза ФФС характерны реакции конденсации остатков метилольных групп, образовавшихся в процессе синтеза смолы, и конденсации фенольных групп с образованием эфирной связи. В результате происходит образование воды и непрореагировавшего олигомера.

Для второй стадии, протекающей при температуре 350 °С...450 °С, одним из продуктов разложения является вода.

На третьей стадии при температурах около 500 °С происходит разрыв метиленовой связи. Несмотря на то, что процесс проводится в инертной атмосфере, наличие карбонильной группы позволяет предположить, что протекает реакция аутоокисления метиленовой связи, обусловленная наличием радикалов ·ОН или воды, выступающих в роли окисляющего агента.

На последнем этапе происходит декарбоксилирование карбоксильной группы с образованием CO₂.

При 600 °С протекают реакции дегидрогенизации и карбонизации.

Сольволиз фенолформальдегидных и эпоксидных смол в водородно-норных растворителях.

В отличие от пиролиза при сольволизе, протекающем в среде водородно-норного растворителя, продукты не рекомбинируют, а стабилизируются водородом растворителя, способствуя увеличению выхода более низкомолекулярных продуктов деструкции фенолформальдегидных и эпоксидных смол. Высокая конверсия этих смол достигается при термическом разложении в таких водородно-норных растворителях, как 1,2,3,4-тетрагидронафталин (тетралин) и 9,10-дигидроантрацен. Практически полная конверсия новолачной смолы достигается при сольволизе с тетралином при 440 °С в течение 60 мин, при этом выход жидких продуктов составил 68 %, представленных преимущественно фенолом и крезолами. Полная деструкция эпоксидной смолы при термическом сольволизе достигалась при использовании в качестве растворителя как тетралина, так и декалина. Температура полной конверсии смолы составляет 400 °С...410 °С.

Механизм сольволиза эпоксидной смолы в среде водородно-норного растворителя может быть описан следующим образом. На первой стадии при нагревании выше 250 °С происходит дегидратация смолы с образованием аллильных

связей, которые подвергаются гомолитическому разрыву с образованием свободных радикалов, стабилизация которых происходит за счет переноса водорода от растворителя. При термическом сольволизе эпоксидной смолы в тетралине в интервале температур 320 °С...380 °С бисфенол А является основным продуктом термодеструкции, а при температурах выше 380 °С в продуктах преобладают фенол и *n*-изопропилфенол.

Сольволиз фенолформальдегидных и эпоксидных смол в сверхкритических жидкостях.

Сверхкритические жидкости являются высокоэффективными растворителями терморезактивных полимеров. Особенность таких растворителей заключается в отсутствии фазовой границы между жидкостью и газом, в результате чего растворитель приобретает характерную для жидкости растворяющую способность и свойственную газам подвижность молекул. В качестве растворителей в процессе сольволиза широко используются сверхкритические вода и спирты.

Для сольволиза эпоксидной смолы на основе бисфенола А, отвержденной фталевым ангидридом, использовался сверхкритический метанол при 250 °С...350 °С и 10 МПа. При этом структура отвержденной смолы разрушается при температурах выше 270 °С в течение 1 ч. Также полную деструкцию полимера вызывает термический сольволиз отвержденной аминами эпоксидной смолы на основе бисфенола А в среде сверхкритического пропанола при температуре выше 450 °С и давлении выше 5 МПа.

Как следует из изложенного выше, терморезактивные полимеры обладают высокой устойчивостью. Деструкция таких материалов активно протекает лишь при условии воздействия высоких температур и мощных органических растворителей. Это и делает терморезактивные полимеры ценными компонентами композиционных конструкционных материалов.

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите основные терморезактивные полимеры.
- 2 Чем отличается деструкция реактопластов от термопластов?
- 3 Опишите процесс пиролиза фенолформальдегидной смолы.
- 4 Опишите сущность процесса сольволиза реактопластов.
- 5 Опишите процесс сольволиза в сверхкритических жидкостях.

Ход работы

- 1 Нагреть печь до температуры 600 °С.
- 2 Получить образец полимера у преподавателя, взвесить с точностью до 0,001 г и поместить его в керамический тигель. Тигель поместить в нагретую печь.
- 3 После выдержки в течение времени, заданного преподавателем, извлечь тигель с образцом.
- 4 Визуально изучить общий вид образца после нагрева.
- 5 Взвешиванием определить разницу массы образца до и после нагрева.

6 Записать в отчет результаты изучения образца после деструкции, а также его массу до и после нагрева.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Основные теоретические положения.
- 3 Результаты наблюдений и измерений массы исследуемого образца.

3 Лабораторная работа № 3. Определение зольности выжигаемых полимеров

Цель работы: ознакомиться с методиками определения зольности полимерных материалов.

Оборудование и инструмент: трубчатая печь SNOL 0,5/1250, тигель керамический, весы аналитические RADWAG AS220, образец из терморезистивного полимера, химические реактивы, муфельная печь.

Общие сведения

Литье по выжигаемым моделям – одна из технологий точного литья. Способ применяется при изготовлении ответственных деталей в наукоемких отраслях промышленности (авиакосмической, судостроительной, оборонной, автомобильной и др.). Внедрение аддитивных технологий на литейном предприятии позволяет в значительной мере оптимизировать производственный процесс.

3D-печать дает возможность выращивать уникальные объекты сложной геометрии для получения высококачественных отливок. Модели, которые созданы для литья по выжигаемым моделям аддитивными методами, могут быть гораздо тоньше, чем стандартно производимые в пресс-формах из пенополистирола.

При выжигании применяется пластик (фотополимерная смола). Литье по выплавляемым моделям – процесс более точный, идеальный для создания небольших объектов с мелкими деталями (например, ювелирных изделий, стоматологических имплантатов). Если требуется получить модели больших размеров и повышенной прочности, применяется выжигание. Также надо отметить, что фотополимеры экономичнее воска.

Выращивание выжигаемых моделей на 3D-принтере производится методом лазерной стереолитографии (Stereolithography Apparatus, SLA) – когда жидкий фотополимер затвердевает под действием лазера или УФ-лампы – или струйного моделирования (MultiJet Printing, MJP) с помощью фотополимерного материала.

При выжигании, независимо от материала, в модели остается зола – сухой остаток от выгорания пластика. По этой причине необходимо использовать материалы с низким зольным остатком (не более 0,01 % от первоначального объе-

ма модели).

Для определения зольного остатка выжигаемых полимеров существует стандартная методика, которая описывается ГОСТом 15973–82. Анализ включает ряд операций.

Для анализа требуется печь муфельная, обеспечивающая регулирование температуры в диапазонах $(600 \pm 25) \text{ }^\circ\text{C}$; $(750 \pm 50) \text{ }^\circ\text{C}$; (850 ± 50) ; $(950 \dots 1050) \text{ }^\circ\text{C}$; эксикатор, заполненный хлористым кальцием, либо другим осушителем, не взаимодействующим с золой; тигли кварцевые или фарфоровые низкие, стаканчики для взвешивания (бюксы).

Подготовка к анализу

Массу пробы указывают в нормативно-технической документации на конкретную продукцию. Если такие указания отсутствуют, то массу пробы выбирают по таблице 3.1 в зависимости от предполагаемой массовой доли золы.

Таблица 3.1 – Масса пробы

Предполагаемая массовая доля золы, %	Масса пробы, г	Предполагаемая масса золы, мг
0,002...0,01	Не менее 200	От 2 до 50
Св. 0,01 до 0,05	100	От 10 до 50
0,05...0,10	50	От 25 до 50
0,10...0,20	25	От 25 до 50
0,20	Не более 10	От 20 до 50

Если предполагаемая массовая доля золы неизвестна, то проводят предварительное ее определение.

Пробу взвешивают с погрешностью не более 0,0002 г в бюксе, предварительно взвешенной с той же погрешностью.

Пробу переводят в тигель (чашку), предварительно прокаленный до постоянной массы, охлажденный в течение 1 ч в эксикаторе и взвешенный с погрешностью не более 0,0002 г. Бюксу после этого снова взвешивают с той же погрешностью и точную массу пробы вычисляют по разности первого и второго взвешиваний.

Тигель (чашка) должен быть заполнен не более чем наполовину объема по высоте. Пробы пластмасс с низкой насыпной плотностью перед анализом таблетуют. Допускается пробу взвешивать непосредственно в тигле (чашке), если она вся помещается в нем.

1 Определение золы.

Метод заключается в озолении пробы пластмассы и последующем прокаливании остатка в муфельной печи до постоянной массы.

Проведение анализа.

Пробу равномерно распределяют по основанию тигля и осторожно нагревают до полного озоления, не допуская воспламенения пробы. После озоления

тигель помещают в муфельную печь и прокаливают в течение 30 мин при температуре, указанной в нормативно-технической документации на конкретную продукцию, затем охлаждают в эксикаторе в течение 1 ч и взвешивают. Прокаливание повторяют до тех пор, пока разность результатов двух последовательных взвешиваний будет не более 0,0002 г.

2 Определение сульфатной золы (метод А).

Метод заключается в озолении пробы, последующем добавлении серной кислоты (для превращения окислов и солей металлов в их сульфаты) и прокаливании остатка в муфельной печи до постоянной массы.

Проведение анализа.

Пробу материала озоляют в соответствии с вышеизложенной методикой.

После озоления пробы и ее охлаждения в тигель (чашку) прибавляют по каплям раствор серной кислоты до полного увлажнения золы, избегая бурной реакции. Тигель (чашку) осторожно нагревают до удаления паров серной кислоты. Если после охлаждения заметны следы обуглившейся пластмассы, то добавляют от 1 до 5 капель раствора азотнокислого аммония и снова осторожно нагревают до удаления паров. После охлаждения пробы добавляют от 1 до 5 капель серной кислоты и осторожно нагревают до удаления паров серной кислоты. Пробу охлаждают и добавляют от 1 до 5 г углекислого аммония для нейтрализации избыточной серной кислоты и осторожно нагревают, избегая потерь золы, до удаления паров, после чего тигель (чашку) помещают в муфельную печь и прокаливают.

Метод определения золы применяется для анализа полистирольных пластмасс и полиолефинов, полученных на каталитических системах, не дающих летучих компонентов при сжигании.

При определении золы по этому методу тигель с пробой помещают в муфельную печь, предварительно нагретую до $(400 \pm 50)^\circ\text{C}$ и медленно сжигают пробу, избегая воспламенения, постепенно поднимая температуру до $(600 \pm 50)^\circ\text{C}$. После полного сгорания пробы температуру печи повышают до $(850 \pm 50)^\circ\text{C}$ и прокаливают остаток в течение 30 мин при анализе полиэтилена, 1 ч – полистирола. После чего анализ заканчивают аналогично первой методике.

3 Определение сульфатной золы (метод Б).

Метод заключается в озолении пробы, предварительно обработанной серной кислотой, и последующем прокаливании остатка в муфельной печи до постоянной массы. Этот метод применяется в случае наличия в пластмассе летучих соединений металлов.

Проведение анализа.

До начала озоления в тигель с пробой добавляют концентрированную серную кислоту до полного смачивания пробы, накрывают тигель крышкой таким образом, чтобы имелась возможность удаления паров серной кислоты без потерь золы, и проводят озоление пробы в пламени горелки.

При испытании пластмасс, в процессе озоления которых возможно пенообразование, тигель помещают в отверстие асбестовой пластины так, чтобы пламя не охватило всего тигля, и осторожно озоляют пробу. После озоления тигель по-

мещают в муфельную печь и прокаливают в соответствии с методикой, изложенной выше.

Метод В определения сульфатной золы применяется для анализа поливинилацетатных пластмасс, пентапластов и полиолефинов, полученных на каталитических системах, дающих летучие компоненты при сжигании.

При определении сульфатной золы по методу В в платиновый тигель (чашку) с пробой вводят серную кислоту до полного смачивания пробы и ставят в муфельную печь, предварительно нагретую до $(400 \pm 50)^\circ\text{C}$, постепенно повышая температуру до $(600 \pm 50)^\circ\text{C}$, избегая воспламенения (возможного пенообразования), до полного разложения пластмассы и удаления белых паров. Затем температуру повышают до $(850 \pm 50)^\circ\text{C}$ или выше (в зависимости от указаний на материал) и прокаливают остаток в течение 1 ч. Остаток, охлажденный до температуры ниже 100°C , смачивают раствором азотнокислого аммония и после нагревания и удаления его паров снова прокаливают при той же температуре в течение 30 мин. После чего анализ заканчивают согласно первой методике.

При анализах допускается уменьшение массы навески до 20 % от указанной в таблице 3.1.

Массовую долю золы в процентах вычисляют по формуле

$$X = \frac{m_1}{m_0} \cdot 100, \quad (3.1)$$

где m_1 – масса золы после прокаливания в муфельной печи, г;

m_0 – масса пробы, г.

За результат анализа принимают среднее арифметическое значение не менее двух определений, которое не должно отличаться более чем на 10% от минимального значения при доверительной вероятности $p = 0,95$, и округляют до второго десятичного знака, если в нормативно-технической документации на конкретную продукцию нет иных указаний.

Контрольные вопросы

- 1 Для чего используют выжигаемые модели?
- 2 Опишите процесс подготовки образцов для определения зольности.
- 3 Опишите процесс определения сульфатной золы (метод А).
- 4 Опишите процесс определения сульфатной золы (метод Б).
- 5 Как определяют массовую долю золы?

Ход работы

- 1 Получить образец полимера для определения содержания золы в нем.
- 2 Пробу медленно нагревать до полного озоления, не допуская воспламенения.
- 3 После озоления тигель поместить в муфельную печь и прокалить в течение 30 мин при температуре 600°C .

- 4 Охладить тигель с пробой в эксикаторе в течение 40 мин и взвесить.
- 5 В соответствии с п. 1 определить массу сульфатной золы по методу А.
- 6 Полученные результаты занести в отчет.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Основные теоретические положения.
- 3 Результаты измерений.

4 Лабораторная работа № 4. Изготовление восковых моделей методом 3D-печати

Цель работы: ознакомиться с процессом изготовления отливок литьем по выплавляемым моделям, изготовленным с применением аддитивных технологий.

Оборудование и инструмент: формовочная смесь для литья по выплавляемым моделям, образцы восковых моделей, муфельная печь, сплав Вуда.

Общие сведения

Основное назначение данного способа аддитивного производства – получение одноразовых восковых моделей, предназначенных для изготовления изделий высокой точности методом литья по выплавляемым моделям.

Литье по выплавляемым моделям – это способ получения фасонных отливок из металлических сплавов в неразъемной, горячей и негазотворной оболочковой форме, рабочая полость которой образована удалением литейной модели выжиганием, выплавлением или растворением. При этом способе литья в пресс-формы (обычно металлические) запрессовывают легкоплавкий модельный состав (парафин, стеарин, церезин, буроугольный воск, жирные кислоты, озокерит и др.), который после затвердевания образует модели деталей и литниковой системы.

Этот метод используется для производства изделий из разных сплавов. Обеспечивается показатель качества до $\pm 0,005$ мм на каждые 25 мм поверхности. Указанная точность позволяет изготавливать изделия, которые не требуют дополнительной обработки. Залог успешности технологического процесса в том, что модель производится из быстро плавящегося вещества.

Технологический процесс состоит из операций.

1 Производство модели.

В качестве филамента в восковом принтере не используется натуральный воск, а только специальный воскоподобный материал с низкой температурой плавления.

Для 3D-печати воском современные принтеры используют одну из трех технологий: MJM, FDM, DoD.

MJM (Multi Jet Modeling). Ее основной особенностью является то, что для печати выступающих частей изделия используются поддерживающие опоры. После окончания процесса 3D-печати эти конструкции легко удаляются.

Печать на 3D-принтере, работающем по MJM-технологии, осуществляется в следующем порядке.

Через сопла малого диаметра, расположенные рядами на печатающей головке, подается нагретый до температуры плавления материал.

Головка перемещается в горизонтальной плоскости и наносит материал послойно на рабочую поверхность стола.

Каждый слой застывает один за другим.

Для создания восковок по технологии многоструйной печати используют литьевой воск или полимер VisiJet.

Технология позволяет получать высококачественные восковые литейные модели, которые могут применяться в машиностроении, сталелитейном производстве, строительстве и дизайне.

FDM (Fused Deposition Modeling). Это технология послойного наплавления пластика. Используется тугоплавкий литейный воск или воскоподобный пластик, такой как WAX 3D или аналог. Важной особенностью FDM-технологии является возможность формировать модели с точностью до 0,05 мм всего за несколько часов.

При печати по FDM-технологии нагретый до температуры плавления филамент поступает в экструдер и укладывается слоями на печатную платформу в виде заданной трехмерной модели.

DoD (Drop on Demand). Технология схожа с той, которая применяется в струйном принтере, но с отличием в виде использования операции фрезерования. Это приспособление корректирует каждый слой филамента перед нанесением следующего.

Процесс печати восковой модели по технологии DoD выглядит следующим образом.

Расплавленный воскоподобный филамент подается на печатающую головку под давлением и выдавливается через микросопла.

Слой заготовки и опоры наносится на рабочий стол.

Фреза горизонтально срезает выступы, образовавшиеся на напечатанном слое. Так до конца печати поочередно повторяются процессы нанесения слоя воска и удаления выступов.

Устройства, работающие по технологии DoD, находят применение в ювелирном деле, т. к. она позволяет печатать детали сложной формы с высоким разрешением и детализацией (рисунок 4.1).

2 Сборка моделей в блоки. Для производства качественного изделия полученные на принтере модели собираются в простые и сложные блоки, в каждый из них может войти от 2 до 100 штук. Для увеличения прочности в блочную конструкцию устанавливают алюминиевые стойки. Их покрывают слоем модельного вещества. Блочные конструкции объединяются в литниковую систему.



Рисунок 4.1 – Образцы восковых моделей

3 Нанесение на модель огнестойкой оболочки. Блок, собранный из нескольких моделей, помещается в емкость, где находится суспензия из керамики (кварцевая пыль, мелкие фракции шамота) и связывающего компонента (этилово силикатного раствора). На протяжении суток он сушится в естественной среде, это время можно сократить до 40 мин под воздействием аммиака. Таким образом, на указанный блок поочередно наносится несколько слоёв огнезащитной оболочки, с тщательной просушкой каждого из них. Далее завершённая модель в огнезащитной оболочке помещается в воду, нагретую до 90 °С. За несколько минут модельное вещество растает и всплывет на поверхность воды, где оно собирается для следующего применения.

4 Подготовка формы к заливке. Пустая оболочка промывается в воде и сушится в шкафу на протяжении 2 ч при 200 °С. Затем сухая оболочка выставляется вертикально в жаростойкую опоку и по краям уплотняется кварцевым песком, помещается в печь на 2 ч при 950 °С. В печи испаряется оставшаяся влага, остатки модельного состава выгорают, оболочка спекается с огнеупорным материалом, повышая прочность. Расплавленный металл заливается в прокалённую горячую форму.

5 Охлаждение отливки. После того как отливка остыла, оболочка разрушается. Изделие очищается от ее остатков, для чего поддается химической очистке. Далее изделие промывается водой и подвергается окончательной сушке.

Литьё по выплавляемым моделям имеет свои *преимущества*: отсутствие разъема в форме приводит к повышению точности литья; простота действий и дешевизна рабочего процесса; возможность сделать огромное разнообразие форм для отливки; широкий диапазон размеров и массы отливок; возможность получить сложные конструкции из любых сплавов; высокая точность изделия и чистота поверхностного слоя может исключить необходимость последующей механической обработки; оболочка легко разрушается; отливки хорошо очищаются от ее остатков.

В то же время есть и *недостатки*: требует осторожности в ходе проведения технологического процесса литья; длительность рабочего процесса подготовки формы; данное производство является рентабельным только при его массовом применении; необходимость проветривания в помещении; следует строго придерживаться технике безопасности; работа с расплавленным металлом требует

особого внимания.

Преимущества восковых 3D-принтеров: высокая скорость печати; высокая степень детализации для производства геометрически сложных изделий (толщина напечатанного слоя – до 16 мк); возможность одновременного изготовления деталей разной конфигурации на одной платформе; идеальная точность моделей (до 0,1016 мм на 25,4 мм размера детали); удобство и простота в работе; возможность непрерывной эксплуатации.

С помощью 3D-печати воском создают функциональные прототипы, формы для технологической оснастки и мастер-модели для литья по выплавляемым моделям. Ее используют для создания промышленных компонентов в автомобильной и авиакосмической индустрии, машиностроении и приборостроении, изделий ювелирной и часовой промышленности, протезов и других медицинских приспособлений, предметов искусства, сувениров.

Контрольные вопросы

- 1 В чем заключается способ литья по выплавляемым моделям?
- 2 Опишите применяемые способы получения выплавляемых моделей аддитивными технологиями.
- 3 Опишите процесс нанесения на модель огнестойкой оболочки.
- 4 В чем заключается подготовка формы к заливке металла?
- 5 В чем преимущества использования принтеров, печатающих воском?

Ход работы

- 1 Изучить легкоплавкую модель, изготовленную на 3D-принтере.
- 2 Получить у преподавателя разовую форму, полученную с использованием легкоплавкой модели, изготовленной на 3D-принтере.
- 3 Нагреть печь до $t \sim 110$ °С, поместить в нее тигель со сплавом Вуда.
- 4 После полного расплавления сплава залить расплав в форму, подогретую до $t \sim 90$ °С...95 °С.
- 5 После кристаллизации отливки аккуратно разрушить форму и извлечь отливку.
- 6 Оценить качество полученной отливки.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Основные теоретические положения.
- 3 Описание качества полученного изделия.

5 Лабораторная работа № 5. Структура изделий из пластмасс, полученных послойным синтезом

Цель работы: ознакомиться с особенностями структуры изделий, получаемых послойной печатью термопластичных полимеров.

Оборудование и инструмент: образцы изделий из полимерных материалов, стереомикроскоп.

Общие сведения

Физико-механические свойства изделий во многом зависят от макро- и микроструктуры изделий, получаемых послойным синтезом, на которые, в свою очередь, большое влияние оказывают технологические режимы печати. Структура изделия характеризуется плотностью, выражаемой в процентном содержании материала во внутреннем объеме изделия, формой и относительным размером структурных элементов (в частности, отношением размера ячейки к толщине стенки между ячейками). Во многом она зависит от технологических параметров процесса получения изделий (расстояние между торцевой поверхностью экструдера и изделием, температура подаваемого материала, диаметр форсунки, скорость подачи, условия окружающей среды, влияющие на скорость и характер затвердевания материала, и т. д.).

Получаемые изделия различаются по плотности (степени заполнения внутренней части объекта). Различают изделия с заполненностью, близкой к 100 %, и частично заполненные, в которых объем полимера может составлять менее 10 % объема всей детали.

Изготовление пустотелых деталей позволяет существенно уменьшить расход материала, однако это неизбежно ведет к снижению прочностных характеристик. Помимо этого, прочность может существенно снижаться в результате образования различных структурных неоднородностей.

Как правило, получение изделий с плотностью, близкой к 100 %, крайне затруднительно и возможно лишь при таких способах производства, как стереолитография. Широко используемая FDM-печать позволяет получать лишь изделия с условной 100-процентной плотностью. При этом, помимо различных дефектов внутреннего строения, для данной технологии характерно появление дефектов поверхности (макродефектов), что может оказывать существенное влияние на прочностные характеристики изделий, их точность и эстетический вид.

1 В изделиях из полимеров чаще всего встречаются следующие несовершенства внутренней структуры.

Наличие пустот в XY-плоскости может быть обусловлено выдавливанием недостаточного количества пластика, несоблюдением минимального числа слоев в горизонтальных стенках, а также выбором слишком малого заполнения (рисунок 5.1, а).

Для предотвращения данного недостатка структуры необходимо выбирать толщину стенки не менее 0,5 мм, а также выбрать показатель заполнения

образца не менее 30 %.

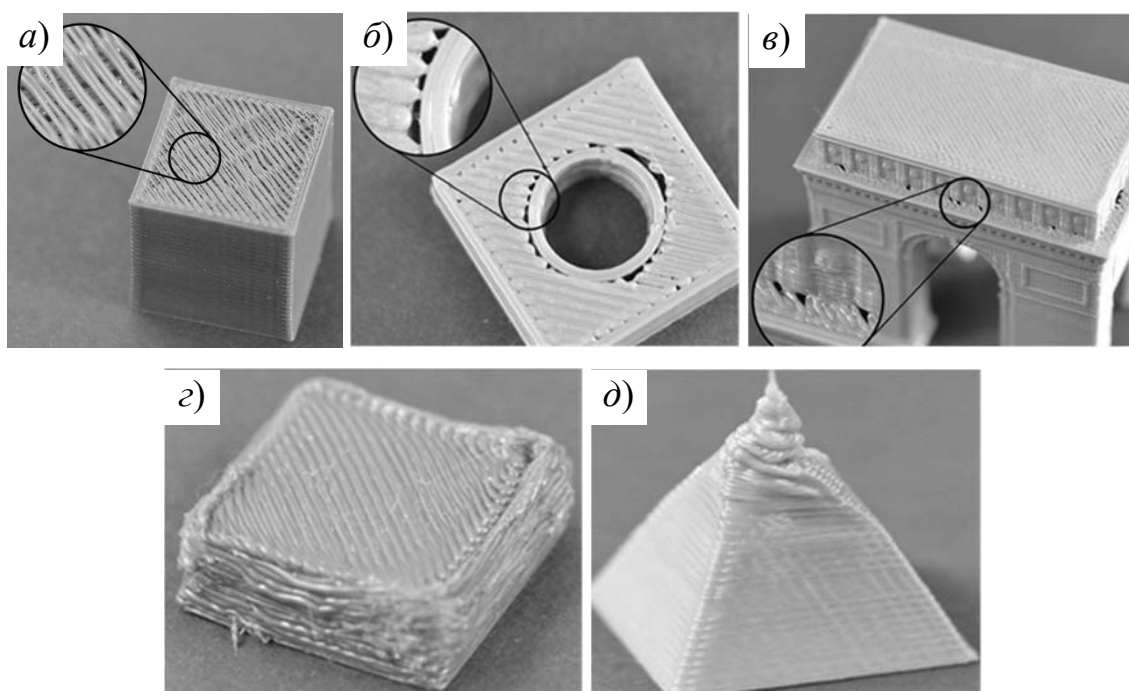


Рисунок 5.1 – Вид нарушения структуры и формы изделий из термопластов

Зазоры в виде пустот и пор между внутренними частями слоя и линиями по периметру. Это может наблюдаться в случае выбора сопла большого диаметра, установки большой толщины слоя, а также при выборе высокой скорости печати (рисунок 5.1, б).

Решение данной проблемы достигается установкой нахлеста внутреннего слоя на линии периметра. Эта величина определяется в процентах от диаметра отверстия сопла. Если установлена высокая скорость, то внутренние слои будут не успевать связываться с линией периметра. В таком случае необходимо снизить скорость перемещения экструдера.

Наличие истончений, пропусков и отверстий во внутренних углах модели возникает в случае отсутствия опоры в ходе перехода на следующий слой или же при отсутствии нахлеста следующего слоя на предыдущий (рисунок 5.1, в). По этой причине появляются такие места, где материал вообще может отсутствовать.

Дефект может быть чисто эстетическим. Однако на повышенных требованиях к механическим свойствам изделия он способен оказывать ощутимое отрицательное влияние. В частности, будет снижаться прочность. Избежать появления подобных недостатков в изделии можно увеличением степени заполнения или толщины стенок по периметру.

2 К недостаткам изделий на макроскопическом уровне относятся различные отклонения от заданных геометрических параметров, искажение формы, деформация, расслоение, наличие выступов материала и т. д.

Нарушение геометрии изделий и структуры поверхности может быть связано с неправильными настройками оборудования, вызывающими чрезмерную подачу материала в область построения (рисунок 5.1, *з*).

Данная проблема решается уменьшением расхода пластика. В то же время появление данного дефекта свидетельствует о необходимости замены ряда деталей оборудования.

Существенное влияние на качество поверхности изделий оказывает и температурный режим его печати. В первую очередь это касается перегрева самого изделия и конструкционного материала.

Соблюдение температурного режима для конкретных типов пластика играет очень важную роль в корректной работе 3D-принтера. Если установлен неправильный температурный режим, то пластик после выдавливания из экструдера будет не застывать, а течь и велика вероятность деформации модели. Такое явление часто наблюдается при печати вершин деталей (рисунок 5.1, *д*), где слои накладываются в короткий промежуток времени, и пластик не успевает остыть. Решается данная проблема несколькими способами: уменьшением температуры на 5 °С...10 °С; увеличением или уменьшением мощности вентилятора; установкой дополнительного вентилятора; снижением скорости печати на определенных участках; добавлением еще одной модели в рабочую зону для печати, пока будет печататься слой во второй модели, он успеет застыть.

Расслоение возникает в тех случаях, когда слои не связываются между собой достаточно прочно (рисунок 5.2, *а*). Причинами может быть слишком большая высота слоя или низкая температура полимера. Рекомендуется выбирать толщину слоя 80 % от диаметра сопла и правильно выбирать температуру печати, которая зависит от типа полимера.

Деформация и отслоение от модельной плиты (рисунок 5.2, *б*) обусловлено в первую очередь плохой адгезией полимера к основанию. Для снижения риска появления данного дефекта необходимо, по возможности, обеспечить подогрев основания, а также снизить скорость остывания изделия. В первую очередь это касается первых слоев, отвечающих за силу сцепления материала изделия с основой.

Причиной появления выступов на горизонтальных стенках изделия (рисунок 5.2, *в*) могут являться некачественные материалы, температурные колебания, проблемы с механической частью оборудования.

Деформация углов и краев детали (рисунок 5.2, *г*) зачастую связана с перегревом пластика. Он не успеет остыть до накладки следующего слоя. В результате могут возникать деформации. Чаще всего подобные явления наблюдаются в тех местах, где время между наложением слоев минимальное. Устранить данный дефект можно подбором минимального времени, за которое формируется один слой.

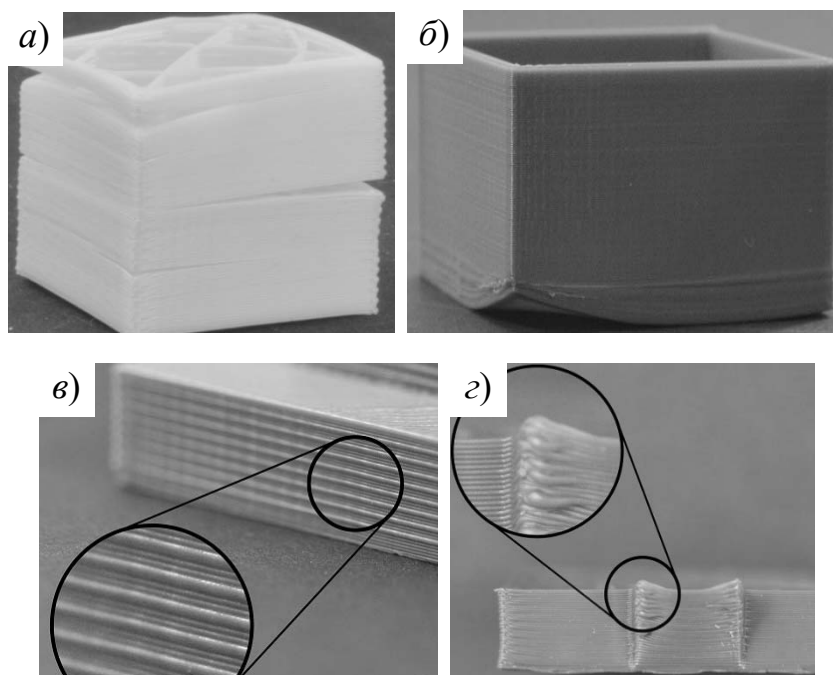


Рисунок 5.2 – Вид отклонений от формы изделий из термопластов

Контрольные вопросы

- 1 Какие факторы влияют на структуру изделий?
- 2 Укажите причины возникновения и пути устранения пустот и пор в изделиях.
- 3 Что является причиной искажения геометрии изделий?
- 4 Укажите пути предотвращения отслоения изделия от платформы.
- 5 Назовите причину деформации краев и углов детали.

Ход работы

- 1 Получить у преподавателя изделия из полимеров.
- 2 С помощью визуального осмотра, а также стереомикроскопа определить наличие отклонений структуры и формы в образцах.
- 3 Описать обнаруженные дефекты с указанием возможных причин их появления и способов их предотвращения.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Основные теоретические положения.
- 3 Описание обнаруженных отклонений в структуре и форме изделий из термопластов, с указанием их причин и путей предотвращения.

6 Лабораторная работа № 6. Механические свойства пластмассовых материалов, полученных послойным синтезом

Цель работы: ознакомиться с основными факторами, влияющими на механические свойства изделий из термопластов.

Оборудование и инструмент: полимерные образцы для испытания на разрыв, испытательная машина Kason WDW-1.

Общие сведения

Одним из наиболее широко используемых способов получения трехмерных изделий из полимерных материалов является метод послойного наплавления, имеющий условное обозначение FDM от англ. *fused deposition modeling*. При этом методе термопластичная полимерная нить (филамент (filament)) подается в экструзионную головку 3D-принтера, в которой нагревается до вязкотекучего состояния и выдавливается через сопло диаметром 0,1...0,3 мм по заданной траектории на неподвижное основание. Последующие слои укладываются на предыдущие и затвердевают по мере охлаждения. Физико-механические свойства изделий, полученных с использованием данной технологии, в значительной степени зависят от технологических параметров процесса печати, свойств и состава материала. Свой вклад вносят фазовые переходы в материале, происходящие в результате размягчения и последующего затвердевания.

В изделиях, полученных данным способом, максимальная прочность достигается при совпадении направлений оси перемещение экструдера (направление формирования дорожки расплава) и действующего напряжения. В случае приложения нагрузки под углом относительно оси дорожек прочность может снижаться до 60 % при ориентации $\pm 45^\circ$ (таблица 6.1). В случае печати слоев с ориентацией $0^\circ/90^\circ$ прочность снижается на 15 %...25 %. Это связано с существенным вкладом в прочностные характеристики изделий связи между соседними дорожками расплава. Качество контакта во многом зависит от степени остывания ранее наплавленного материала, которая определяет вероятность появления пор, пустот, а также несплавленных участков между соседними дорожками и идущими друг за другом слоями полимера. Таким образом, температура в камере оказывает существенное влияние, определяя скорость остывания полимера и среднюю температуру в точке формирования дорожки.

Уменьшение шага построения в горизонтальной плоскости сокращает расстояние между соседними дорожками, что приводит к их частичному перекрытию, в результате чего прочность изделий увеличивается (рисунок 6.1).

С увеличением толщины слоя прочность материала снижается, что объясняется увеличением общей пористости за счет образования более крупных пустот между накладываемыми валиками материала (рисунок 6.2).

Одним из путей увеличения прочности изделий является подбор схемы печати. Большое влияние на общую прочность изделия оказывает структура контура объекта. При этом чем толще контурный слой, состоящий из дорожек,

наплавленных исключительно в продольном направлении (угол ориентации [0]), тем выше прочность. Этот технологический прием позволяет увеличить прочность изделий до 20 %.

Таблица 6.1 – Влияние ориентации наплавляемых слоев полимера на прочность образцов из АБС-пластика

Материал	Настройка принтера	Прочность при растяжении/модуль упругости, МПа, при ориентации			
		[0]	[45]	[90]	[±45]
АБС – пластик, минеральное масло, воск	Заводские	25,5/987	15,6/741	14,35/738	18,9/768
АБС – пластик марки Р 400	То же	24,18/1486	9,4/1042	8,55/1041	15,3/1282
	То же	20,6	7,1	9,3	13,7
	Параметр <i>air gap</i> 0	21,5	–	12,7	16,5
	Параметр <i>air gap</i> – 0,05 мм	19,2	–	2,5	13,4

Влияние настроек принтера на прочность при растяжении АБС-пластика

Ширина нити, мм	Настройка параметра <i>air gap</i> , мм	Прочность при растяжении, МПа
0,2032	-0,00254	32,56
0,2032	0,5588	6,52
0,5588	-0,00254	24,81
0,5588	0,5588	10,44

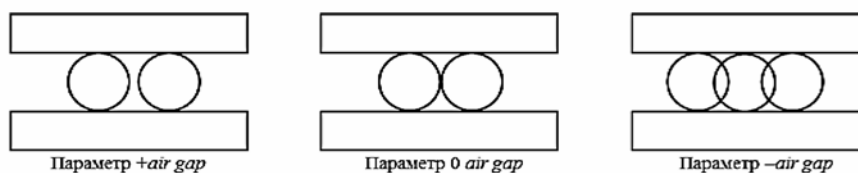


Рисунок 6.1 – Изменение прочности материала в зависимости от настроек процесса печати изделия

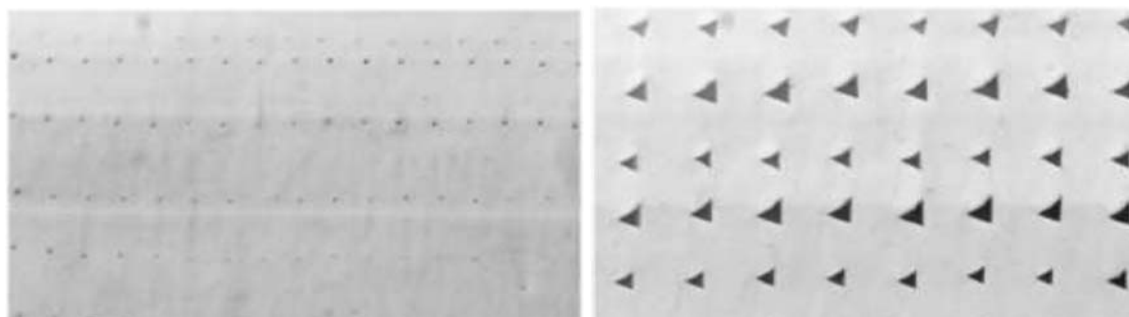


Рисунок 6.2 – Влияние толщины слоя полимера на пористость изделия;

Оптимизацией схемы и параметров печати возможно существенное увеличение прочности изделий. Так, прочность изделий из АБС-пластика марки Р430 может достигать 32...35 МПа при модуле упругости 2...2,25 ГПа вне зависимости от ориентации оси дорожки печати относительно направления приложения

нагрузки при растяжении, что сопоставимо со значениями, характерными для образцов, полученных литьем под давлением.

При изготовлении изделий, внутренняя часть которых имеет несплошное заполнение, на механические свойства оказывает влияние форма и размер внутренних перегородок, формирующих сотовую структуру. Наибольшую прочность показывают изделия, внутренняя структура которых состоит из шестигранных сот. Меньшая прочность у изделий с прямоугольными или ромбовидными ячейками.

Чтобы получить высокопрочные изделия традиционный АБС заменяют такими материалами, как полиэфиримид, полифениленсульфид, полифениленсульфон, полиэфирэфиркетон, жидкокристаллический ароматический полиэфир.

Полиэфиримид обладает высоким уровнем прочностных и термомеханических свойств, не поддерживает горения. Использование FDM-технологий позволяет получить материал с прочностью при растяжении до 107 МПа, что близко к прочности литых деталей. При этом модуль упругости составляет 2490 МПа.

При правильном подборе параметров технологического процесса печати образцы из полифениленсульфона могут достигать прочности при растяжении 64,5 МПа и модуля упругости 1725 МПа, что также сопоставимо с характеристиками материала, полученного способом литья под давлением.

Образцы полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) могут достигать прочности на разрыв в 98,9 МПа при модуле упругости 3980 МПа, что практически не отличается от характеристик литьевого ПЭЭК.

Активно ведутся работы по введению в состав полимеров различных наполнителей, позволяющих повышать физико-механические свойства изделий. В состав полимеров вводят сажу, углеродные нанотрубки и волокна, волокна нитрида бора, ультрадисперсную глину, керамические наночастицы. Добавки оксида графена и микрочастиц оксида циркония позволяют в широких пределах регулировать свойства получаемых изделий. Перлитовое волокно, введенное в полипропилен, снижает усадку и коробление деталей.

Наиболее перспективный способ увеличения прочностных характеристик материала – армирование дискретными или непрерывными волокнами. В таблице 6.2 приведен ряд материалов, армированных дискретными углеродными волокнами, введенными в матрицу на этапе изготовления филамента.

Применение пластиков, армированных углеволокном, позволяет в 2 раза увеличить прочность изделий в продольном направлении, однако материал становится менее пластичным. Армирование положительно влияет на склонность изделий к растрескиванию. Для некоторых армированных композиций коэффициент трещиностойкости увеличивается до 120 %.

Одним из наиболее перспективных направлений в разработке новых высокопрочных материалов является создание композиционных пластиков, в которых в качестве армирующих элементов используются непрерывные нити (жгуты). Механические свойства таких материалов, в ряде случаев, сопоставимы со свойствами алюминиевых сплавов при плотности в 2 раза меньше. Перспективны такие материалы в авиакосмической отрасли.

Таблица 6.2 – Физико-механические характеристики АБС-пластиков, армированных дискретными углеродными волокнами

Состав	Прочность при растяжении МПа	Модуль упругости, МПа	Удлинение, %	Ориентация
АБС – пластик + углеволокно (13 % (по массе)) + пластификатор (9 % (по массе)) + компатибилизатор (0,9 % (по массе))	52,4	–	–	[0]
	8,81			[90]
АБС – пластик + пластификатор (9 % (по массе))	25,4	–	–	[0]
	12,25			[90]
АБС – пластик + УНВ* (10 % (по массе))	37,4	790	–	–
АБС – пластик	26,9	500	–	–
АБС – пластик + 7,5 % УВ*	42	2600	4	–
АБС – пластик Р-430	34,2	2000	3	–
<i>Примечание – * – УНВ – углеродное нановолокно, УВ – углеродное волокно</i>				

Контрольные вопросы

- 1 Что влияет на физико-механические свойства изделий?
- 2 Почему с увеличением толщины слоя прочность изделия снижается?
- 3 Как влияет геометрия перегородок в пустотелом изделии на его прочность?
- 4 Укажите полимеры, применяемые для получения высокопрочных изделий.
- 5 Опишите особенности и преимущества армированных материалов.

Ход работы

- 1 Получить образцы, отличающиеся различным направлением формирования дорожек полимера относительно продольной оси.
- 2 С помощью преподавателя провести испытания на разрыв образцов с продольной и поперечной ориентацией дорожек.
- 3 Записать полученные результаты в отчет.
- 4 Сделать вывод о влиянии ориентации дорожек относительно прикладываемой нагрузки на прочность материала.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Основные теоретические положения.
- 3 Результаты испытаний, а также вывод о влиянии ориентации слоев полимера на прочность напечатанных образцов.

7 Лабораторная работа № 7. Композиционные пластмассы с волокнистыми и слоистыми наполнителями

Цель работы: ознакомиться с особенностями структуры и свойств композиционных термореактивных пластмасс с волокнистыми и слоистыми наполнителями.

Оборудование и инструмент: образцы композиционных пластмасс, стереомикроскоп Альтами.

Общие сведения

К композиционным пластмассам в первую очередь относят материалы, в которых в качестве связующего используются термореактивные полимеры. Это фенолформальдегидные, кремнийорганические, эпоксидные и другие смолы. Теплостойкость этих полимеров 200 °С...350 °С. Эпоксидные смолы способны к отверждению не только при нагреве, но и при комнатной температуре, без выделения побочных продуктов и с минимальной усадкой, что позволяет изготавливать из пластмасс на их основе крупногабаритные детали.

Термореактивные пластмассы являются многокомпонентными, в их состав входят наполнители, а также пластификаторы, красители и др.

Пластификаторы применяются для придания пластмассе большей пластичности при нормальной температуре, облегчают их переработку, снижая температуру перехода полимера в вязкотекучее состояние (например, глицерин, диокрифталаат). **Стабилизаторы** способствуют сохранению свойств пластмасс во времени, а **отвердители** сокращают время отверждения.

Красители применяют для придания пластмассам определенного цвета.

Катализаторы вводят для сокращения времени отверждения пластмасс.

Смазывающие материалы применяют для предотвращения прилипания пластмасс к формам, в которых изготавливают изделия. В качестве смазки используют стеарин, олеиновую кислоту и др.

Важнейшей характеристикой наполнителей является их морфология и удельная поверхность, от которой зависит эффективность взаимодействия с полимерной матрицей, особенно когда наполнители подвергаются обработке поверхностно-активными веществами, модификаторами и другими добавками. В основном используют наполнители в виде волокон, слоистых материалов и порошков.

Волокнистые пластмассы.

Волокниты представляют собой композиции из термореактивных смол и волокнистых наполнителей. Связующим в них является фенолформальдегидная и другие смолы. Волокнистые наполнители обеспечивают пластмассам более высокие механические свойства по сравнению с пресс-порошками. Волокниты применяют для изготовления горячим прессованием деталей общего технического назначения с повышенной устойчивостью к ударным нагрузкам.

Стекловолокниты получают сочетанием стекловолокна с модифицированными фенолформальдегидными, кремнийорганическими и другими смолами. Из всех волокнитов они нашли в промышленности наибольшее применение, т. к. в них сочетается высокая механическая прочность, теплостойкость и высокие диэлектрические характеристики. Предел прочности на растяжение зависит от расположения стекловолокна. Ориентированный стекловолокнит используется при изготовлении высоконагруженных плит, опор, перегородок, лопаток компрессора, а также других изделий, имеющих форму тел вращения, изготовляемых способом намотки (трубопроводы, сферические емкости).

Асболокниты, получаемые на основе асбестового волокна и фенольно-формальдегидной смолы, отличаются повышенной теплостойкостью до 250 °С, ударопрочностью. Применяются для изготовления тормозных устройств, тормозных барабанов, теплозащиты и различных деталей, работающих в зоне повышенных температур.

Углепластики – композиты на основе высокопрочных углеродных волокон. В качестве армирующих элементов в конструкционных углепластиках применяются непрерывные волокна в виде нитей или жгутов, ткани или нетканые материалы. Применяют в авиационной, ракетной и космической технике, в автомобилестроении, при изготовлении спортивного инвентаря.

Боропластики – пластики с армирующими элементами в виде волокон бора. Их применяют в тех случаях, когда требуется высокая прочность при сжатии, а также когда элементы конструкции работают в условиях повышенных температур. Материалы отличаются повышенной тепло- и электропроводностью.

Стеклопластики, их состав. Возможность регулирования свойств стеклопластиков в зависимости от назначения.

Стеклопластики – вид композиционных материалов – пластические материалы, состоящие из стекловолокнистого наполнителя (стеклянное волокно, волокно из кварца и др.) и связующего вещества (термореактивные и термопластичные полимеры в данном случае это эпоксидные модифицированные смолы).

Стеклопластик – материал с малым удельным весом и заданными свойствами, имеющий широкий спектр применения. Стеклопластики обладают очень низкой теплопроводностью (примерно как у дерева), прочностью, как у стали, биологической стойкостью, влагостойкостью и атмосферостойкостью полимеров, не обладая недостатками, присущими термопластам. Они превосходят стали по удельной прочности. При изготовлении равнопрочных конструкций из стали и стеклопластика стеклопластиковая конструкция будет в несколько раз легче. Коэффициент линейного расширения стеклокомпозита близок к стеклу, плотность 1,8...2,0 г/см³.

Широкое применение стеклопластиков сдерживалось в основном отсутствием промышленной технологии, позволяющей наладить массовый выпуск профилей сложной конфигурации с требуемой точностью размеров. Существуют методы, позволяющие массово производить стеклопластиковые изделия различной конфигурации, не обязательно профили, например, РТМ, вакуумная формовка.

Стеклопластики являются одним из самых доступных и недорогих композиционных материалов. На данный момент изделия из стеклопластика уступают по цене изделиям из металла из-за трудоёмкого и длительного процесса выклейки деталей. Наиболее выгодно использование стеклопластика при мелкосерийном производстве.

Стойкость к действию химикатов и высокие эксплуатационные показатели стеклопластика продемонстрированы за прошедшие 60 лет успешным использованием в сотнях различных химических сред. Помимо различных областей народного хозяйства, стеклопластики отдельных сортов широко используются в составе композитной брони танков и прочей военной техники.

Текстолит, состав, основные свойства и область применения.

Текстолит получается горячим прессованием различных хлопчатобумажных тканей, пропитанных фенолформальдегидными смолами. Выпускается в виде плит различной толщины, хотя изделия сложной формы изготавливают прессованием мелких кусочков ткани, пропитанной связующим. Текстолит отличается хорошей механической прочностью, стойкостью к вибрационным и истирающим нагрузкам. Из него изготавливают шестерни, прокладки, ролики, вкладыши и другие силовые детали. Предельная рабочая температура для текстолитов – 110 °С...120 °С.

Гетинакс, состав, свойства и область применения.

Гетинакс получается горячим прессованием бумаги, пропитанной фенолформальдегидными смолами. Выпускается в виде листов или плит толщиной от 0,5 до 50 мм. Он обладает высокими диэлектрическими свойствами и удовлетворительной механической прочностью. Предел прочности при растяжении – 80...100 МПа. Предельная рабочая температура – 110 °С. Используется для различных деталей радио- и электротехнического назначения, панелей распределительных устройств, прокладок, печатных плат и др.

Гибридные материалы, особенности состава и свойства.

Создание гибридных композитов путем совмещения в одном материале волокон разного происхождения является эффективным средством регулирования свойств композитов. Возможны различные варианты сочетания непрерывных армирующих волокон: создание гетероволоконных материалов по принципу однородных смесей (волокна различных типов равномерно распределяются в первичной нити или жгуте); использование многокомпонентного армирующего материала: ткани, мата или шпона для различных нитей или жгутов; чередование слоев листовых армирующих материалов с различными волокнами.

Наибольшее распространение среди гетероволоконных композитов получили трехкомпонентные материалы, например, углестекло-органобор, углеорганопластики. Независимо от технологических приемов сочетания волокон различия в термоупругих характеристиках армирующих волокон вызывают появление термических напряжений в процессе формирования композита и при изменении температурных режимов эксплуатации трехкомпонентного материала в изделии. Удачным считается сочетание армидных и углеродных волокон вследствие того, что значение предельных температурных коэффициентов термического расши-

рения у них близки и поэтому внутреннее термические напряжения не столь значительны. При сочетании углеродных и армидных волокон в разном соотношении были получены однонаправленные композиты с существенно более высокими значениями прочности при сжатии, изгибе и сдвиге в сравнении в органических пластиками. Технический интерес представляют гибридные углеоргано-текстолиты, обладающие при незначительном снижении жесткости и прочности в осевом направлении удовлетворительной прочностью при сжатии. Арматурой для текстолитов служат равновесные ткани из органических волокон Кевлар-49 и углеродных Торнел-30.

Контрольные вопросы

- 1 Укажите основные компоненты, входящие в состав композиционных пластмасс.
- 2 Что такое асбоволокниты?
- 3 Укажите основные свойства стеклопластиков.
- 4 Чем отличается гетенакс от текстолита?
- 5 В чем особенность гибридных композиционных пластмасс?

Ход работы

- 1 Получить у преподавателя образцы композиционных пластмасс с волокнистыми и слоистыми наполнителями.
- 2 С помощью микроскопа изучить структуру материалов.
- 3 Результаты изучения структуры материалов занести в отчет.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Основные теоретические положения.
- 3 Описание структуры композиционных материалов.

8 Лабораторная работа № 8. Композиционные пластмассы с порошкообразными наполнителями

Цель работы: изучить особенности структуры и свойств композиционных пластмасс с дисперсными наполнителями.

Оборудование и инструмент: образцы композиционных полимеров, стереомикроскоп.

Общие сведения

Наполнители используют для улучшения эксплуатационных свойств КМ, придания им различных специфических свойств и снижения стоимости. К идеальному наполнителю предъявляются особые требования, которые в одном наполнителе сочетать очень трудно. По этой причине часто вводят несколько их видов наполнителя, отличающихся формой частиц и составом. Подбором соответствующих наполнителей можно регулировать химическую стойкость, теплоустойчивость, тепло- и электропроводность, плотность и другие характеристики КМ.

Из органических наполнителей наиболее распространены древесная мука, содержащая целлюлозу и лигнин, мука из скорлупы орехов, хитин; из неорганических – слюда, тальк, мел, каолин, силикаты (глина, асбест, полевой шпат, пемза), оксиды (оксид алюминия, магния, цинка, двуокись титана), углеродные наполнители (графит, кокс, уголь).

Некоторые металлические наполнители придают полимерам специфические свойства, например: порошки железа и его сплавы – ферромагнитные свойства; чешуйки алюминия, никеля, серебра – низкую газо- и паропроницаемость; порошки алюминия и медных сплавов – декоративность. Материалы, наполненные свинцом, кадмием и вольфрамом пригодны в качестве защиты от излучений высокой энергии. Порошки меди улучшают фрикционные характеристики композиционного материала. Фториды и сульфаты некоторых металлов (бария, кальция) повышают тепло- и химическую стойкость, дисульфид молибдена снижает коэффициент трения КМ.

Материалы, содержащие дисперсные наполнители, которые равномерно распределены в материале, как правило, характеризуются изотропией свойств, оптимум которых достигается при степени наполнения, обеспечивающей адсорбцию всего объема связующего поверхностью частиц наполнителя. Дисперсный наполнитель уменьшает усадку при прессовании, повышает жесткость и твердость изделий, а в отдельных случаях придает им специфические свойства, например электро- и теплопроводность, стойкость к действию электромагнитного и проникающего излучения и др. Введение в КМ дисперсных наполнителей более целесообразно для создания материалов массового производства, более технологичных, с невысоким уровнем прочностных характеристик.

Прочность при разрыве дисперсно-наполненных материалов, как правило, возрастает с увеличением содержания наполнителя до определенного предела.

Одним из объяснений наблюдаемой картины является постепенный переход связующего в систему тонких пленок, окружающих частицы наполнителя. Поверхностный слой и ориентация макромолекул связующего способствуют повышению прочности матрицы в таких пленках. При этом частицы наполнителя являются концентраторами напряжений, что может приводить к охрупчиванию полимера при наполнении. Для стеклообразных и терморезистивных полимеров прочность при растяжении ПКМ практически не повышается по сравнению с прочностью матрицы, а для высокоэластичных полимеров её повышение незначительно.

Вне зависимости от формы и размера частиц введение наполнителя в полимерную матрицу приводит к возникновению в системе фазовой гетерогенности. С увеличением степени наполнения равномерность распределения частиц возрастает, но структурная неоднородность может сохраняться до высоких степеней наполнения.

Основными характеристиками наполнителя является форма частиц (k_0 – коэффициент формы); размер и распределение частиц по размерам (диаметр, кривая распределения частиц); удельная поверхность (общая, геометрическая, внутренняя); пористость частиц (объем, размер пор); насыпная и истинная плотность ($\rho_{нас}$, $\rho_{ист}$); максимальная объемная доля (φ_{max}).

Значение k_0 меняется от 2,5 для шарообразных до 5,9 для эллипсоидных частиц. Большинство наполнителей имеют неправильную форму частиц.

Размеры частиц наполнителей изменяются от 7 нм до 50 мкм. Дисперсные наполнители по размеру частиц делятся на крупнодисперсные (диаметр $d > 40$ мкм), среднедисперсные ($40 \text{ мкм} < d < 10 \text{ мкм}$), высокодисперсные ($10 \text{ мкм} < d < 1 \text{ мкм}$) и ультрадисперсные ($d < 1 \text{ мкм}$). Реальные наполнители всегда характеризуются кривой распределения частиц по размерам, т. е. имеют различный гранулометрический состав. По кривой распределения частиц по размерам определяют средний размер частиц данного наполнителя.

Удельная поверхность частиц наполнителя $S_{уд}$ характеризует размер частиц и зависит от их пористости. Различают общую $S_{об}$, внутреннюю $S_{вн}$ и геометрическую S_2 поверхность наполнителей, причем

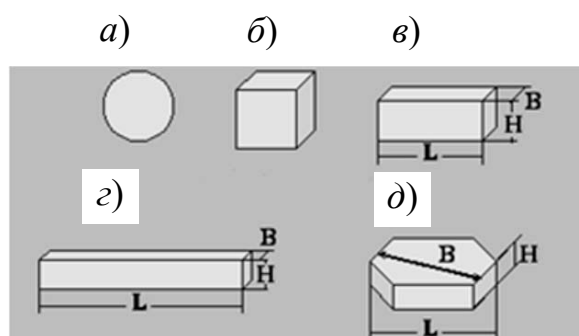
$$S_{об} = S_2 + S_{вн}. \quad (8.1)$$

Значение максимальной объемной доли наполнителя в КМ φ_{max} можно рассчитать теоретически, зная упаковку частиц, или определить экспериментально как

$$\varphi_{max} = \frac{\rho_{нас}}{\rho_{ист}}. \quad (8.2)$$

φ_{max} является верхним граничным пределом содержания наполнителя в двухфазном кристалле.

Характеристики дисперсных наполнителей. Дисперсные материалы классифицируют **по форме** в зависимости от соотношения характеристических размеров (рисунок 8.1). Данная классификация достаточно условна и основана на различии в площади поверхности частиц.



a – сфера; $б$ – куб; $в$ – параллелепипед; $з$ – волокно; $д$ – чешуйка; L – длина; H – высота; B – ширина;

Рисунок 8.1 – Вид и основные размеры частиц наполнителя

Технологические свойства исходных дисперсных материалов оценивают по величине влажности, сыпучести, гранулометрическому составу, удельному объему, насыпной плотности.

При повышенном содержании влаги в волокнистых материалах существенно ухудшается их сыпучесть, в результате чего в бункере перерабатывающего оборудования происходит зависание материала, приводящее к снижению точности дозирования и нарушению равномерности питания машины.

Гранулометрический состав дисперсных наполнителей.

Гранулометрический состав порошковых материалов позволяет судить о количественном соотношении в порошке частиц различных размеров и характеризуется размером частиц и соотношением между содержанием частиц различных размеров.

Сыпучесть порошковых наполнителей.

Сыпучесть чаще всего характеризуется временем (в секундах), необходимым для опорожнения металлической воронки с цилиндрическим отверстием определенных размеров, или скоростью (килограммы в секунду) вытекания материала из воронки. Критериями оценки сыпучести порошкообразных и гранулированных материалов также могут служить угол естественного откоса, угол обрушения, угол осыпания и др.

На сыпучие свойства материала существенное влияние оказывают внутреннее трение, влажность материала, плотность, гранулометрический состав и др.

Хорошей сыпучестью обладают монодисперсные материалы с частицами сферической формы, т. к. они имеют малый коэффициент внутреннего трения и большую насыпную плотность. Полидисперсные материалы имеют плотность и сыпучесть, неоднородную по объему.

Объемные характеристики дисперсных наполнителей: насыпная плотность, удельный объем, коэффициент уплотнения. Они зависят от плотности и

формы отдельных частиц, гранулометрического состава, влажности.

Насыпная плотность и удельный объем выражаются соответственно массой единицы объема в килограммах на метр кубический и объемом единицы массы в метрах кубических на килограмм свободно насыпанного материала, они связаны между собой обратно пропорциональной зависимостью.

Обозначение пластмасс с порошковыми наполнителями.

Марка порошка складывается из набора букв и набора цифр. Буква К слово «композиция». Следующее за ней число – номер (марка) связующей смолы, а цифра соответствует определенному наполнителю. Так цифра 1 обозначает, что наполнителем является целлюлоза, 2 – древесная мука, слюдяная мука, 4 – плавленый шпат, 5 – молотый кварц, 6 – асбест.

Марка К-236-21 означает, что пресс-порошок изготовлен на основе резольной смолы № 220 и наполнителей: древесной муки и целлюлозы. По назначению пресс-порошки делят на три группы:

- 1) для изготовления слабонагруженных деталей общего назначения;
- 2) для изготовления деталей электротехнического назначения;
- 3) для изготовления деталей, обладающих повышенной водо- и стойкостью: К-18-53, К-18-42, К-214-42, повышенной ударной (ФКП-1, ФКПМ-10), химической стойкостью (К-17-36, К-17-81).

Детали первой группы работают в условиях небольших механических нагрузок, действия тока высокого напряжения не более 10 кВ и температуры не выше 60 °С.

Детали второй выдерживают действие тока напряжением не более 20 кВ при температуре не более 200 °С.

Пресс-порошки на основе кремнийорганических смол находят применение в высокочастотной и низкочастотной технике для изготовления дугостойких и электроизоляционных деталей (каркасы катушек, переключатели, штепсельные разъемы), деталей антенных устройств, работающих при 200 °С...250 °С и кратковременно при 350 °С...400 °С. Наполнителями в них являются асбест и стекло.

Детали из пресс-порошков получают прямым или литьевым прессованием при 150 °С...185 °С.

Контрольные вопросы

- 1 Порошки каких веществ используются в качестве наполнителей?
- 2 Опишите зависимость прочности материала от количества вводимого наполнителя.
- 3 Укажите основные характеристики дисперсных наполнителей.
- 4 Что относится к технологически характеристикам дисперсных наполнителей?
- 5 Укажите основные принципы маркировки композиционных пластмасс.

Ход работы

- 1 Получить у преподавателя образцы композиционных пластмасс с порошковыми наполнителями.
- 2 С помощью микроскопа изучить структуру материалов.
- 3 Описать структуру материалов.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Основные теоретические положения.
- 3 Описание структуры композиционных материалов.

9 Лабораторная работа № 9. Механические свойства композиционных пластмасс с волокнистыми и слоистыми наполнителями

Цель работы: изучить влияние армирующего материала на прочность композиционных пластмасс.

Оборудование и инструмент: образцы композиционных пластмасс с различной ориентацией армирующих волокон, испытательная машина Kason WDW-1, маятниковый копер Kason XJ-50Z.

Общие сведения

Стеклопластики наряду с углепластиковыми выгодно отличаются от других конструкционных материалов, включая другие виды композиционных пластмасс, сочетанием высокой прочности и малого удельного веса, за что их нередко называют «легкими металлами». Благодаря этому их, как правило, используют для получения высокопрочных материалов в самых различных отраслях промышленности.

Благодаря варьированию пространственной ориентации армирующих стекловолокон и состава связующих смол удается регулировать в нужном направлении технические характеристики и физико-механические свойства стеклопластиков.

Стеклопластики, в зависимости от структуры и расположения армирующих материалов, в большинстве случаев анизотропны, т. е. механические свойства их изменяются в зависимости от направления действия нагрузки.

Прочность при растяжении ориентированных стеклопластиков определяется прежде всего количеством и прочностью армирующего материала, адгезионной и когезионной прочностью связующего, его модулем упругости и относительным удлинением. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении стеклопластика от содержания волокна.

Абсолютные значения разрушающего напряжения однонаправленных стеклопластиков на основе алюмоборосиликатного волокна достигают 1600...1800 МПа, а на основе волокна из стекла ВМ-1 могут составлять 2000...2200 МПа. Содержание стекла в неориентированных стеклопластиках обычно не более 50 вес. %, причем повышение прочности с ростом количества волокон не так заметно.

Когезионная прочность связующего, его модуль упругости и эластичности, а также относительное удлинение оказывают решающее влияние на монолитность системы связующее – стеклянные волокна. Для обеспечения монолитности стеклопластика, армированного алюмоборосиликатными волокнами, необходимо, чтобы связующее имело прочность при растяжении 120...150 МПа, модуль упругости – 4500...5000 МПа, относительное удлинение – 4 %...5 %.

Прочность при сжатии в меньшей степени, чем при растяжении, зависит от прочности и количества стеклянных волокон, в то время как увеличение диаметра и модуля упругости волокон приводит к значительному увеличению разрушающего напряжения стеклопластика при сжатии. Очень велико влияние адгезионной прочности связующего, значение которой для обеспечения монолитности стеклопластика должно составлять 80...100 МПа.

Прочность при изгибе стеклопластиков зависит как от диаметров волокон, влияющих на прочность при сжатии, так и от факторов, определяющих прочность при растяжении. Для неориентированных стеклопластиков значение разрушающего напряжения при изгибе является средним между значениями, характеризующими прочность материала при растяжении и сжатии. Ориентированные стеклопластики имеют прочность при изгибе, близкую к прочности при растяжении при условии, что разрушение происходит от нормальных, а не касательных напряжений, т. к. ориентированные стеклопластики слабо сопротивляются сдвигу.

Модуль упругости ориентированных стеклопластиков в направлении армирования не зависит от диаметра волокна и определяется в первую очередь содержанием стеклянного волокна, ориентированного в направлении деформирования. Ползучесть ориентированных стеклопластиков в направлениях армирования невелика, и снижение модуля упругости на базе 10 ч составляет 10 %...15 %.

Механические свойства стеклопластиков определяются прежде всего свойствами стекловолокна, обладающего по сравнению со связующим во много раз большими прочностью и модулем упругости. Применяя стекловолокно, различное по химическому составу (с разным содержанием щелочных окислов), и варьируя количество и расположение стекловолокна в материале, можно получить стеклопластики, обладающие различными механическими и другими свойствами. Вид и процентное содержание второго компонента смолы также оказывают большое влияние на свойства стеклопластиков. Связующее в стеклопластиках, кроме защитных функций, выполняет роль достаточно прочной и жесткой среды, способной перераспределять и уравнивать неравномерные усилия, возникающие в массе элементарных стекловолокон. Последнее обстоятельство особенно важно для тех видов стеклопластиков, в которых стекловолокно лишено механической связи (например, переплетения) и совместная работа отдель-

ных, зачастую хаотически расположенных волокон полностью зависит от адгезионных и механических свойств связующего. Для всех стеклопластиков временной фактор оказывает большее влияние на прочностные, чем на деформационные показатели.

Механические свойства.

При небольшой плотности стеклопластики обладают высокими физико-механическими характеристиками (таблица 9.1).

Таблица 9.1 – Физико-механические свойства различных материалов

Физико-механические свойства	Стеклопластик	ПВХ	Сталь	Алюминий
Плотность, т/м ³	1,6...2,0	1,4	7,8	2,7
Разрушающее напряжение при растяжении, МН/м ²	410...1180	41...48	410...480	80...430
Предел прочности при изгибе, МН/м ²	690...1240	30...110	400	275
Модуль упругости при растяжении, ГПа	21...40	2,8	210	70
Коэффициент линейного расширения, 10 °С ⁻¹ ... 6°С ⁻¹	5...14	54...75	11...14	2,2...2,3
Коэффициент теплопроводности, Вт/мК	0,3...0,35	0,3	46	140...190

Используя некоторые смолы и определенные виды армирующих материалов, можно получить стеклопластики, по своим удельным прочностным характеристикам превосходящие некоторые сплавы цветных металлов и сталь. Механические свойства стеклопластика определяются преимущественно характеристиками наполнителя и прочностью его связи со связующим материалом.

Наибольшей прочностью и жесткостью обладают стеклопластики, содержащие ориентированно расположенные непрерывные волокна. Такие стеклопластики подразделяются на однонаправленные и перекрестные. В первом случае волокна располагаются параллельно, а во втором – под углом друг к другу, который поддерживают постоянным или изменяют в различных частях изделия, управляя механическими и другими характеристиками конструкции.

Контрольные вопросы

- 1 Как регулируют механические свойства стекло- и углепластиков?
- 2 Чем определяется прочность композиционных пластмасс?
- 3 От чего зависит значение модуля упругости ориентированных стеклопластиков?
- 4 Укажите преимущества стеклопластиков перед сталью.
- 5 Чем отличаются однонаправленные стеклопластики от перекрестных?

Ход работы

- 1 Получить образцы, отличающиеся ориентацией армирующего материала.
- 2 С помощью преподавателя провести испытания на разрыв и ударную вязкость образцов с продольной, поперечной и произвольной ориентацией армирующих волокон.
- 3 Записать полученные результаты в отчет.
- 4 Сделать вывод о влиянии ориентации волокон относительно прикладываемой нагрузки, на прочность материала.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Основные теоретические положения.
- 3 Результаты испытаний, а также вывод о влиянии ориентации армирующего материала на прочность образцов.

10 Лабораторная работа № 10. PLA- и ABS-пластики и их сравнительные характеристики

Цель работы: ознакомиться с основными характеристиками и отличительными особенностями широко используемых в области аддитивных технологий пластиков PLA и ABS.

Оборудование и инструмент: образцы и изделия из PLA- и ABS-пластиков, стереомикроскоп Альтами.

Общие сведения

ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол).

Этот пластик отличается высокой прочностью, выдерживает достаточно высокие температуры и легко обрабатывается, поэтому его применяют в инженерных целях и для работы в профессиональных условиях. При работе пластик требует существенного нагрева, в результате чего появляется неприятный запах, что является заметным недостатком. При этом нагрев печатной платформы может обеспечить не каждый принтер, а значит, и печать с ABS-пластиком будет невозможна.

Температура, при которой возможна печать материалом ABS, находится в пределах 220 °С...260 °С, материал биологически не разлагается, при этом склонен деформироваться и усаживаться, в связи с чем требуется подогревать платформу при печати. Если печатаемое изделие деформируется, это может произойти из-за неверной калибровки осей или слабого прогрева рабочей площадки, которая должна иметь температуру не менее 80 °С. Между соплом и площадкой в любом принтере необходим зазор, равный десятым долям миллиметра. Диаметр

выпускаемого волокна из пластика ABS может составлять 1,75 или 2,85 мм.

Основные особенности термопласта ABS:

- при работе пластик выделяет ультрадисперсные частицы, что требует обеспечения качественного вентилирования;
- экструзия сопровождается запахом горелой пластмассы;
- температура экструзии зависит от свойств конкретного пластика и может колебаться от 220 °С до 260 °С;
- изделия, изготовленные из ABS, не настолько хрупкие и сгибаются легче, к тому же у них более глянцевая поверхность, чем у деталей из PLA;
- ABS деформируется под действием температуры около 100 °С, обладая повышенной теплостойкостью в сравнении с материалом PLA;
- у ABS пониженный коэффициент трения, поэтому он экструдируется с меньшим усилием, чем пластик PLA.

Особенности печати.

Для достижения качественных результатов при печати необходимо добиться хорошей адгезии начального слоя пластика с платформой. Для этого используют подогрев. Также применяют полиамидную ленту марок Kapton или ПЭТ. Это обусловлено тем, что пластик имеет способность прилипать к полиамиду лучше, чем к самой платформе. Также применяют нанесение жидкого пластика ABS на поверхность платформы. Пластик растворяется в ацетоне и наносится тонким слоем на поверхность.

PLA (полилактид).

Зачастую данный материал применяют из-за его обширной гаммы цветов и возможности делать детали полупрозрачными. Многих также привлекает тот факт, что материал имеет растительное происхождение и обладает достаточно приятным запахом. Если обеспечить качественное охлаждение, с помощью этого пластика можно печатать быстрее, чем из ABS, получать меньшую толщину наносимого слоя и обеспечивать острые углы.

Пластик делается из кукурузы и является биоразлагаемым. Печать возможна при 180 °С...230 °С, при этом материал не подвергается деформации. Это дает возможность изготавливать крупные детали без подогрева платформы. Текучесть этого материала выше, чем ABS, в связи с этим при прогревом сопле 3D-принтера волокно, заправленное в устройство, плавится и материал начинает самопроизвольно вытекать. Зазор от сопла до площадки должен составлять около 0,2 мм.

Филамент из PLA в очень жаркую погоду нельзя оставлять на прямом солнце или в закрытой автомашине во избежание деформирования. Выпускается стандартный диаметр филамента 1,75 или 2,85 мм.

Особенности пластика PLA:

- PLA, или полимолочную кислоту, получают из богатого крахмалом кукурузного сырья или из сахарного тростника;
- пластик способен к биоразложению, не выделяет ультрадисперсные частицы;

- в процессе экструдирования пластика возникает еле заметный сладковатый запах;
- температура экструзии пластика может находиться в пределах 160 °С...220 °С, что зависит от параметров материала;
- в сравнении с ABS пластиковые детали из PLA являются более жесткими;
- детали из PLA имеют глянцевую поверхность;
- PLA менее деформируется при печати и существенно качественнее ABS с точки зрения адгезии;
- температура размягчения пластика составляет около 60 °С;
- коэффициент трения пластика PLA выше, чем ABS, поэтому процесс его экструдирования связан с большими усилиями.

Советы по печати с PLA.

Оптимальная температура для печати из PLA находится в пределах 180 °С...230 °С. В отличие от ABS, печать PLA можно осуществлять и с подогревом платформы, и без него. Предпочтительная температура подогрева – 40 °С...50 °С.

Обеспечение хорошей адгезии начального слоя для данного материала также весьма актуально.

Напечатанные изделия, как правило, подвергаются окончательной обработке, при которой удаляются дефекты поверхности, неровности. Поскольку материал ABS растворим в ацетоне, достаточно изделие из него протереть данным растворителем. На PLA не влияет ацетон, но детали получаются гладкие, при этом для химической обработки можно использовать дихлорметан.

Механические и физические свойства.

PLA более хрупкий, имеет большую твердость поверхности меньшую прочность на изгиб. Детали из ABS более гибкие и, как правило, гнутся, а не ломаются под внешним воздействием. Поэтому ABS лучше подходит для печати узлов, деталей и объектов большей прочности.

Условия хранения.

Оба пластика (PLA/ABS) впитывают влагу из воздуха. Чтобы этого избежать, воздух выкачивается при упаковке. После извлечения из упаковки материалы рекомендуется использовать как можно быстрее, т. к. со временем качество изделий из них начинает снижаться. Распакованный материал хранят в сухом месте.

Разлагаемость и долговечность.

PLA разлагается – он изготавливается из растительных материалов. ABS не разлагается, но может быть переработан. Оба материала (PLA/ABS) разлагаются под воздействием солнечных лучей и влаги. ABS более стабильный и обладает большим сопротивлением к химическим воздействиям, чем PLA.

Рекомендуемые сферы применения.

PLA широко используется в 3D-печати, например, для бытовых предметов, игрушек, сувениров и др. Он подходит, если к изделию не предъявляется требований высокой гибкости. С другой стороны, он отличается хорошей совместимостью с живыми тканями и может использоваться для изделий, которые взаимодействуют с кожей.

Из-за относительно низкой температуры плавления, PLA не подходит для объектов, которые подвергаются нагреву. При нагреве более 60 °С изделия из PLA-пластика начинают терять свою форму. По этой причине PLA не используют для изделий, которые подвергаются солнечному облучению на протяжении длительного времени или находятся в условиях повышенных температур.

Контрольные вопросы

- 1 Укажите существенные отличия пластиков ABS и PLA.
- 2 Какими достоинствами отличается пластик ABS?
- 3 Перечислите недостатки пластиков на основе PLA.
- 4 Укажите полимер, обладающий более высокой теплостойкостью.
- 5 Какой полимер требует более тщательного подбора технологических параметров процесса печати и почему?

Ход работы

- 1 Получить у преподавателя образцы изделий из ABS- и PLA-пластиков.
- 2 Визуально изучить морфологию поверхности образцов.
- 3 С помощью стереомикроскопа изучить микроструктуру образцов.
- 4 Описать структуру материалов.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Основные теоретические положения.
- 3 Сравнительный анализ образцов из ABS- и PLA-пластиков.

11 Лабораторная работа № 11. Химическая обработка пластмассовых изделий, полученных методами аддитивных технологий

Цель работы: изучить влияние органических растворителей на морфологию поверхности изделий из термопластов, полученных с помощью 3D-печати.

Оборудование и инструмент: лабораторная установка для обработки полимеров парами растворителя, образцы из ABS пластика, резиновые перчатки.

Общие сведения

Как правило, химической или термической обработке подвергают изделия, полученные способом FMD, что связано с высокой шероховатостью и неоднородностью поверхности получаемых изделий. Эта обусловлено технологическими особенностями печати, при которой модель формируется нанесением

слоев пластика с толщиной до нескольких десятых долей миллиметра, последовательно, один на другой. Для устранения данного недостатка чаще используют химический способ обработки поверхности.

Нужно отметить, что все используемые методы обработки поверхностей 3D-моделей имеют целью не только придать изделиям высокий эстетичный вид, но и обеспечить их высокую прочность (недопущение трещин и расслоений) и герметичность конструкции.

Химический способ является более щадящим и эффективным. Одновременно он требует правильного подбора реагента. Например, ацетон хорошо подходит для ABS-пластика, но не взаимодействует с PLA-пластиком. С другой стороны, PLA-пластик хорошо растворяется в дихлорэтане или дихлорметане.

Чаще всего используют ручную обработку изделий либо обработку в среде паров растворителя. К примеру, в ацетоновой «бане».

Ручная химическая обработка распечатанной 3D-модели.

Такой вид сглаживания неровностей и шероховатостей является очень действенным, но трудоемким. Для этих целей используют кисточки с натуральными волокнами.

К положительному моменту такого способа обработки можно отнести возможность нанесения растворителя на определенные отдельные участки поверхности модели, что позволяет оставить в сохранности острые грани и углы. В условиях, когда пластик достаточно размягчен, сами волоски кисточки оставляют царапины и неровности, которые могут не успеть разгладиться до полного испарения растворителя.

Для ручной обработки поверхностей 3D-моделей создаются и используются специальные приспособления. К ним можно отнести изделия в виде фломастера, в стержне которого находится ацетон, клей на его основе или другой растворитель.

Обработка ацетоном, выдерживание в ацетоновой бане.

Обработка в ацетоне наиболее распространена. Но способ работает не только с ацетоном, но и с другими растворителями. Этот метод очень прост и не требует особых затрат. Модель погружается в концентрированный (неразбавленный) ацетон на 8...10 с, и внешний слой изделия будет сглажен. После этого достаточно подержать модель на чистом воздухе, до полного испарения растворителя (до 30 мин).

Данный способ имеет несколько недостатков. Одним из них является сложность в выборе время выдержки, т. к. ацетон со временем начинает растворять мелкие детали или всю конструкцию в целом. Также при обработке изделий разного цвета могут образовываться цветные разводы на поверхности моделей.

Наиболее действенным и эффективным методом обработки поверхности 3D-моделей из ABS-пластика считается использование паров ацетона, в результате такой обработки поверхность изделия выглядит ровной и глянцевой. Для этого выбранную конструкцию помещают в свободную емкость, на дне которой находится небольшое количество ацетона. Модель не должна соприкасаться с растворителем, и поэтому необходимо поместить ее на изолирующую плат-

форму. Она может быть из древесины, но предпочтительно использовать металлическую основу.

Для ускорения процесса обработки изделия парами ацетона емкость с реагентом и помещенной внутрь моделью подогревают, но не доводят до кипения. Оптимальная температура ацетона должна быть в пределах 50 °С...56 °С.

Обработку моделей таким методом можно проводить и без подогрева ацетона, но в таком случае эта процедура займет очень продолжительное время и будет не достаточно эффективна. Время выдержки в емкости (камере) составляет от 40 мин (без подогрева) до нескольких секунд (кипение ацетона).

При использовании ацетона как методом погружения, так и методом обработки парами растворителя готовой модели необходимо дать время проветриться, чтобы внешняя поверхность достаточно затвердела, иначе любое физическое воздействие может привести к разрушительным последствиям для формы изделия.

Поскольку в области аддитивных технологий используются самые различные полимеры, для них не существует универсального растворителя, позволяющего улучшить качество поверхности получаемых изделий. При этом следует отметить, что существуют и достаточно универсальные растворители, и соединения, пригодные только для отдельных видов пластиков.

1 PLA-пластик (полилактид, полимолочная кислота).

Дихлорэтан имеет два изомера 1,2 – дихлорэтан (хлористый этилен, опасный токсин, второй класс опасности), 1,1 – дихлорэтан (хлористый этилиден, менее токсичен 3-й класс опасности). Оба имеют резкий и неприятный запах, ядовиты, горючи, являются наркотическими и канцерогенными веществами, запрещены для бытового использования. Сильный яд!!!

Дихлорметан (хлористый метилен), бесцветная легкоподвижная, горючая жидкость, имеет 4-й класс опасности как ацетон, может вызывать наркоз, также является ядовитым и канцерогенным веществом. Применяют с соблюдением техники безопасности, с использованием респираторов, полипропиленовых перчаток. Работу проводят в хорошо проветриваемом помещении.

2 ABS-пластик.

Самый популярный растворитель – это **ацетон**, он достаточно дешев, доступен и отлично справляется с поставленной задачей. Горюч, имеет резкий неприятный запах, быстро испаряется.

Этилацетат имеет приятный запах по сравнению с ацетоном, 4-й класс опасности, испаряется гораздо медленнее ацетона, имеет приемлемый запах.

Дихлорэтан и дихлорметан также отлично растворяют ABS-пластик.

3 HIPS-пластик (полистирол).

d-Лимонен – маслянистая жидкость с приятным цитрусовым ароматом. Абсолютно безопасен. Отличается замедленным действием.

Дихлорэтан и дихлорметан также используются для HIPS-пластика.

4 SBS-пластик (стирол бутадиен стирольный).

Сольвент (нефрас). Обладает легким наркотическим действием. Содержит токсичный компонент **циклогексанон**. Хорошо подходит для обработки про-

зрачных пластиков. Сглаживает различные неровности и шероховатости, придает пластику прозрачность схожую со стеклом при этом пластик не мутнеет.

d-Лимонен также используется, однако процесс происходит медленнее и в последующем требует долгой просушки изделия.

Также используют дихлорэтан и дихлорметан.

5 РС-пластик (поликарбонат).

Поликарбонат растворим в целом ряде технических растворителей: **этиленхлориде, хлороформе, тетрагидроэтаноле, метакрезоле и пиридине**. К числу сравнительно более слабых растворителей поликарбоната относятся диоксан, тетрагидрофуран, циклогексанон и диметилформамид.

6 РР-пластик (полипропилен).

Полиэтилен и полипропилен (независимо от степени полимеризации) растворяются в высококипящих неполярных или малополярных растворителях (декан, о-дихлорбензол или аналогичный) при 130 °С...150 °С. Растворитель должен содержать небольшое количество антиоксиданта для предотвращения быстро протекающих при такой температуре на воздухе процессов окисления.

7 РА-пластик (нейлон, полиамид).

На этот материал практически не воздействуют стандартные растворители. В качестве них могут быть использованы **соляная или муравьиная кислоты**. Но это очень опасные вещества, нещадно обжигают кожные покровы и раздражают дыхательные пути. После обработки деталь промывают водой.

8 ТРУ-, ТРЕ-, ТРЕЕ-, ТРС-пластики (термопластичные полиуретаны).

Как и все полиуретаны, растворяется в N,N-диметилформамиде (ДМФА), этилацетате, тетрагидрофуране, циклогексаноне, диметилацетамиде.

9 РЕТГ-пластик (полиэтилентерефталатгликоль).

Стоек к большинству растворителей, кроме HFIP (**гексафторпропанол**).

10 РММА-пластик (полиметилметакрилат).

Ацетон, толуол, бутанон, циклогексанон, нитроэтан, хлороформ, дихлорметан, бензол, хлорбензол, ксилол, метоксибензол, этилацетат и др.

11 РЕЕК-пластик (полиэфирэфиркетон).

Растворим в **концентрированной серной кислоте** при комнатной температуре, хотя растворение может занять очень много времени, если только полимер не находится в форме с высоким отношением площади поверхности к объему, такой как мелкий порошок или тонкая пленка. Обладает высокой устойчивостью к биоразложению и многим растворителям.

Техника безопасности при химической обработке.

Любые химические соединения, особенно растворители, обладают свойствами легкого испарения и особыми специфическими характеристиками.

Большинство органических соединений высоколетучи, а их воздушная смесь становится взрывоопасной. По этой причине рекомендуется все работы с растворителями проводить в хорошо проветриваемом помещении с принудительной вентиляцией. По этой же причине не следует использовать открытый огонь для подогрева емкости с ацетоном, а всю необходимую работу лучше проводить с использованием резиновых перчаток, респиратора и защитных очков.

Контрольные вопросы

- 1 С какой целью выполняют химическую обработку изделий?
- 2 Укажите преимущества и недостатки ручной химической обработки.
- 3 Опишите назначение и принцип действия ацетоновой «бани».
- 4 Укажите наиболее универсальные растворители для обработки изделий из полимеров.
- 5 Опишите основы техники безопасности при проведении химической обработки изделий.

Ход работы

- 1 Получить образцы для исследования.
- 2 Установить лабораторную установку для химической обработки изделий, заполненную ацетоном, в вытяжной шкаф.
- 3 Открыть крышку, поместить на платформу образец, крышку закрыть.
- 4 Выдержать образец в течение 10 мин, после чего его извлечь и оставить под вытяжкой для испарения остатков растворителя.
- 5 Повторить операцию с выдержкой в течение 15 и 20 мин.
- 6 Оценить влияние времени выдержки образцов на изменение шероховатости их поверхности, а также сохранение геометрических параметров.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Основные теоретические положения.
- 3 Описание влияния времени выдержки на шероховатость поверхность, а также вывод о влиянии времени выдержки образца на сохранение его формы и размеров.

12 Лабораторная работа № 12. Фотополимерные материалы, применяемые в области аддитивных технологий

Цель работы: изучить преимущества и недостатки фотополимерных материалов, применяемых в области аддитивных технологий.

Оборудование и инструмент: образцы изделий из фотополимерных материалов, стереомикроскоп.

Общие сведения

Особое место в области аддитивного производства занимают фотополимерные смолы. В эту группу объединены вещества, которые послойно отверждаются под действием ультрафиолетового излучения или лазера. Фотополимерные материалы используются в 3D-принтерах, работающих по технологиям

MJM, SLA и PolyJet.

Фотополимер или светоактивируемая смола при воздействии излучения меняет свои свойства. Эти изменения часто проявляются структурно, например, затвердевание материала происходит в результате сшивания молекул при воздействии света. Схематически затвердевание смеси, состоящей из мономера, олигомера и фотоинициатора показано на рисунке 12.1.

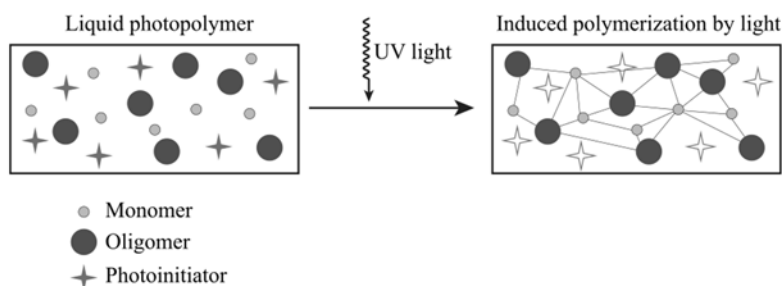


Рисунок 12.1 – Процесс полимеризации термореактивного полимера

Фотополимеры используются в самых разнообразных технологических областях, например, в эмалях и лаках. В некоторых случаях эмаль под действием излучения может затвердеть за доли секунды в отличие от термически отверждаемой эмали, на которую может потребоваться полчаса или больше. Отверждаемые материалы широко используются в медицине, печати и фоторезист – технологиях.

Изменения структурных и химических свойств могут быть инициированы внутренними хромофорами, которыми уже обладает полимерная субъединица, или внешними факторами, например, путем добавления фоточувствительных молекул. Как правило, фотополимер состоит из смеси многофункциональных мономеров и олигомеров, определенное сочетание которых обеспечивает достижение желаемых физических свойств. Фотополимеры проходят процесс, называемый отверждением, при котором олигомеры сшиваются под воздействием света, образуя так называемый сетчатый полимер. Результатом светоотверждения является образование у полимера термореактивной сетки.

Одним из преимуществ светоотверждения является то, что его можно проводить избирательно с помощью высокоэнергетических источников, например, лазеров. Для большинства фотополимеров сложно активировать полимеризацию светом. В этом случае необходимы фотоинициаторы. Они представляют собой соединения, которые под воздействием света разлагаются на реактивные частицы, активирующие полимеризацию определенных функциональных групп олигомера.

Чаще всего фотополимеры отверждают УФ-излучением, поскольку оно более активно. Однако разработка систем фотоинициаторов на основе красителей позволила использовать видимый свет, применение которого отличается простотой использования и безопасностью процесса. Преимущества фотополимеризации по сравнению с полимеризацией путем термического отверждения включает высокую скорость полимеризации и экологическую безопасность благодаря отсутствию летучих органических растворителей.

Основные характеристики фотополимерных материалов в области аддитивных технологий: высокая точность и детализация; гладкие поверхности готовых изделий; возможность использования в виде выжигаемых материалов; относительная хрупкость (за исключением нескольких материалов); низкая температура размягчения и деформации у большинства материалов.

В зависимости от типа композиции, применяемой технологии и оборудования, фотополимерные материалы могут решать широкий круг производственных, творческих и научных задач: печать мастер-моделей для литья в силикон; печать выжигаемых литейных мастер-моделей; быстрое прототипирование для различных целей; печать образцов для проверки собираемости; производство тестовых образцов продукции; печать пресс-форм для небольших серий.

Различают фотополимеры для профессиональных и промышленных 3D-принтеров.

Фотополимеры для **профессиональных 3D-принтеров**. К этой группе относятся вещества, используемые для построения в большинстве 3D-принтеров серии ProJet компании 3D Systems и 3D-принтерах серии Objet компании Stratasys:

– фотополимеры VisiJet серий M3, M5 и FTX применяются в 3D-принтерах ProJet. Общее количество – около 20. Каждый из материалов обладает одним характерным свойством (например, повышенная прочность, выжигаемость, прозрачность и пр.);

– фотополимеры серий Vera и Tanga применяются в 3D-принтерах Objet. Каждый материал (так же как и в случае с VisiJet) отличается характерными свойствами, прозрачностью или цветом.

Фотополимеры для **промышленных 3D-принтеров**:

– материалы серии VisiJet SL используются в промышленных SLA-машинах ProJet 6000/7000 компании 3D Systems. Включают в себя максимальный выбор физических свойств;

– фотополимеры серии Somos применяются в 3D-принтерах компании Uniontech. Есть водостойкие, термостойкие, высокопрочные, прозрачные и другие материалы.

Мало распространенные материалы.

К ним можно отнести древесно- и керамонаполненные материалы, биоразлагаемые, токопроводящие, ферромагнитные, светящиеся в темноте, изменяющие свет в зависимости от температуры материалы.

Из филаментов, содержащих наполнители в виде мелкодисперсных керамических частиц, создают предметы (рисунок 12.2), которые после печати помещают в печь, где спекают при высокой температуре до получения прочного плотного материала.

Процесс термообработки состоит из двух стадий:

- 1) выжигание полимерного компонента при температуре 250 °С...500 °С;
- 2) спекание керамики при температуре, достигающей более 1200 °С.

В настоящее время данные материалы, как правило, используют в декоративно-прикладном искусстве, для изготовления сувениров, украшений, бижутерии, предметов интерьера, букетов и цветочных композиций, ёлочных игрушек, авторских кукол.

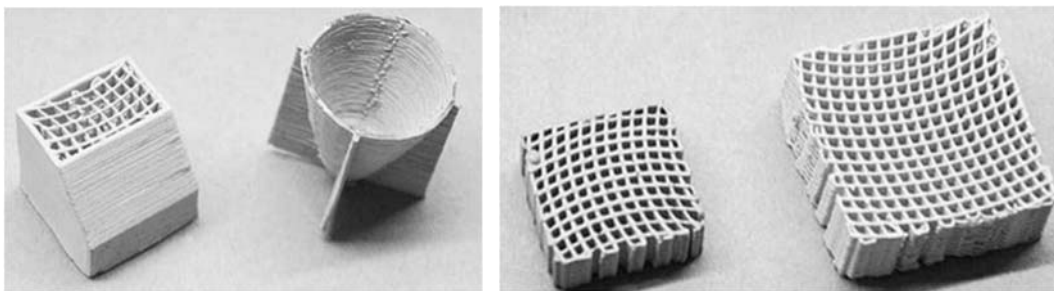


Рисунок 12.2 – Изделия, полученные на 3D-принтере из керамического филамента

Полимерная глина позволяет передать тонкие скульптурные детали, эффективно имитировать различные материалы и текстуры.

Wood или **Woodfill (древеснонаполненный)** – это PLA, в который добавляют очень мелкие древесные опилки, в результате чего изготовленные с применением данного пластика изделия получают фактуру древесины. Применяют для изготовления различных сувениров в виде чашек, фигурок, сувениров. Можно изготавливать архитектурные макеты.

Контрольные вопросы

- 1 Опишите процесс отверждения фотополимерных материалов.
- 2 Укажите способы печати, использующие для изготовления изделий фотополимерные материалы.
- 3 Что может выступать в роли инициатора перехода фотополимера в твердое состояние?
- 4 Перечислите марки фотополимеров, широко используемых в области аддитивных технологий.
- 5 Опишите керамические и древеснонаполненные фотополимеры.

Ход работы

- 1 Получить у преподавателя образцы, полученные способом стереолитографии и послойной печатью филамента.
- 2 Визуально, а также с помощью стереомикроскопа изучить качество поверхности изделий.
- 3 Изучить геометрические размеры образцов.
- 4 Сделать общее заключение о качестве и точности изделий, получаемых стереолитографией и послойной печатью посредством экструзии нагретого полимера.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Основные теоретические положения.

3 Чертежи образцов, описание качества их поверхности, а также величины отклонения от заданных размеров изделий, полученных стереолитографией и экструзией.

Список литературы

- 1 Материаловедение: учебное пособие / И. М. Жарский [и др.]. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 557 с.
- 2 **Лахтин, Ю. М.** Материаловедение: учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 6-е изд., стер. – Москва : Альянс, 2011. – 528 с.
- 3 **Волков, Г. М.** Материаловедение: учебник для вузов / Г. М. Волков, В. М. Зуев. – Минск: Минфин, 2008. – 519 с.
- 4 **Сироткин, О. С.** Основы современного материаловедения: учебник / О. С. Сироткин. – Москва : ИНФРА-М, 2015. – 364 с.
- 5 **Гаршин, А. П.** Материаловедение. Техническая керамика в машиностроении: учебник для академического бакалавриата / А. П. Гаршин. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2016. – 296 с.
- 6 **Каменев, С. В.** Технологии аддитивного производства : учебное пособие / С. В. Каменев, К. С. Романенко. – Оренбург : Оренбург. гос. ун-т, 2017. – 145 с.
- 7 Материаловедение: учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.]. – 8-е изд., стер. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 468 с.: ил.
- 8 Конструкционные материалы: справочник / под ред. Б. Н. Арзамасова. – Москва : Машиностроение, 1990. – 688 с.
- 9 Материаловедение: справочные материалы / авт.-сост. В. А. Брагин, Э. А. Бубнов, В. С. Крохалев. – Екатеринбург, 2018. – 194 с.