

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»



Н. Н. Попок, Г. И. Гвоздь

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛУЧИСТОГО ПЕРЕНОСА ТЕПЛОТЫ ПРИ 3D ПЕЧАТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПИРОМЕТРА МОДЕЛИ «OPTRIS LS»

Методические указания к учебно-исследовательской лабораторной работе
по дисциплине «Термодинамика и теплопередача»
для студентов специальности 1-36 07 02
«Производство изделий на основе трехмерных технологий»

Текстовое электронное издание

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
2021

Об издании – [1](#), [2](#)

1 – дополнительный титульный экран – сведения об издании

УДК 621.1 (075.8)

ББК 34.5-5я73

Одобрены и рекомендованы к изданию методической комиссией
механико-технологического факультета в качестве методических указаний
(протокол № 10 от 30.06.2021 г.)

Кафедра технологии и оборудования машиностроительного производства

РЕЦЕНЗЕНТ:

канд. техн. наук, доц., доц. каф. технологии и оборудования машиностроительного производства А.М. ДОЛГИХ

© Попок Н. Н., Гвоздь Г. И. 2021

© Полоцкий государственный университет, 2021

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения
Для создания текстового электронного издания «Экспериментальное исследование характеристик лучистого переноса теплоты при 3D печати с использованием пирометра модели «OPTRIS LS» Н. Н. Попка и Г. И. Гвоздь использованы текстовый процессор Microsoft Office Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

Технические требования:

1 оптический диск.

Системные требования:

PC с процессором не ниже Core 2 Duo;
2 Gb RAM; свободное место на HDD 1,3 Mb;
Windows XP/7/8/8.1/10
привод CD-ROM/DVD-ROM;
мышь.

Редактор С. Е. Рясова

Подписано к использованию 31.08.2021.

Объем издания: 1,3 Мб. Заказ 550.

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014.

211440, Ул. Блохина, 29,
г. Новополоцк,
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44
<http://www.psu.by>

СОДЕРЖАНИЕ

1. ЦЕЛЬ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	5
2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	5
2.1. Тепловое излучение	5
2.2. Методы пирометрии	6
2.3. Теория излучения черного тела.....	7
3. РАБОТА С ПИРОМЕТРОМ МОДЕЛИ «OPTRIS LS»	10
3.1. Порядок проведения измерений	11
3.2. Оптическое разрешение	12
3.3. Методы определения неизвестного коэффициента излучения	13
4. РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСАДКИ ПРИ ТЕРМОФОРМОВАНИИ.....	13
5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА	15
6. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ	15
7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА	16
8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	16
ПРИЛОЖЕНИЯ	17

1. ЦЕЛЬ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Цель работы – исследование характеристик лучистого переноса теплоты при 3D печати с использованием пирометра модели «Optris LS».

Рекомендуется выполнять работу в следующем порядке:

1. Настроить 3D принтер на печать изделия.
2. Настроить пирометр «Optris LS» для измерения теплового излучения при печати изделия.
3. Отпечатать изделие и измерить уровень теплового излучения при печати слоев материала.
4. Определить коэффициент тепловой усадки материала как отношение заданного размера к назначенному.
5. Сделать выводы о влиянии теплового воздействия при печати на качество изделия.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Тепловое излучение

В нагретых телах часть внутренней энергии вещества может превращаться в энергию излучения. Поэтому нагретые тела являются источниками электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Это излучение называют тепловым излучением.

Электромагнитное излучение всех длин волн обуславливается колебаниями электрических зарядов, входящих в состав вещества, т.е. электронов и ионов. Вследствие значительной массы колеблющихся ионов при их колебании излучается длинноволновое электромагнитное излучение, соответствующее инфракрасному диапазону длин волн. Движение электронов, входящих в состав атомов или молекул, инициирует более коротковолновое излучение, соответствующее видимому и ультрафиолетовому излучениям. Излучение тела сопровождается потерей энергии. Для того чтобы обеспечить длительное излучение энергии, совершаемое за счет энергии теплового движения заряженных частиц вещества, необходимо пополнять убыль внутренней энергии, сообщая телу соответствующее количество теплоты. В состоянии равновесия тело излучает столько энергии, сколько поглощает ее. Тепловое излучение является равновесным излучением. Если тело начнет излучать в единицу времени больше энергии, чем получает ее, то температура тела начнет понижаться и уменьшится количество излучаемой телом энергии до уровня, когда, наконец, не установится равновесие.

Такое равновесное состояние устойчиво, т.е. при нарушении его, равновесное состояние вновь установится. Все другие виды излучения тел являются неравновесными и называются люминесценцией, которая возникает под действием света (фотолюминесценция), потока быстрых электронов (катодоллюминесценция), энергии электрического поля (электролюминесценция) и химических превращений внутри тела (хемиллюминесценция).

Тепловое излучение свойственно всем телам при температуре выше 0 К. Поскольку тепловое излучение является равновесным, то для описания его свойств можно использовать законы термодинамики.

2.2. Методы пирометрии

Пирометр – прибор для бесконтактного измерения температуры тел. Принцип действия основан на измерении мощности теплового излучения объекта измерения преимущественно в диапазонах инфракрасного излучения и видимого света.

Пирометры применяют для дистанционного определения температуры объектов в промышленности, быту, сфере ЖКХ, на предприятиях, где большое значение приобретает контроль температур на различных технологических этапах производства (сталелитейная промышленность, нефтеперерабатывающая отрасль). Пирометры могут выступать в роли средства безопасного дистанционного измерения температур раскаленных объектов, что делает их незаменимыми для обеспечения должного контроля в случаях, когда физическое взаимодействие с контролируемым объектом невозможно из-за высоких температур. Их можно применять в качестве теплокаторов (усовершенствованные модели), для определения областей критических температур в различных производственных сферах.

Практическая пирометрия возникла на рубеже XIX и XX вв. Примерно тогда же и сформировались два основных метода пирометрии: радиационная (яркостная) пирометрия и цветовая пирометрия.

Метод яркостной пирометрии (называемой также радиационной пирометрией, пирометрией по излучению) использует зависимость энергетической яркости излучения объекта в ограниченном диапазоне длин волн от его температуры, т.е. яркость излучения объекта зависит от его температуры. Следовательно, измерив яркость излучения объекта, мы можем измерить (с той или иной точностью) значение температуры объекта. Таким образом, ключевым элементом радиационного пирометра является приемник излучения, преобразующий приходящую на него энергию излучения в иную

физическую величину, чаще всего в ток или в напряжение. Его дополняют оптическая система, собирающая в определенном телесном угле излучение от объекта, и электронная схема с системами питания и индикации, усиливающая, преобразовывающая и отображающая результат измерения.

Метод цветовой оптической пирометрии первоначально основывался на зависимости спектрального распределения потока излучения нагретого объекта от температуры в диапазоне видимых длин волн. Другими словами, от температуры нагретого объекта зависел цвет его излучения. Объекты, нагретые до 700–800 °С, светят темно-оранжевым светом, при 1000–1200 °С цвет свечения становится ярко-оранжевым, постепенно переходя в желтый, при 2000 °С цвет воспринимается нашим глазом как ярко-желтый, а после 2500 °С свечение приближается к белому цвету. Долгое время основными элементами цветового сравнения были глаз оператора и нагретая нить накала (или спираль), расположенная в окуляре пирометра в поле зрения оператора. Нить в окуляре совмещалась с изображением измеряемого объекта. Регулируя проходящий через накальную нить электрический ток, оператор подбирал такое его значение, чтобы цвет нити совпадал с цветом измеряемого объекта. При определенном значении тока изображение нити «исчезало» на фоне нагретого объекта, что являлось критерием равенства температуры объекта и нагретой нити.

В силу особенностей человеческого зрения описанный метод при опоре на восприятие цвета человеческим глазом имеет серьезные ограничения в точности и повторяемости результатов измерений. Поэтому с развитием компонентной базы весьма субъективные визуальные измерения были вытеснены измерениями с помощью нескольких приемников излучения, работающих в различных спектральных диапазонах. Таких приемников может быть и три, и семь, но на практике чаще всего ограничиваются двумя. Таким образом, в настоящее время этот метод основан на зависимости от температуры отношения энергетических яркостей объекта в двух различных областях спектра излучения. Соответственно, этот метод получил название метода пирометрии спектрального отношения.

2.3. Теория излучения черного тела

Излучение электромагнитной энергии происходит в результате перехода системы (атомов, молекул и т.д.) из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией. Тепловое излучение отличается от других видов излучения способом возбуждения излучающих систем, который в данном

случае осуществляется в результате теплового движения атомов и молекул. Методы пирометрии применяют для измерения температур нагретых тел без их механического контакта с термодатчиком. Для определения температуры осуществляют измерение мощности теплового излучения. Вследствие того, что оптические свойства (излучательная способность, коэффициенты отражения и прозрачности) реальных тел могут сильно различаться, невозможно установить универсальный закон, позволяющий характеризовать излучение каждого конкретного тела. По этой причине все законы, приведенные ниже, справедливы только для абстрактного тела с коэффициентом излучения (излучательной способностью) равным 1, такой объект называется абсолютно черным телом (далее АЧТ). Объемная спектральная плотность излучения АЧТ задается формулой Планка

$$E_{\lambda,T} = C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \Delta\lambda \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right],$$

здесь:

$$C_1 = 2\pi h c^2 = (3,7413 \pm 0,0002) \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2,$$

$$C_2 = \frac{hc}{k} = (1,4380 \pm 0,001) \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{град},$$

где c – скорость света в вакууме ($3 \cdot 10^8$ м/с);
 k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);
 λ – длина волны излучения, м;
 T – абсолютная температура, К;
 h – постоянная Планка ($h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).
 ν – частота излучения.

Формула (1) задает спектральное распределение энергии излучаемой в полусферу единицей поверхности, нагретой до температуры T , иногда для описания $E_{\lambda,T}$ используют термин светимость. Формулу (1) можно применять для оценки мощности излучения поверхности с температурой T в спектральном интервале $\Delta\lambda$, середина которого характеризуется длиной волны λ .

В случае, когда $h\nu/kT \ll 1$, можно воспользоваться приближением Рэлея–Джинса

$$E_{\lambda,T} = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT \Delta\lambda \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right].$$

В случае, когда $h\nu / kT \gg 1$, можно воспользоваться приближением Вина

$$E_{\lambda,T} = C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} \right)^{-1} \Delta\lambda \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right].$$

Для вычисления суммарной мощности излучения АЧТ в полусферу по всем длинам волн используют формулу Стефана – Больцмана

$$E_{T_4} = \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5,6687 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})^4$ – постоянная Стефана – Больцмана. В случае излучения реального тела суммарная мощность излучения с единицы поверхности отличается от излучения АЧТ на коэффициент α , называемый интегральной излучательной способностью тела.

Ввиду того, что излучение реальных тел отличается от излучения АЧТ, для описания их излучения с помощью формул (1)–(4) необходимо ввести поправку на степень черноты (или излучательную способность). Процессы поглощения лучистой энергии и ее излучение взаимнообратные, способность тел поглощать лучистую энергию характеризуется коэффициентом поглощения α , который равен отношению интенсивностей поглощенного телом потока энергии к интенсивности упавшего на него потока энергии.

Отношение излучательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела, а является для всех тел одной и той же функцией длины волны и температуры (закон Кирхгофа). Допустим, мы имеем два тела, одно является абсолютно черным, другое имеет отличную от единицы степень черноты. Яркостной температурой тела в лучах с длиной волны λ называется такая температура АЧТ, при которой яркости (т.е. светимости в единицу телесного угла) обоих тел в свете одной и той же длины волны равны между собой. Обозначим через $\varepsilon_{\lambda,T}$ степень черноты тела для длины волны λ и температуры T , тогда мощность излучения с единицы поверхности реального тела при температуре T в спектральном интервале $\Delta\lambda$, середина которого характеризуется длиной волны λ , можно записать

$$E_{\lambda,T} = \varepsilon_{\lambda,T} \cdot C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \Delta\lambda \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right].$$

Аналогичный вид имеет формула Вина для реальных тел:

$$E_{\lambda,T} = \varepsilon_{\lambda,T} \cdot C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} \right)^{-1} \Delta\lambda \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right].$$

Для измерения температур от 1000 до 5000 К на длинах волн, лежащих в видимой и ближней ИК-областях, для расчета температуры пирометрическими методами используют формулу Вина, так как линейаризация функции (1) существенно облегчает вывод формул пирометрии. При этом необходимо помнить, что отклонения от формулы Планка могут давать существенную ошибку в некоторых диапазонах длин волн и температур. Используя определение яркостной температуры и формулу (6), получим следующее соотношение:

$$\varepsilon_{\lambda,T} \cdot C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_i}} \right)^{-1} \Delta\lambda = C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_j}} \right)^{-1} \Delta\lambda,$$

где T_j и T_i – яркостная и истинная термодинамическая температура соответственно.

После сокращения и логарифмирования получим

$$\frac{1}{T_j} - \frac{1}{T_i} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda,T}}.$$

Формула (8) связывает яркостную и истинную температуры реального тела через спектральную излучательную способность (монохроматическую степень черноты) $\varepsilon_{\lambda,T}$.

3. РАБОТА С ПИРОМЕТРОМ МОДЕЛИ «OPTRIS LS»

Внешний вид пирометра модели “Optris LS” представлен на рисунке 1. В состав пирометра входят: 1– объектив; 2 – переключатель фокуса SP/CP; 3 – гнездо для штатива; 5 – триггер; 6 – дисплей; 7 – кнопки Вверх (Up) / Вниз (Down); 8 – клавиши режимов Mode I/II; 9 – рукоятка с отсеком питания; 10 – USB разъем; 11 – гнездо для контактного термометра.

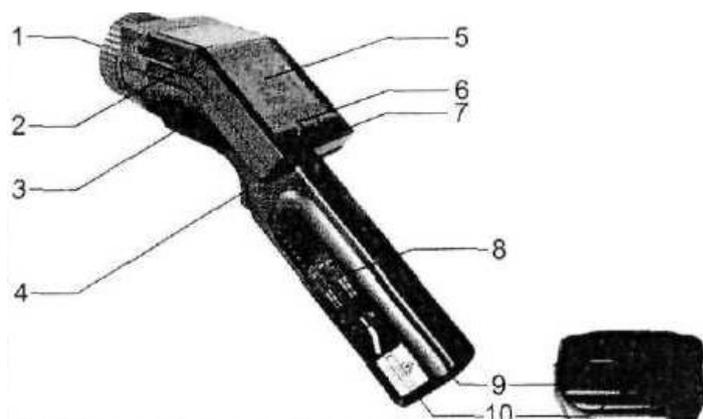


Рисунок 1. – Внешний вид пирометра модели «Optris LS»

3.1. Порядок проведения измерений

Удерживая пирометр, как показано на рисунке 2, его наводят на измеряемый объект. После нажатия на триггер 1 включается дисплей и на поверхности измеряемого объекта лазерным указателем визуализируется место расположения и реальный размер пятна измерения, с которого тепловой датчик преобразует тепловую энергию в электрический сигнал. На дисплее 2 появляется значение температуры поверхности объекта.

Пирометр можно использовать в вертикальном положении (направление вниз). В таком положении легко можно измерить элементы электронных плат. Держать прибор необходимо как показано на рисунке 3. При положении переключателя дисплея в режим Auto (по умолчанию), или в On, кнопка режима Mode I имеет автоматическую функцию триггера 1, и показания на дисплее 2 поворачиваются на 180°. При вертикальном положении прибора, в связи с переключением дисплея, положение кнопок режима (I и II) будет изменяться.



Рисунок 2. – Проведения измерений при горизонтальном положении пирометра

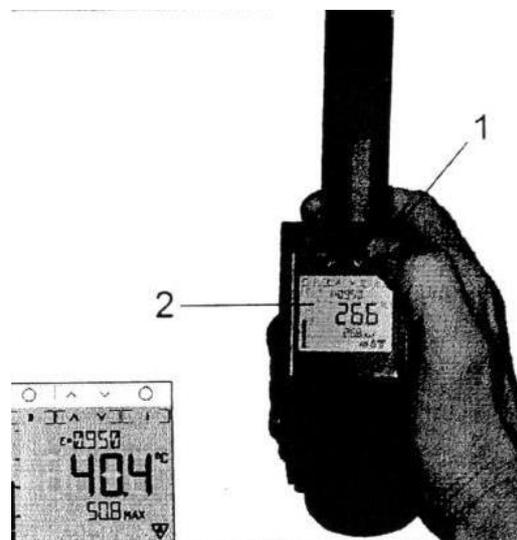


Рисунок 3. – Проведения измерений при вертикальном положении пирометра

Измеренная температура (рисунок 4) отображается на главном дисплее 1. На верхнем дисплее показана макс, температура 2, на нижнем дисплее – значение коэффициента излучения 3. Графический дисплей в правой части 4 показывает тренд температуры. Шкала устанавливается автоматически в пределах между минимальным значением и максимальным значением. Значение температуры сохраняется на дисплее в течение 7 секунд после отпускания триггера. Если после истечения этого времени не было нажато ни одной кнопки, прибор автоматически отключается.

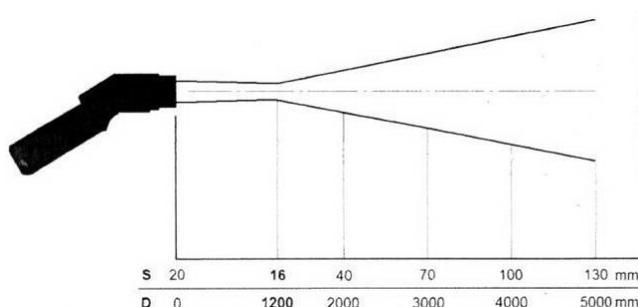


Рисунок 4. – Отображение полученной информации после измерения

3.2. Оптическое разрешение

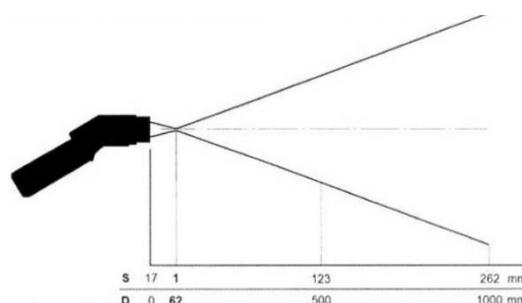
Пирометр Optris LS оснащен перестраиваемой оптикой. Два возможных режима работы обозначаются как SF (стандартный фокус) и CF (близкий фокус) соответственно (рисунок 5).

В режиме SF (стандартный режим измерений) могут быть измерены объекты диаметром от 16 мм и более. Лазер с пересекающимися лучами показывает реальный размер измеряемого пятна, на поверхности объекта, независимо от расстояния до объекта и без параллакса.



$D:S$ (в точке фокуса) = 75:1 / 16 мм на 1200 мм
 $D:S$ (дальнее поле) = 36:1

a



$D:S$ (в точке фокуса) = 62:1 / 1 мм на 62 мм
 $D:S$ (дальнее поле) = 4:1

б

a – режим SF/перекрестный лазер; *б* – режим CF/двухточечный лазер;

D – дистанция до объекта измерения, *s* – размер пятна

Рисунок 5. – Режимы работы пирометра «Optris LS»

В режиме «близкий фокус» CF можно измерять объекты размером от 1 мм (в том числе, компоненты электронных схем). В этом режиме двухлучевой лазер показывает пятно измерения на объекте. Лучи лазера сходятся

в точке фокуса на расстоянии 62 мм от передней плоскости и показывают наименьшее пятно измерения диаметром 1 мм.

Для переключения между режимами «стандартной» и «ближкофокусной» оптики, необходимо передвинуть переключатель режимов Optic switch, находящийся рядом с дисплеем, в соответствующее положение.

3.3. Методы определения неизвестного коэффициента излучения

1. Определяется действительное значение температуры объекта с помощью контактного датчика – термопары, термометра сопротивления и т.д. Затем измеряется температура при помощи пирометра и подбирается такая степень черноты, чтобы показания пирометра совпали с показаниями контактного датчика (термопары).

2. При сравнительно низких температурах объекта (до 250°C) на участок поверхности объекта наклеивается лента черного цвета (например, электроизоляционная). Затем измеряется температура ленты при помощи пирометра при установленной степени черноты 0,95. После этого измеряется с помощью пирометра незакрытая лентой часть объекта и подбирается такая степень черноты, чтобы показания пирометра совпали с результатом измерения ленты.

3. Если часть объекта может быть окрашена, дополнительно окрашиваем ее матовой черной краской, которая имеет степень черноты около 0,98. Затем производятся измерения температуры окрашенного участка при помощи пирометра при установленной степени черноты 0,98. После этого измеряется с помощью пирометра неокрашенная часть объекта и подбирается такая степень черноты, чтобы показания пирометра совпали с результатом измерения на окрашенном участке.

4. РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСАДКИ ПРИ ТЕРМОФОРМОВАНИИ

Обычно вещества расширяются при нагревании и сжимаются при охлаждении. Поэтому, когда слои горячего полимера, которым ведется печать, остывают, происходит усадка.

Усадка – это изменение размеров изделия по сравнению с заданными на чертеже.

Величина усадки и ее колебания определяют точность размеров изделий и поэтому являются важнейшими технологическими показателями.

Величина усадки зависит от физико-химических свойств и количества наполнителя, температурного режима переработки, содержания

влаги в материале, характера течения пластмассы в процессе переработки (значения величин усадки различных термопластов представлены в приложении А).

Процесс усадки носит релаксационный характер, определяется ориентационными и кристаллизационными процессами при формовании и зависит от большого числа конструктивных и технологических факторов. Кроме того, на усадку оказывают влияние удельный объем (величина, обратная плотности), изменяющийся в зависимости от температуры и давления, и коэффициент линейного термического расширения.

Чтобы управлять всем процессом в совокупности, необходимо иметь четкое представление о поведении материалов в процессе термоформования, о конструкторско-технологических особенностях используемого оборудования и других факторах, влияющих на величину усадки изделий и, соответственно, на отклонение их размеров от номинального размера.

Обычно усадка изделия бывает тем больше, чем больше коэффициент расширения материала α . В общем случае пластмасса и пластик имеют сравнительно высокие значения коэффициентов расширения. Увеличение их линейных размеров может многократно превышать расширение металлов в тех же условиях. Такое поведение обусловлено структурой макромолекул полимеров.

Абсолютное изменение размеров (Δl , мм) твердых тел в зависимости от температуры рассчитывается по формуле

$$\Delta l = l\alpha(T_1 - T_2),$$

где l – исходный размер тела, мм;

α – коэффициент линейного теплового расширения материала, K^{-1} ;

T_1 и T_2 – начальная и конечная температуры соответственно, $^{\circ}C$.

С учетом относительного изменения размера изделия его технологическая усадка рассчитывается по следующей формуле:

$$s = \Delta l / l \cdot 100\%.$$

Величина усадки зависит от марки пластика, партии, поставки и др. Усадка неравномерна и зависит от размеров модели и ориентации слоёв, длительности печати.

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Провести настройку принтера на печать.
2. Настроить пирометр «Optris LS» на коэффициент излучения материала экспериментального образца.
3. Распечатать экспериментальный образец и провести измерение теплового излучения нагрева материала в экструдере и отпечатанных слоев материала.
4. Замерить основные параметры экспериментального образца (длину a , ширину b , высоту c), как показано на рисунке 6.

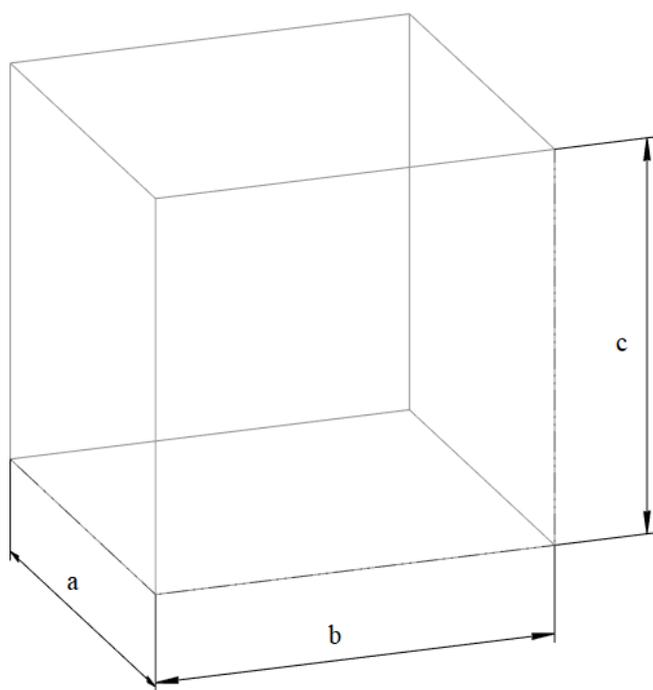


Рисунок 6. – Обозначение контролируемых параметров

5. Определить среднее значение ребер куба.
6. Вычислить коэффициент усадки материала и сравнить полученный результат с табличными данными по приложению Б.

6. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

1. 3D-принтер Mass Portal Pharaoh XD 30.
2. АБС-пластик (ТУ2214-019-00203 521).
3. Пирометр модели «Optris Lazer Sight».
4. Видеоизмерительный микроскоп NORGAU NVM-4030D.
5. Микрометр МК-25.

7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА

1. Название, цель работы.
2. Общие сведения о тепловом излучении, методах пирометрии и теории излучения черного тела.
3. Результаты измерений теплового излучения при 3D печати.
4. Расчет технологической усадки отпечатанного изделия.
5. Протоколы исследований (приложение А).
6. Выводы.

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы цель и порядок выполнения работы?
2. Что такое тепловое излучение?
3. Достоинства и недостатки методов бесконтактного измерения температуры?
4. Методы определения неизвестного коэффициента излучения.
5. Чему равен коэффициент излучения абсолютно черного тела?
6. Опишите схему метода определения теплового излучения материала с использованием пирометра «Optris Lazer Sight».
7. Что такое усадка?
8. От чего зависит величина усадки материала?
9. Как определить абсолютное изменение размеров твердого тела?
10. Как рассчитать технологическую усадку изделия?

Протоколы исследований

Таблица 1. – Параметры печати

Параметры настройки печати	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4
Заполняемость образца, %				
t, °C стола				
t, °C экструдера				
Скорость печати, мм/с				
Время печати, мин				

Таблица 2. – Параметры образца

Параметры образца	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4
Длина (a), мм				
Ширина (b), мм				
Высота (c), мм				
Объем, мм ³				
Отклонение, %				

Таблица 3 – Исследование температуры образца

Интервал времени, мин									
Температура образца, °C									

Плотность и усадка термопластов

№	Термопласты	Плотность, г / см ³	Величина усадки, (%)
1.	ПЭНД (ГОСТ 16338)	0,91–0,93	1–4
2.	ПЭВД (ГОСТ 16337)	0,92–0,96	10–3,5
3.	Полипропилен (ГОСТ 26996)	0,91–0,93	1,2–2,5
4.	Полистирол (ГОСТ 20282)	1,05–1,08	0,4–0,8
5.	Ударопрочный полистирол (ГОСТ 28250)	1,05	0,4–1,2
6.	АБС-пластик (ТУ2214-019-00203 521)	1,06–1,19	0,3–0,7
7.	Сополимеры стирола МС, МСН (ГОСТ 122271)	1,08	0,4–0,6
8.	Полиамид ПА-6 (ОСТ 6-06-С9)	1,14	0,6–2,5
9.	Полиамид ПА-610 (ГОСТ 10589)	1,09–1,11	0,8–1,5
10.	Полиамид ПА -12 (ОСТ 6-05-425)	1,02–1,13	0,9–1,2
11.	Поликарбонат (ТУ 6-05-1668)	1,2	0,5–0,8
12.	Полиформальдегид и сополимеры (ТУ 6-05-1177)	1,4–1,42	1,5–3,5
13.	Полиэтилснтреталат (ТУ 6-05-1984) ПЭТФ	1,35	1,2–2
14.	Полибутилентереталат (ТУ 6-05 211-1951) ПБТФ	1,3	1,2–2
15.	Полимстилмстакрилат (ОСТ 6-01-707) ПММА	1,18	0,2–0,6
16.	Полисульфон (ТУ 6-05-1969)	1,24–1,3	0,7–0,8
17.	Полиарилат (ТУ 6-05-221-422)	1,2–1,25	0,7–1,0
18.	Поливинилхлорид (ТУ 6-05-751768)	1,1–1,4	1–2,5
19.	Полифениленоксид (норил), полиоксифенилен	1,05–1,1	0,5–0,7
20.	Этролы (ТУ-05-1528; ТУ6-05-1418)	1,2–1,3	0,2–0,9
21.	Полиамид ПА-6 стеклонаполн. 30% (ОСТ 6-11-498)	1,28–1,38	0,3–0,8
22.	Полиамид ПА-66 стеклонаполн. 30% (ОСТ 6-11-498)	1,3–1,38	0,2–0,8
23.	Композиция АБС+ПК	1,15	0,5–0,7