

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

В. Л. Ланин, И. В. Самуйлов

**АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ИННОВАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики
и радиоэлектроники в качестве пособия для специальности
1-39 80 03 «Электронные системы и технологии»*

Минск БГУИР 2021

УДК [621.382.2/3:001895](076.5)

ББК 32.85я73+65.291.5я73

Л22

Рецензенты:

кафедра конструирования и производства приборов
Белорусского национального технического
университета (протокол № 5 от 25.01.2021);

член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси
доктор технических наук, профессор В. А. Пилипенко

Ланин, В. Л.

Л22

Аддитивные технологии инновационного производства. Лабораторный практикум : пособие / В. Л. Ланин, И. В. Самуйлов. – Минск : БГУИР, 2021. – 76 с. : ил.

ISBN 978-985-543-622-6.

Пособие содержит описание лабораторных работ по исследованию аддитивных технологий инновационного производства электронных систем, включая разработку программ изготовления MID-изделий, их печать на 3D-принтере, лазерное структурирование, технологию сборки и монтажа интегрированных электронных устройств. Предназначено для закрепления и углубления теоретических знаний, приобретения практических навыков работы по созданию моделей MID-изделий в программных средах SOLIDWORKS, PRUSA-Slicer, а также работы с технологическим оборудованием и специализированной оснасткой.

УДК [621.382.2/3:001895](076.5)

ББК 32.85я73+65.291.5я73

ISBN 978-985-543-622-6

© Ланин В. Л., Самуйлов И. В., 2021
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1

Разработка компьютерной модели для изготовления MID-изделий на 3D-принтере4

Лабораторная работа № 2

Исследование процесса изготовления MID-изделий на 3D-принтере.....16

Лабораторная работа № 3

Исследование технологии лазерного структурирования MID-изделий 34

Лабораторная работа № 4

Исследование технологии сборки и монтажа интегрированных электронных систем.....49

Лабораторная работа № 5

Микроконтроллерное управление технологическими процессами пайки SMD-компонентов68

Литература76

Лабораторная работа № 1

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ MID-ИЗДЕЛИЙ НА 3D-ПРИНТЕРЕ

Цель работы

Получение практических навыков по созданию моделей MID-изделий в программных средах SOLIDWORKS, PRUSA-Slicer и настройке параметров модели.

Теоретические сведения

Технология создания объемных схем на пластике (3D MID) появилась в 80-х годах прошлого века. 3D MID-изделия представляют собой отлитую деталь из термопластика со структурированной схемой проводников. Однако технология оказалась слишком передовой для своего времени, поэтому недостаточно совершенное оборудование и материалы не позволили ей получить широкое распространение и заменить традиционные плоские печатные платы. В настоящее время более дешевые и быстрые технологические процессы печати вывели 3D MID на качественно новый уровень, дав этой технологии второе рождение.

На сегодняшний день с появлением новых технологических процессов, материалов и технологий существует острая необходимость удовлетворения требованиям миниатюризации электроники и увеличения ее функциональности. Одним из решений проблемы, связанной с миниатюризацией, является использование пластиковых элементов конструкций, которые наибольшее распространение получили в автомобилестроении, в частности, автомобильной электронике, мобильных телекоммуникационных устройствах и медицинской технике (рис. 1.1).

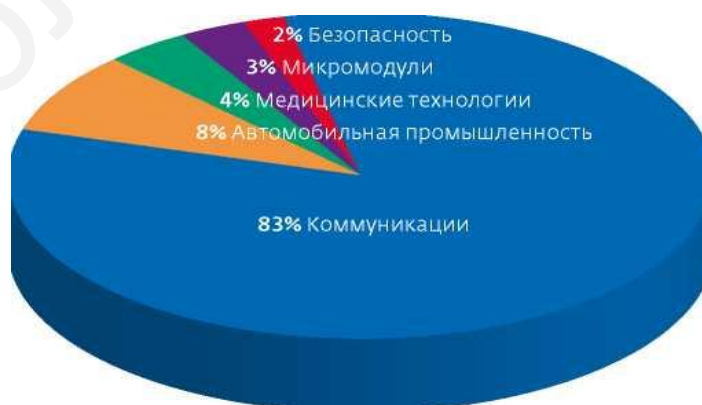


Рис. 1.1. Мировой рынок технологий 3D MID

Важной особенностью 3D MID-устройств является уменьшение количества деталей в процессе производства готового изделия. К примеру, проводники могут быть нанесены непосредственно на пластиковый корпус изделия, тем самым избавляя от необходимости использования печатных плат. 3D MID-устройства позволяют уменьшить число сборочных частей изделия, а также его стоимость за счет интеграции сенсоров, датчиков, разъемов, кнопок, индикаторов и других элементов и благодаря возможности использования трехмерного пространства.

Существует несколько технологий создания 3D MID-структур, каждая из которых имеет свои особенности (табл. 1.1). Трехмерная печать может осуществляться с использованием различных материалов и разными способами, но в основе любого из них лежит принцип послойного создания твердого объекта. Наибольшее распространение в массовом производстве получили методы двухкомпонентного литья и прямого лазерного структурирования (LDS).

Таблица 1.1

Характеристики современных процессов 3D MID-изделий

Процесс	Минимальная ширина дорожки, мкм	Возможность объемного формирования	Изменение рисунка	Выбор материала	Объем производства	Затраты на техническое обслуживание	Затраты на оборудование	Первоначальные инвестиции
LDS	75	Высокая	Простое	Средний	Любой	Высокие	Низкие	Высокие
Аддитивная металлization (ADDIMID)	–			Большой		Средние		Средние/высокие
MIPTEC	50			Малый		Высокие		
Фотолитография	30	Средняя	Средней сложности	Очень большой	Очень высокий	Низкие	Низкие/средние	Средние
Двухкомпонентное литье	150	Высокая	Сложное	Малый		Низкие/средние	Высокие	Очень высокие
Горячее тиснение	300	Низкая	Средней сложности	Очень большой	Высокий	Средние	Средние	Низкие

При создании заготовки методом двухкомпонентного литья деталь отливается из активированного для осаждения металла пластика. Затем участки поверхности, на которых не должно быть проводящих дорожек, заливаются обычным, не активированным пластиком.

Около 80 % всех LDS-изделий применяются в устройствах связи, в первую очередь – в мобильных телефонах. Технологии 3D MID позволяют создавать на одном

основании (крышке корпуса) сразу все необходимые полосковые антенны – GSM, GPS, WiFi и Bluetooth. Это дает возможность свести к минимуму влияние их размеров и положения на конструкцию телефона. Около 40 % высокотехнологичных смартфонов, присутствующих сейчас на мировом рынке, имеют, по крайней мере, один компонент, изготовленный по технологии 3D MID. Производство таких LDS-изделий в основном сосредоточено в странах Юго-Восточной Азии. Более сложные изделия – автомобильное оборудование, медицинская техника – изготавливаются главным образом в Европе (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Примеры 3D MID-изделий:
а – антенна мобильного устройства; б – миниатюрное электронное устройство

Материалы 3D MID

Ключевой компонент в технологиях 3D MID – пластик, на который наносится металлическое покрытие. Технологии покрытия пластиков металлами известны уже давно. Постоянно совершенствуясь, они получили широкое распространение в самых различных отраслях промышленности. Следующим шагом развития этих технологий стала селективная металлизация, которая лежит в основе 3D MID.

Для 3D MID подходят многие пластики, которые доступны на мировом рынке (табл. 1.2). Все пластики можно разделить на три группы: аморфные (ABS, PC), полукристаллические (PA, PP) и жидкокристаллические (LCP). Пластики последней группы отличаются от остальных тем, что LCP сохраняют кристаллическую структуру даже будучи расплавленными и более текучи в этом состоянии. Такие полимеры имеют значительно лучшие характеристики, значимые для 3D MID, однако по сравнению с остальными пластиками их стоимость наиболее высока. Для получения оптимального сочетания свойств полимера и его стоимости в некоторых случаях смешивают различные пластики.

Пластики для 3D MID-изделий

Группа	Материал	Обозначение	Прочность металлизации на отрыв		Вид пайки изделия		
			Химическое осаждение	Горячее тиснение	Групповая пайка		Селективная пайка
					Стандартными припоями	Низкотемпературными припоями	
Пластмасса массового потребления	Полипропилен	PP	+	+	-	0	+
	Акрилонитрил-бутадиен-стирол	ABS	+	+	-	-	+
	Поликарбонат	PC	+	+	-	+	+
Техническая пластмасса	Полиэтилентерефталат	PET	-	+	-	0	+
	Полибутилентерефталат	PBT	+	+	0	+	+
	Полиамид	PA	+	+	0	+	+
	Полифениленсульфид	PPS		-	+	+	+

Примечание. Прочность на отрыв: «+» – больше 0,8 Н/м, «0» – в интервале 0,5–0,8 Н/м, «-» – ниже 0,5 Н/м. Вид пайки: «+» – стандартный процесс, «П» – требуется подбор параметров, «-» – специальный процесс. Пластмассы расположены в порядке увеличения стоимости.

Если на пластиковое основание монтируются кристаллы микросхем, очень важно подобрать пластик, коэффициент температурного расширения (КТР) которого близок к КТР кристаллов. В противном случае из-за неравномерного теплового расширения основания и кристаллов при термоциклировании может нарушиться целостность паяных соединений и самих кристаллов. Также нужно учитывать, что некоторые пластики гигроскопичны и изменяют размеры под действием атмосферной влаги. Для того чтобы пластик стал пригодным для 3D MID, в него необходимо добавить специальные присадки. Для технологии LDS это металлоорганические комплексы, которые активируются лазерным лучом. Однако следует иметь в виду, что присадки могут отрицательно влиять на важные для 3D MID свойства, например, антипирены могут ухудшить адгезию металла к пластику. Перед выбором пластика и присадок необходимо проверить их совместимость с технологиями 3D MID.

Для сборки изделий 3D MID применяются паяльные пасты с низкой температурой оплавления и токопроводящие клеи. Паяльные пасты выбирают исходя из свойств конкретного пластика. Для монтажа кристаллов методом Flip Chip

иногда применяют анизотропные токопроводящие клеи, проводимость которых зависит от наполнителя.

Проектирование 3D-моделей

Детали, полученные механической обработкой, отличаются по внешнему виду от деталей, полученных литьем. У них имеются типичные острые наружные и внутренние грани с малыми закруглениями углов, резкие изменения толщин сечений, простые полости без переходов, симметричные вдоль одной оси, большей частью в виде тел вращения. Для деталей, получаемых литьем, такая форма непригодна и во многих случаях недопустима. При таких формах возникают литейные дефекты – усадочные раковины, наружные и внутренние трещины, которые снижают прочность и плотность деталей. Отливки должны быть закругленной формы с плавным переходом различных толщин; массивные узлы отливки необходимо облегчать. Необходимость изменения формы детали (частичной или полной) связана с закономерностями технологии литья. При охлаждении жидкого материала изменяется его объем, что следует учитывать при выборе размеров отливки и ее сечений, особенно там, где соединяются между собой стенки различной толщины.

На рис. 1.3 показаны примеры правильных решений и примеры неудачного сопряжения стенок отливки, приводящего к возникновению усадочных пороков.

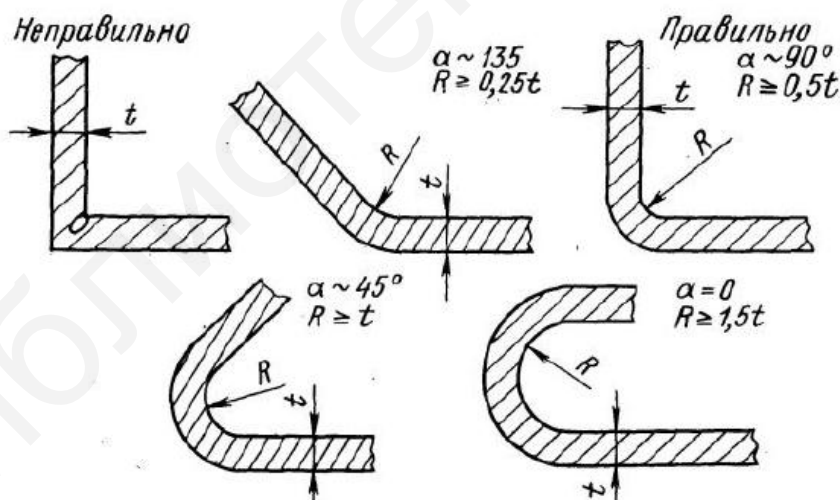


Рис. 1.3. Неправильное и правильное сопряжения стенок одинаковой толщины

В отливках, подвергаемых при эксплуатации динамическим нагрузкам, необходимы плавные переходы толщин стенок. При сопряжении двух стенок различной толщины следует пользоваться рекомендациями, приведенными на рис. 1.4.

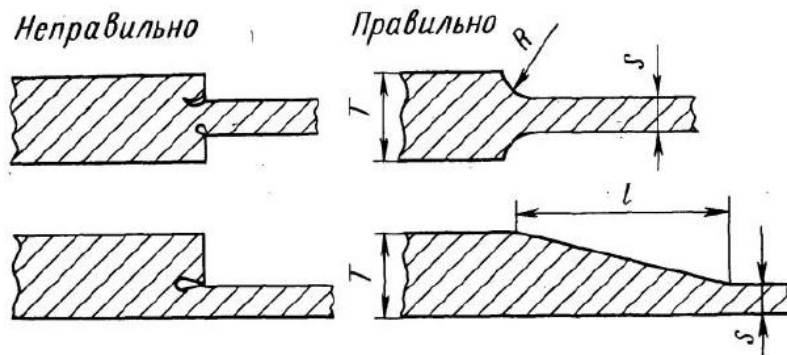


Рис. 1.4. Неправильное и правильное сопряжения стенок разной толщины

На рис. 1.5 показан пример соединения под углом около 90° двух стенок различной толщины, на рис. 1.6 – тавровое соединение.

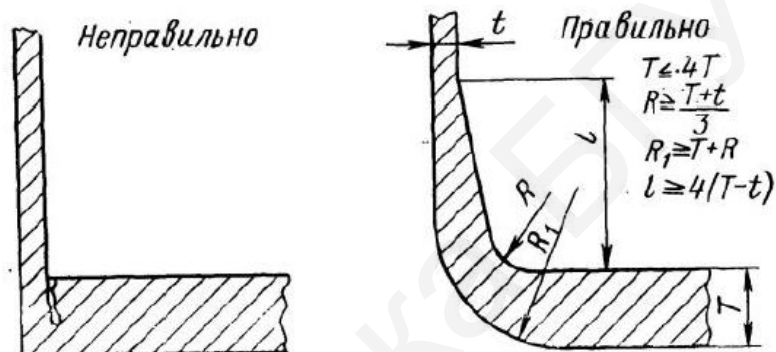
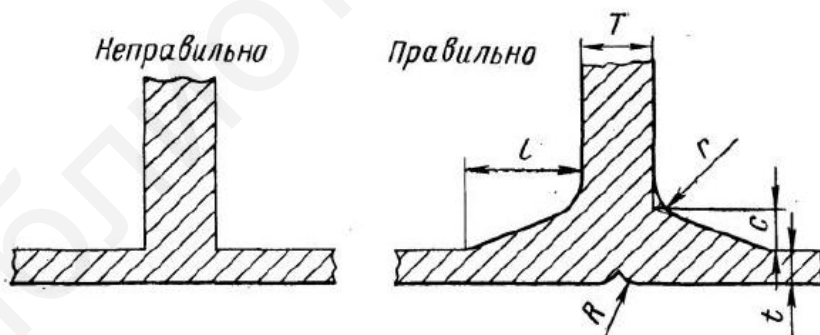


Рис. 1.5. Неправильное и правильное сопряжения стенок разной толщины, расположенных под углом 90°



$$t \leq 4t; \quad l \geq 4(T-t); \quad c = T-t; \quad r = \frac{T+t}{3}; \quad R = T-r$$

Рис. 1.6. Сопряжение стенок, перпендикулярных друг другу

Из приведенных схем следует, что в конструкциях не должно быть местных узлов – скоплений материала и острых углов. При использовании этих приемов в процессе конструирования отливки устраняются резкие перепады температур при охлаждении и затвердевании материалов и предупреждается образование литейных дефектов.

В настоящее время существует большое множество CAD программных продуктов, способных проектировать цифровые модели любой сложности. Каждая из программ обладает теми или иными недостатками в виде погрешностей проектирования, которые влияют на качество изделий, получаемых на 3D-принтерах.

Программная среда PRUSA-Slicer

Пакет PRUSA-Slicer – бесплатная программа с открытым исходным кодом для настройки печати 3D-модели, оптимизированная под возможности принтера PRUSA i3 (рис. 1.7, 1.8).

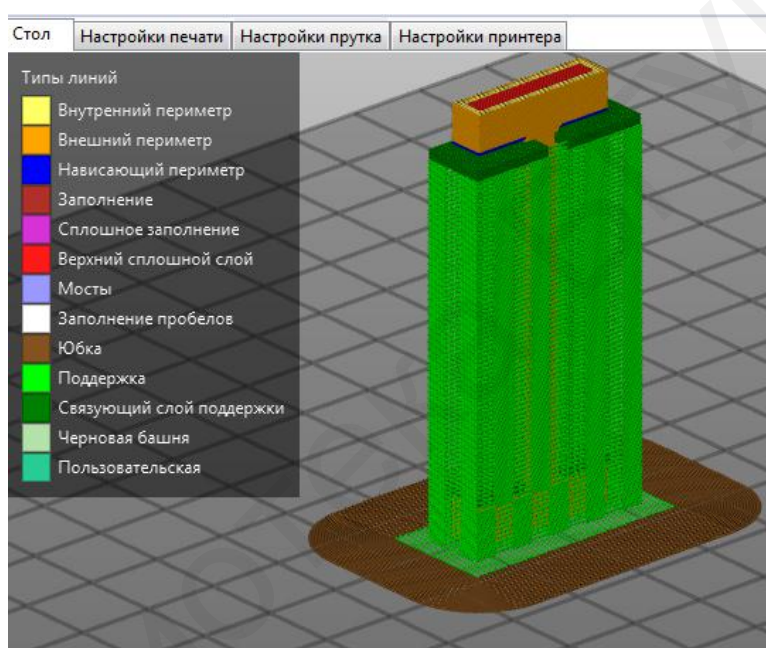


Рис. 1.7. Модель, загруженная в программу Prusa-Slicer

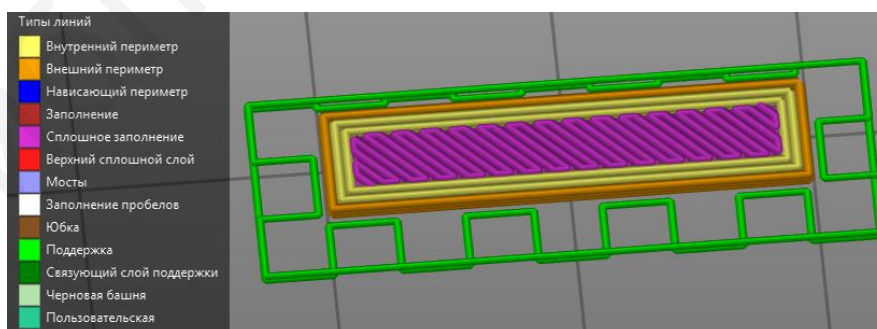


Рис. 1.8. Отображение слоев модели 2-6

На рис. 1.9 изображен интерфейс меню «Настройки печати» → «Слой и периметры». Параметр «Высота слоя» зависит от диаметра экструдера, для стандартного размера экструдера в 0,4 мм обычно выбирается из предела 0,2–0,4. Массивные модели для экономии материала печатают с полостями внутри.

Настройка «Вертикальные оболочки» регулирует количество слоев по контуру, которые будут плотно прилегать друг к другу. Настройка «Горизонтальные оболочки» определяет число горизонтальных слоев со сплошным заполнением.

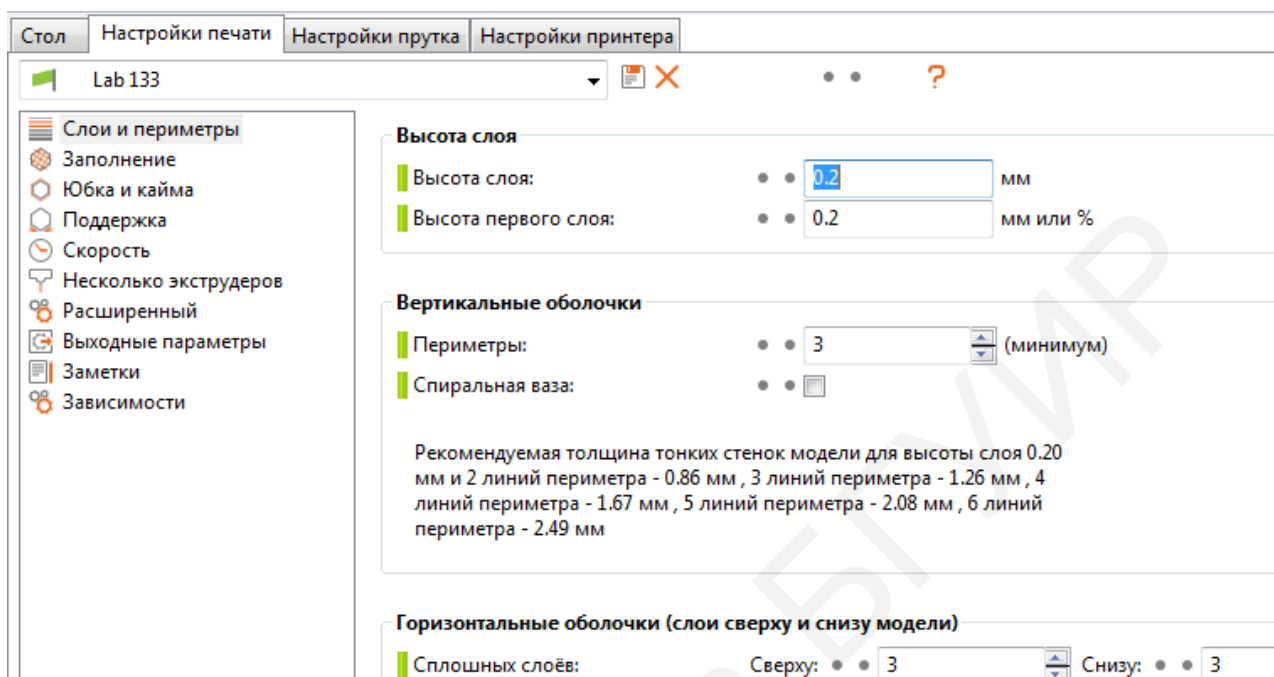


Рис. 1.9. Интерфейс меню «Настройки печати» → «Слои и периметры»

На рис. 1.10 изображен интерфейс меню «Настройки печати» → «Заполнение». Параметр «Плотность заполнения» регулирует плотность заполнения материалом внутренней области модели, для экономии материала устанавливается от 20 до 100 %. Шаблон заполнения позволяет выбрать тип заполнения из 13 вариантов. Данные параметры подбираются индивидуально под модель.

На рис. 1.11 приведен интерфейс меню «Настройки печати» → «Юбка и кайма». В данном меню идет настройка печати первого слоя. Для лучшей адгезии модели с поверхностью стола обычно печатается одинарный слой определенной ширины – «Юбка». Параметр «Ширина каймы» регулирует ее ширину.

На рис. 1.12 изображен интерфейс меню «Настройки прутка» → «Профиль прутка». В данном меню настраивается диаметр провода, а также температура стола и экструдера. При печати больших моделей температуру первого слоя выбирают выше температур последующих слоев для лучшей адгезии материала с подложкой. Данная настройка более критична для PLA-пластика. Для наших целей достаточно установить одну температуру.

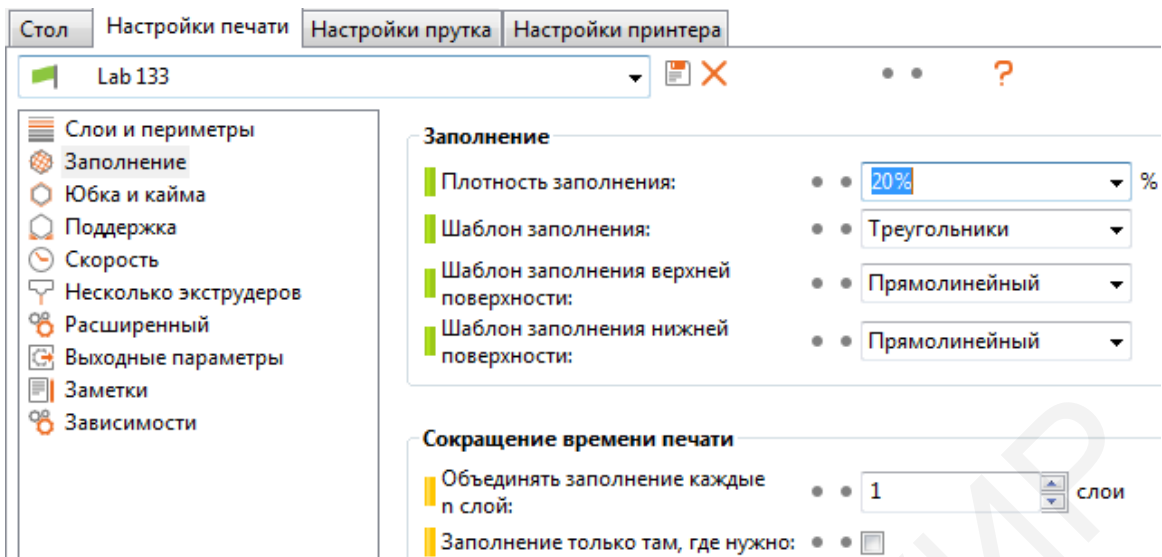


Рис. 1.10. Интерфейс меню «Настройки печати» → «Заполнение»

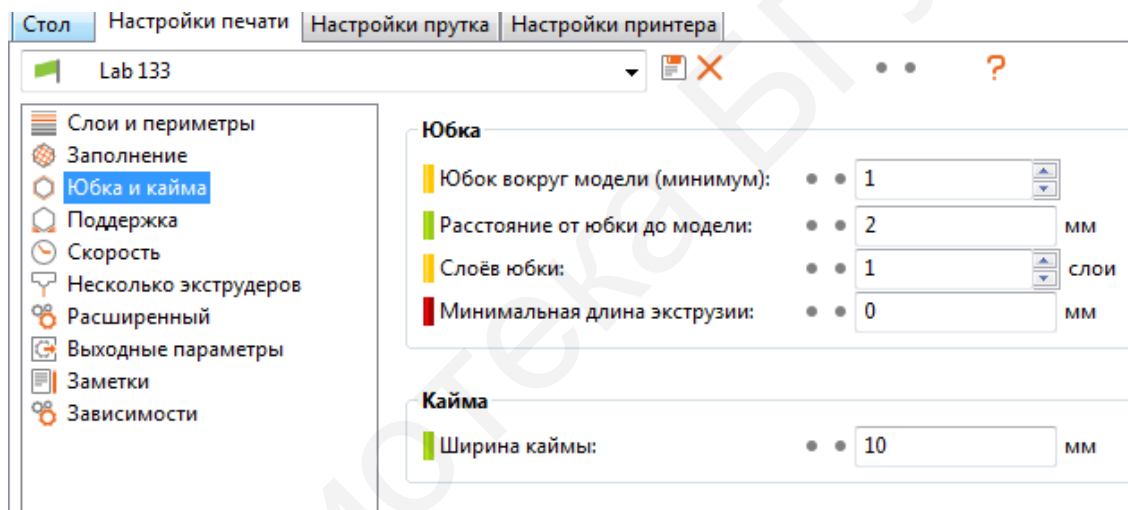


Рис. 1.11. Интерфейс меню «Настройки печати» → «Юбка и кайма»

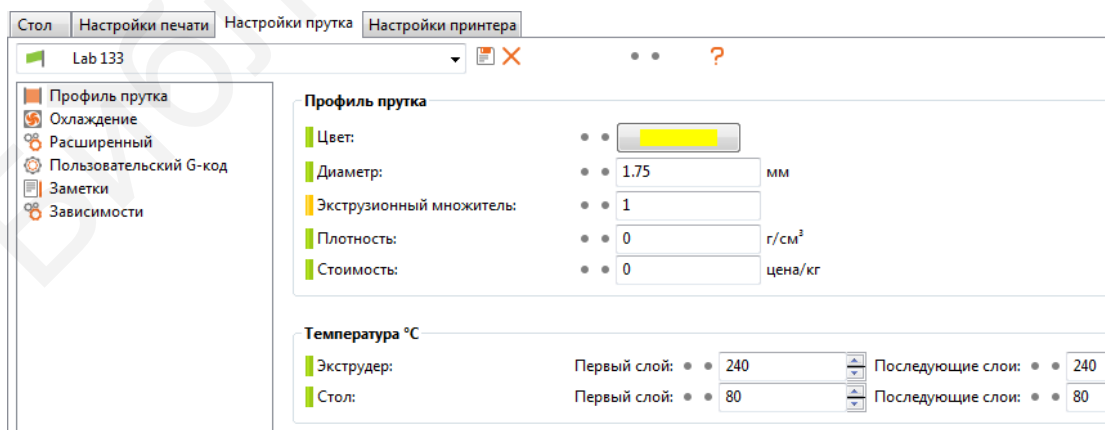


Рис. 1.12. Интерфейс меню «Настройки прутка» → «Профиль прутка»

При необходимости можно изменить положение модели на столе (рис. 1.13).



Рис. 1.13. Настройка ориентации модели в меню «Стол»

Порядок выполнения работы

1. Получить номер модели у преподавателя (рис. 1.14–1.19). Согласно этим данным создать модель в среде SolidWorks. Сохранить модель в формате .stl.

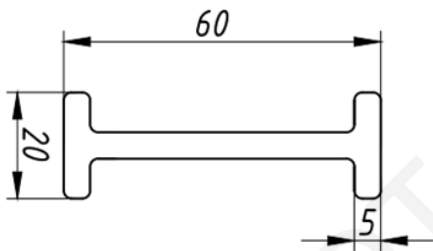


Рис. 1.14. Модель № 1 для контроля прочности

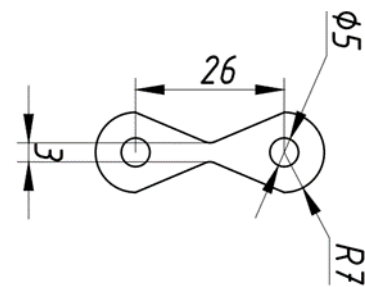


Рис. 1.15. Модель № 2 для контроля прочности

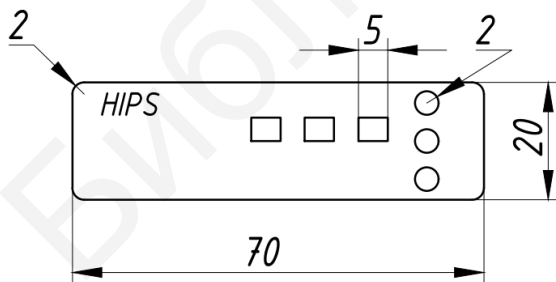


Рис. 1.16. Модель № 3 для измерения точности печати

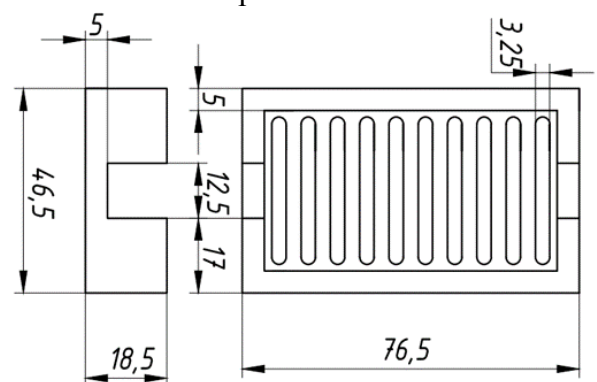


Рис. 1.17. Модель № 4. Корпус для портативного вольтметра

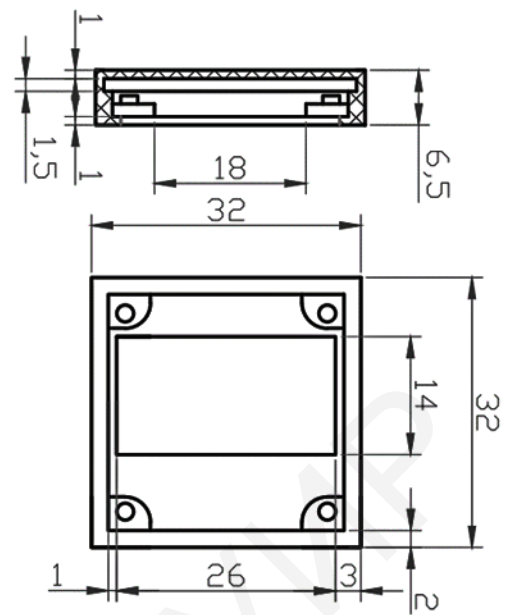
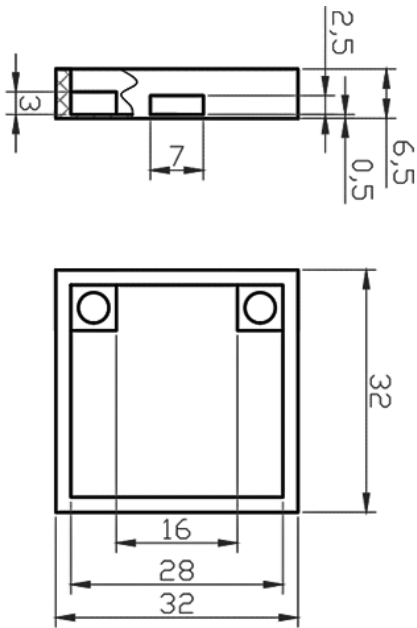


Рис. 1.18. Модель № 5. Корпус частотомера Рис. 1.19. Модель № 6. Корпус индикатора

2. Провести импорт модели в среду PRUSA-Slicer: «Файл»→«Импорт»→«Загрузить STL», затем указать путь к файлу
3. Получить номер варианта у преподавателя. Настроить модель в программе PRUSA-Slicer согласно варианту и типу пластика (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Список заданий по вариантам

Вариант	Высота слоя	HIPS		PLA	
		Температура экструдера	Температура стола	Температура экструдера	Температура стола
1	0,2	270	80	180	50
2	0,25	250	80	210	50
3	0,3	230	80	240	50
4	0,25	270	80	180	50
5	0,2	250	70	210	30
6	0,25	230	70	240	30
7	0,3	270	70	210	30
8	0,25	250	70	180	30

Примечание. Высота слоя указана для экструдера диаметром 0,4 мм.

4. Разделить модель на отдельные печатные слои, нажав в меню «Стол» кнопку «Нарезать». Заполнить табл. 1.4 расчетными параметрами.

Результаты расчетов

Тип заполнения	Спектральная октограмма			Концентрический			Прямоугольный			Медовые соты			Режим включенной поддержки
	10	50	90	10	50	90	10	50	90	10	50	90	
Заполнение, %													90
Расчетное время													

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Чертеж детали.
4. Выбор материала детали.
5. Скриншоты физической модели.
6. Скриншоты настройки режимов печати 3D MID-изделия.
7. Алгоритм программы печати модели
8. Результаты расчета времени печати (см. табл. 1.4).

Контрольные вопросы и задания

1. Что представляют собой MID-изделия? Назовите сферы их применения.
2. Какие геометрические параметры необходимо соблюдать при производстве 3D MID-изделий?
3. Опишите настройку печати и параметров модели в программе PRUSA-Slicer.
4. Назовите технологии и материалы для 3D-печати.
5. Какие параметры печати влияют на расчетное время печати?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ MID-ИЗДЕЛИЙ НА 3D-ПРИНТЕРЕ

Цель работы

Исследование процесса изготовления MID-изделий и определение точности печати изделий на 3D-принтере PRUSA i3.

Теоретические сведения

3D-печать, или «аддитивное производство», – процесс создания цельных трехмерных объектов практически любой геометрической формы на основе цифровой модели. 3D-печать основана на концепции построения объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры модели. Фактически 3D-печать является полной противоположностью таких традиционных методов механического производства и обработки, как фрезеровка или резка, где формирование изделия происходит за счет удаления лишнего материала (так называемое «субтрактивное производство»). Перечень методов аддитивного производства приведен в табл. 2.1.

Процесс печати состоит из ряда этапов:

- создания или импорта цифровой трехмерной модели;
- обработки модели для печати с добавлением поддерживающих структур;
- расположения и ориентировки цифровой модели на рабочем столе;
- слайсинга – нарезки цифровой модели на отдельные слои с преобразованием данных в инструкции для работы принтера, называемые G-кодом;
- непосредственно печати;
- физической или химической обработки готовой модели (при необходимости).

Таблица 2.1

Сводная характеристика методов аддитивного производства

Метод	Технология	Используемые материалы
Экструзионный	Моделирование методом послойного наплавления (FDM или FFF)	Термопластики (такие как полилактид (PLA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS) и др.)
Проволочный	Производство произвольных форм электронно-лучевой плавкой (EBF3)	Практически любые металлические сплавы

Метод	Технология	Используемые материалы
Порошко- вый	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	Практически любые металлические сплавы
	Электронно-лучевая плавка (EBM)	Титановые сплавы
	Выборочная лазерная плавка (SLM)	Титановые сплавы, кобальтохромовые сплавы, нержавеющая сталь, алюминий
	Выборочное тепловое спекание (SHS)	Порошковые термопластики
	Выборочное лазерное спекание (SLS)	Термопластики, металлические порошки, керамические порошки
Струйный	Струйная трехмерная печать (3DP)	Гипсовые пластики, металлические порошки, песчаные смеси
Ламиниро- вание	Изготовление объектов методом ламинирования (LOM)	Бумага, металлическая фольга, пластиковая пленка
Полимери- зация	Стереолитография (SLA)	Фотополимеры
	Цифровая светодиодная проекция (DLP)	Фотополимеры

Метод полимеризации основан на лазерной стереолитографии (SLA). Принтер состоит из резервуара, в который налита специальная жидкость (фотополимер). При воздействии на эту жидкость лазерным, ультрафиолетовым или инфракрасным излучением жидкость превращается в твердый пластик.

Сверху в жидкость опускается специальная платформа, затем лазерный луч проходит по слою (как правило, около 0,03 мм) жидкости под платформой. В результате жидкость затвердевает и прилипает к платформе, таким образом 3D-принтер создает первый слой предмета. Затем принтер поднимает платформу на высоту слоя и все повторяется заново.

Основные достоинства метода полимеризации:

- высокая точность печати, фактически ничем не ограниченная;
- высокая скорость печати;
- отсутствие технологических проблем с печатью (перегрев, раслаивание, обрушение под весом, сбой маршрута головки, плохое прилипание).

Метод порошковой печати является одним из методов аддитивного производства, который заключается в выборочном спекании порошковых материалов. Слои модели спекаются в тонком слое порошкообразного материала, после чего рабочая платформа опускается и наносится новый слой порошка. Процесс повторяется до получения цельной модели. Неизрасходованный материал остается в рабочей камере и служит для поддержки нависающих слоев, не требуя создания специальных опор.

Наиболее распространенными являются методы, основанные на спекании с помощью лазеров – выборочное лазерное спекание (SLS). Схема установки приведена на рис. 2.1. Данный метод применяется для работы с металлами и полимерами (например, полиамидом (PA), армированным стекловолокном (PA-GF), стекловолокном (GF), полиэфирэфиркетон (PEEK), полистиролом (PS), алюминидом, полиамидом, армированным углеволокном (Carbonmide), эластомерами). Для металлов используется прямое лазерное спекание (DMLS).

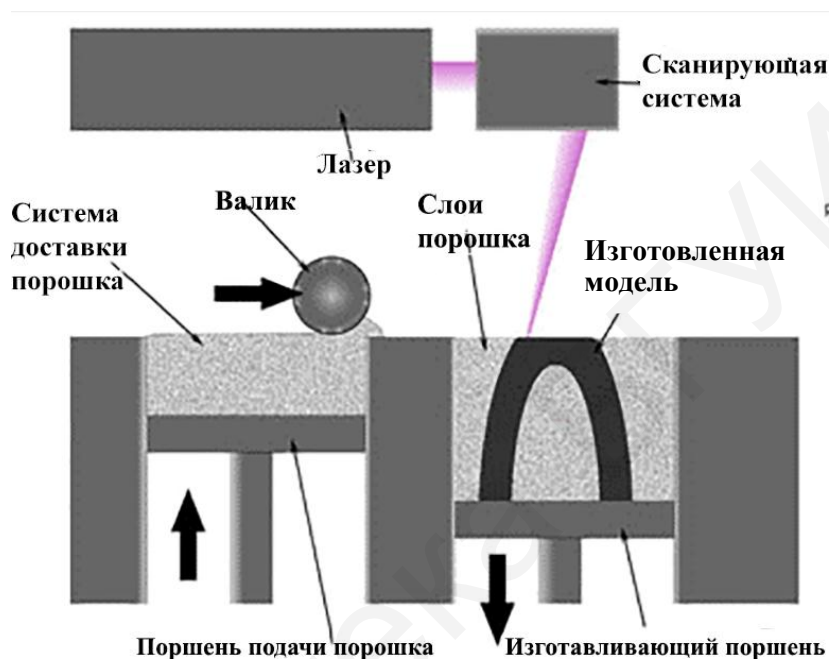


Рис. 2.1. Схема установки выборочного лазерного спекания (SLS)

Выборочное лазерное спекание очень близко по своей сути к SLA. Просто вместо жидкости используется порошок. Лазерное спекание – более сложная технология, так как затрачивается больше энергии на спекание материалов (особенно металлов), а также механизмов для очистки и распределения порошка.

Если в SLA жидкость под действием тяжести сама равномерно распределяется по резервуару, то в SLS с порошком подобного не происходит. Поэтому в данной технологии используется специальный валик, который равномерно распределяет порошок по поверхности объекта.

FDM-метод можно считать одним из наиболее технологически простых методов 3D-печати. Оригинальный термин Fused Deposition Modeling и соответствующая аббревиатура FDM являются торговыми марками компании Stratasys. В основе процесса лежит последовательное наслоение тонкой нити расплавленного пластика вплоть до создания цельного трехмерного объекта. В табл. 2.2 приведены характеристики различных применяемых в данном методе пластиков. В качестве расходного материала используется пластиковая нить, намотанная на катушку. Иногда применяются отдельные прутки пластика со стандартным диаметром 1,75 или 3 мм.

FFF-метод печати. Данный метод печати (Fused Filament Fabrication) предложили для использования в обход юридических ограничений. Этот метод реализуется следующим образом: капля одного расплавленного материала (пластика, воска, металла и т. д.) накладывается поверх или рядом с тем же материалом, совершая соединение (нагревом и прилипанием).

Таблица 2.2

Сравнительная характеристика материалов для экструзивной печати

Характеристика	Тип пластика		
	ABS	PLA	HIPS
Температура печати, °С	220–270	180–250	230–270
Температура платформы, °С	105–115	30–50	90
Температура размягчения, °С	90–105	50	–
Температура стеклования, °С	100	60–65	–
Температура самовоспламенения	290–395	–	–
Минимальная толщина стенки (рекомендуемая), мм	0,8–1,2	1	1–1,2
Минимальная толщина слоя (рекомендуемая)	70 % от диаметра сопла	–	–
Плотность, г/см ³	1,07	1,23–1,25	1,05
Относительное удлинение при разрыве, %	–	3,80	65
Прочность при растяжении, МПа	35–50	55,3	62
Прочность на изгиб, МПа	41–45	57,8	33
Модуль упругости при растяжении, ГПа	–	3,3 ГПа	
Модуль упругости при изгибе, ГПа	–	2,3	2,28
Твердость (по Роквеллу)	80–116 R	70–90 R	–
Усадка, %	0,3–0,8	0,1	0,8
Водопоглощение (23 °С, 24 ч, погружение), %	0,2–0,3	0,5–50	–

Кроме перечисленных материалов встречаются такие, как поликарбонат (PC, ПК), полиэтилен высокой плотности (HDPE, ПНД), полипропилен (PP, ПП), поликапролактон (PCL), полифенилсульфон (PPSU), полиметилметакрилат (Acrylic, оргстекло, акрил, ПММА), полиэтилентерефталат (PET, ПЭТ) и др.

Полилактид (PLA) – биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота. PLA-пластик, или полилактид, – наиболее биологически совместимый и экологически чистый из всех материалов, применяемых в 3D-принтерах.

PLA-пластик обладает следующими преимуществами:

- размеры изделия стабильны;
- экономия энергозатрат из-за низкой температуры размягчения нити и низкой температуры платформы;

– нет необходимости применять каптон в целях смазывания поверхности для наращивания прототипа;

– гладкость поверхности напечатанного изделия.

Биоразлагаемость PLA-пластика является основным недостатком этого материала. Напечатанные с использованием полилактида модели не могут похвастаться долговечностью – под воздействием солнечного света и влаги они полностью разлагаются в период от месяца до двух-трех лет. По этой причине PLA-пластик не используется для печати функциональных деталей. Однако детали из PLA-пластика имеют хорошее скольжение, из него можно делать подшипники скольжения. Недостатками полилактида также являются медленное застывание – стеклование происходит при температуре приблизительно 50 °С, повышенная хрупкость и жесткость.

Ударопрочный полистирол (HIPS) по своей структуре является аморфным материалом, представляющим собой полимер стирола с разными видами синтетического каучука или смесь стирольных сополимеров. Поскольку полистирол при нагревании до температуры экструзии может выделять токсичные испарения, 3D-печать с его использованием необходимо проводить в хорошо проветриваемых помещениях. Одна из особенностей пластика HIPS – полная растворимость в лимонене, позволяющая использовать его также и как материал поддержки. Главное преимущество при использовании HIPS для печати опорных структур состоит в том, что ни полистерол, ни лимонен не взаимодействуют с пластиками ABS и PLA. При этом стоит данный материал гораздо дешевле PLA.

В этом случае возможна печать только на принтерах с двумя печатными головками: в один экструдер загружается основной расходный материал, в другой – вспомогательный. Для удаления опорной структуры достаточно ненадолго опустить объект в ванночку с лимоненом.

В сравнении с другими материалами, используемыми при 3D-печати, ударопрочный полистирол обладает рядом преимуществ:

- стойкий к воздействиям кислот и щелочей;
- обладает небольшим коэффициентом термоусадки;
- температурный диапазон эксплуатации – от –40 до +70 °С;
- хорошая ударная прочность и пластичность готовых изделий, облегчающая механическую обработку;
- хорошие диэлектрические свойства: способен выдерживать большие напряжения, вплоть до 1 кВ.

ABS-пластик (акрилбутадиенстирол) – твердая, ударопрочная, термопластичная промышленная смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом. В зависимости от необходимых свойств производитель может варьировать пропорции в следующих пределах: 15–35 % акрилонитрила, 5–30 % бутадиена, 40–60 % стирола.

Основные недостатки ABS-пластика:

- токсичность при нагревании и воздействии этилового спирта;
- разрушается от воздействия солнечных лучей и загрязняет окружающую среду;

- хуже точность печати по сравнению с PLA-пластиком.

Достоинства ABS-пластика:

- высокая прочность (по сравнению с PLA) на изгиб и разрыв;
- высокая химическая стойкость (масла, бензин, кислоты, щелочи и т. д.);
- влагостойкость;
- хорошо обрабатывается ацетоном;
- широкий диапазон эксплуатационных температур;
- минимальная усадка готового изделия, не более 1 %;
- хорошо связывается с поверхностью для печати, но рекомендуется использовать подогреваемый стол и специальные поверхности для печати.

Применение 3D-печати в электронике можно разделить на два направления: производство печатных плат, антенн и др. (рис. 2.2) и производство корпусов и вспомогательной оснастки для электроники.

В 2009 году исследователи из Иллинойского университета разработали токопроводящие чернила на основе наночастиц серебра. При печати такие чернила экструдируются из микросопла и наносятся на полимерную подложку. Затем при нагревании до 150 °С частицы серебра агломерируют, образуя сплошной массив, и чернильные линии приобретают проводимость. Так создаются проводники методом робокастинга (Direct Ink Writing). Схема метода робокастинга представлена на рис. 2.3.

Метод робокастинга заключается в послойном формировании изделия посредством экструзии пастообразного материала (в отличие от метода FDM, в котором экструдируется расплав материала). Как правило, вязкость такого материала существенно зависит от напряжения сдвига: при значительном напряжении сдвига вязкость невелика, и материал легко экструдируется из сопла; как только напряжение сдвига уменьшается, вязкость становится больше, поэтому формируемое на платформе изделие продолжает сохранять форму. Затем изделие может подвергаться дополнительной термической обработке для придания большей механической прочности.

В настоящее время существуют установки, предназначенные для изготовления многослойных печатных плат с помощью технологии 3D-печати (рис. 2.4).

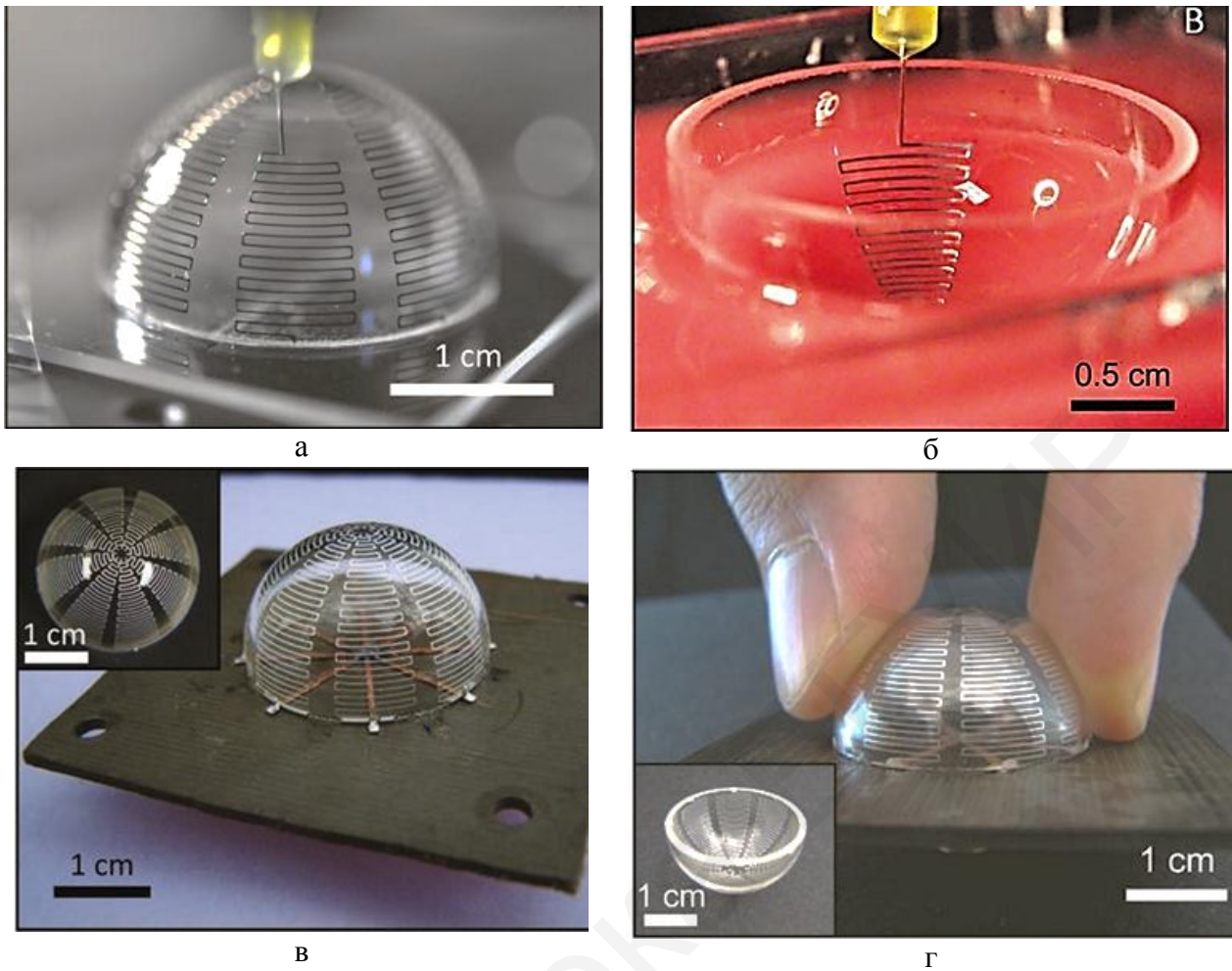


Рис. 2.2. Процесс печати антенны из токопроводящего материала:
 а – на внешней поверхности стеклянной полусферы; б – на внутренней поверхности;
 в, г – готовая антенна

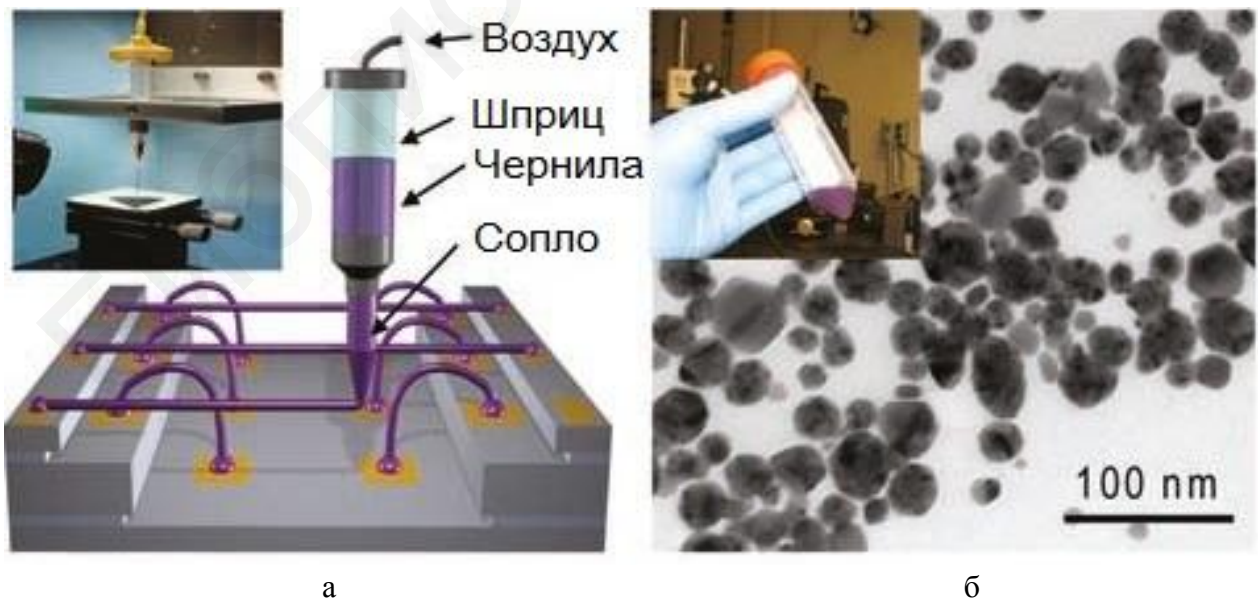


Рис. 2.3. Схема метода робокастинга:
 а – конструкция установки для печати проводящими чернилами;
 б – электронная микрофотография наночастиц серебра в составе проводящих чернил

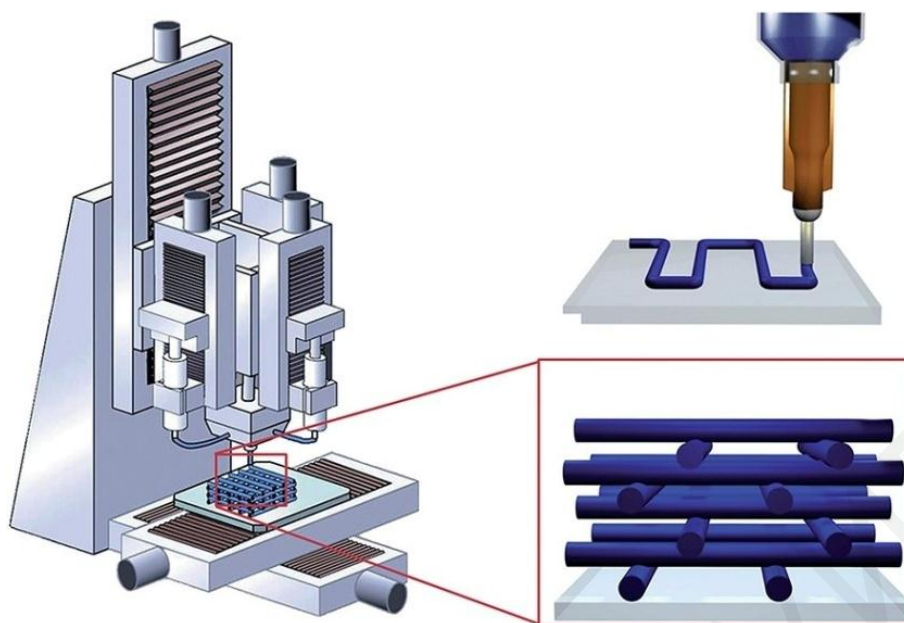


Рис. 2.4. Печать проводящего рисунка печатной платы чернилами с высоким содержанием серебра

Аддитивная технология изготовления многослойных печатных плат представляет собой симбиоз трех составляющих: 3D-принтера, предназначенного для печатных плат с двумя печатающими головками; токопроводящих и токонепроводящих чернил; специального программного обеспечения, позволяющего принтеру воспринимать стандартные файлы производства печатных плат и задавать толщину печатаемого слоя (рис. 2.5). Основные стадии приведены на рис. 2.6.

Для дискретных компонентов требуется дополнительная операция вырезания лазером окон под компоненты в прокладочной стеклоткани. Эта сложная проблема легко решается с помощью 3D-принтера: во время печати принтер оставляет окна в слое, затем пользователь устанавливает компоненты, и на следующих проходах принтера они запечатываются новыми слоями.



Рис. 2.5. Печать проводящего рисунка печатной платы специальными чернилами с высоким содержанием серебра

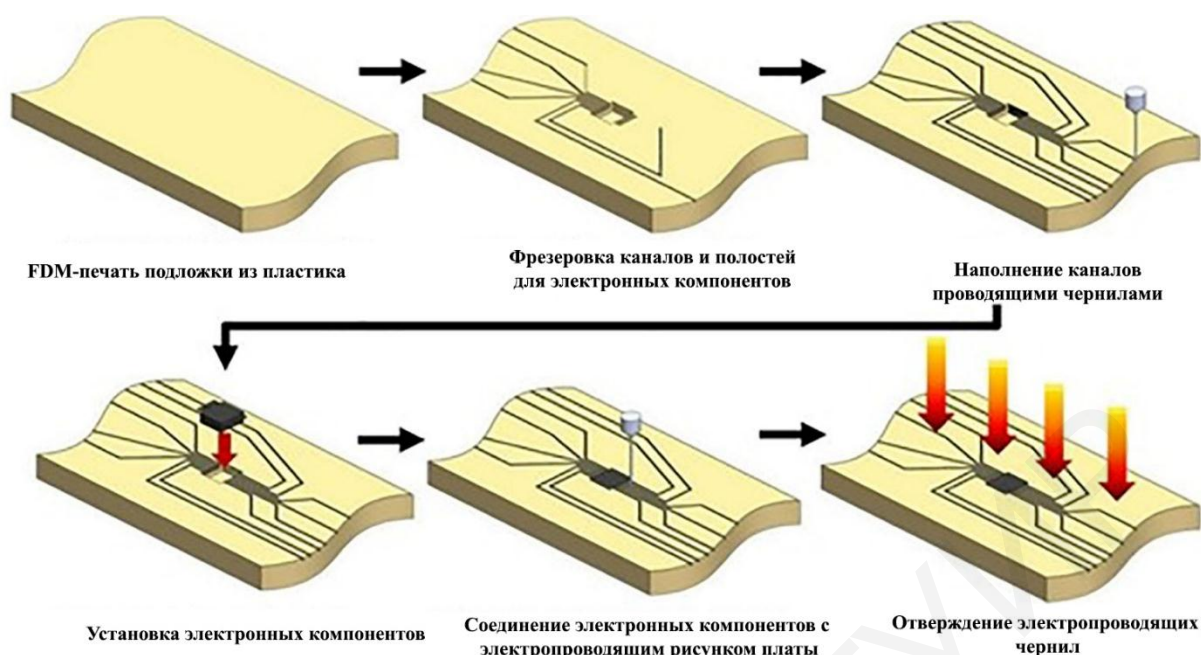


Рис. 2.6. Основные стадии производства электронной платы методом 3D-печати

Пример современного 3D-принтера, способного печатать многослойные платы, изображен на рис. 2.7.

Основные элементы принтера Dragonfly – две печатающие головки и две системы отверждения. Печатающая головка для нанесения токопроводящих чернил дополнена инфракрасной системой спекания, а для отверждения токопроводящих чернил используется УФ-система отверждения. Диаметр капли диэлектрика составляет 3 мкм, а токопроводящих чернил – 0,3 мкм, что позволяет изготавливать прецизионные платы до 5-го класса точности с параметром проводник/зазор 100/100 мкм. Минимальная толщина слоя – 10 мкм, а максимальная – 3 мм, поэтому количество слоев не ограничено. На принтере Dragonfly можно печатать платы, содержащие сквозные металлизированные отверстия диаметрами от 0,4 мм и выше. Заполненные токопроводящей пастой отверстия имеют диаметр от 0,2 мм и выше.

Также на принтере можно делать сквозные металлизированные, неметаллизированные, глухие и даже скрытые отверстия, давая разработчикам максимально просто и быстро тестировать прототипы плат послойного наращивания. Максимальный габаритный размер печатной платы, изготавливаемой на принтере, составляет 200×200×3 мм, причем плата не обязательно должна быть плоской. Применение аддитивной технологии позволяет изготавливать многослойные 3D MID-изделия.

Применяемый диэлектрик по электрическим параметрам и основным механическим характеристикам близок к FR-4, а проводимость токопроводящих чернил немногим более чем вдвое уступает меди. Диэлектрическая проницаемость применяемого полимера равна 3,2 на частоте 1 МГц и 2,9 – на частоте 1 ГГц.

Основное текущее ограничение материала – максимальная температура пайки, которая составляет 140 °С.



Рис. 2.7. 3D-принтер профессионального уровня Nano Dimension Dragonfly 2020 для аддитивного производства печатных плат

Наблюдается огромный интерес к гибкой электронике со стороны промышленности, академического сообщества и государственных структур. В перспективе легкая, дешевая и эффективная 3D-печатная гибкая электроника (рис. 2.8) должна найти применение в «интернете вещей», робототехнике, биомедицине и других направлениях. Основным оборудованием послужат две системы Pilot Line, основанные на фирменных 3D-принтерах Optomes, работающих по технологии аэрозольного напыления. Пятиосевые установки позволяют печатать фотополимерами и различными чернилами с разрешением в 10 мкм, подстраиваясь под топологию геометрически сложных субстратов.



Рис. 2.8. Пример гибкой 3D-печатной электроники

Еще одной сферой применения технологии 3D-печати является изготовление различных корпусов. Примеры даны на рис. 2.9 и 2.10. Технология 3D-печати предоставляет множество возможностей изготовления объектов с помощью упрощенного программного обеспечения с последующим созданием уникальных 3D-моделей на заказ. Одним из наиболее популярных направлений стало изготовление корпусов сотовых телефонов.



Рис. 2.9. Корпус электронного устройства, изготовленный методом FDM

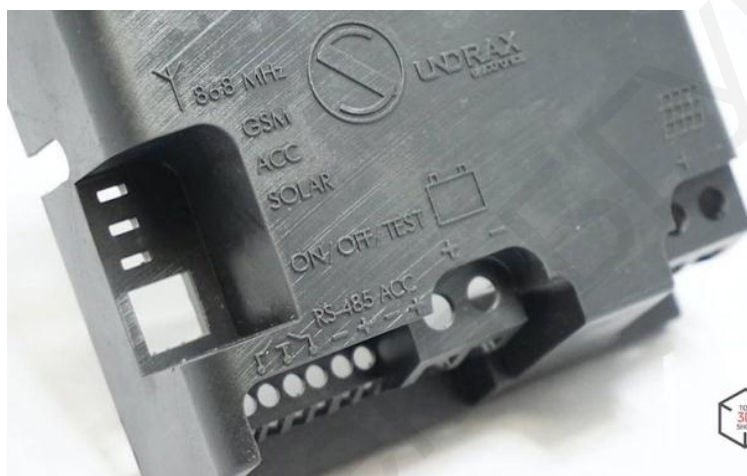


Рис. 2.10. Корпус электронного устройства, изготовленный методом SLS

Низкая скорость печати 3D-принтеров ограничивает их использование в массовом производстве. Для борьбы с этим недостатком некоторые FDM-устройства оснащаются несколькими экструдерами, позволяющими печатать разными цветами, различными полимерами и даже создавать несколько моделей одновременно. Такой подход повышает производительность, не требуя при этом использования нескольких принтеров, так как для работы нескольких печатных головок хватает одного микроконтроллера.

Промышленные 3D-принтеры используются для быстрого прототипирования и исследований с начала 1980-х годов. Как правило, это достаточно крупногабаритные установки, использующие порошковые металлы, пластики и бумагу. Подобные устройства зачастую применяются университетами и коммерческими компаниями. В настоящее время ведутся исследования в области 3D-печати силами биотехнологических компаний и академических учреждений. Исследования направлены на изучение возможности применения струйной/капельной 3D-печати в тканевой инженерии для создания искусственных органов.

Используемое оборудование и приборы

PRUSA i3 – бюджетный 3D-принтер, печатающий FDM-методом и обладающий одним экструдером. Внешний вид принтера показан на рис. 2.11, а, панель управления – на рис. 2.11, б, характеристики приведены в табл. 2.3.

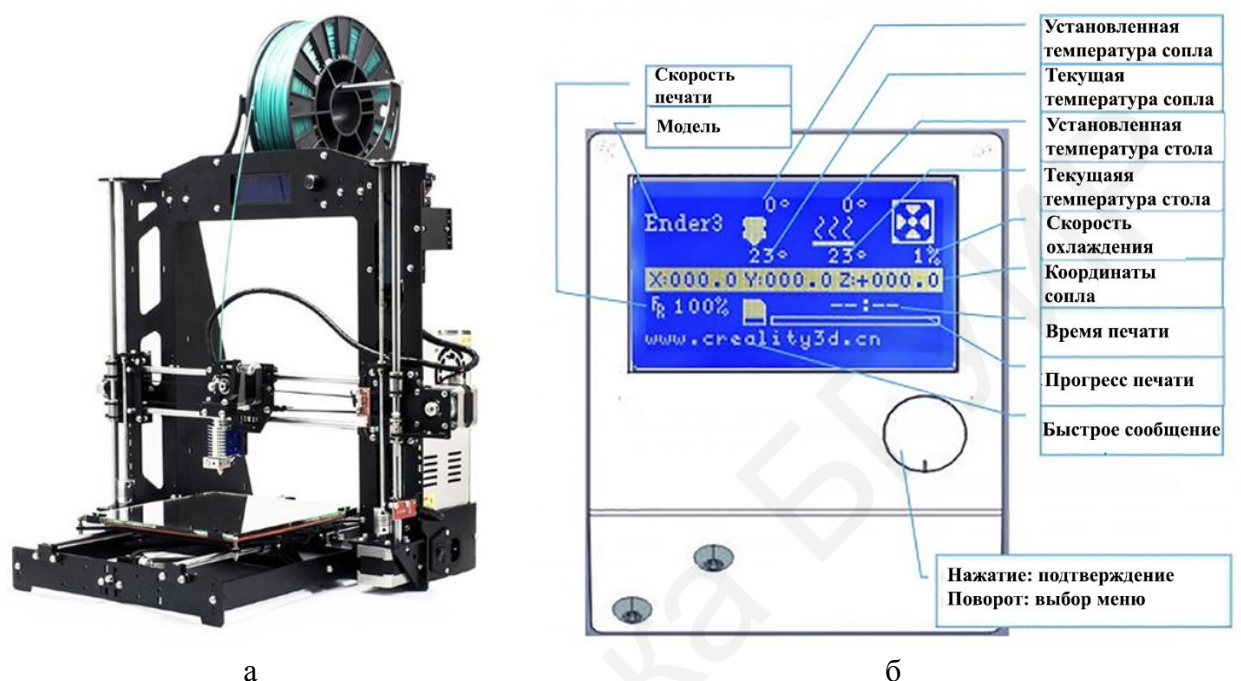


Рис. 2.11. 3D-принтер PRUSA i3:
а – внешний вид; б – информационный экран 3D-принтера

Таблица 2.3

Технические данные принтера PRUSA i3

Технология формирования слоев	PJP/FDM/FFF
Количество экструдеров	1
Диаметр сопла	0,4 мм
Рабочий материал	PLA, HIPS,
Минимальная толщина слоя	0,06 мм
Максимальная толщина слоя	0,3 мм
Скорость построения	100 мм/с
Диаметр нити	1,75 мм
Ширина рабочего пространства	215 мм
Глубина рабочего пространства	210 мм
Высота рабочего пространства	180 мм
Интерфейсы	USB, SD

Разрыв модели для контроля прочности осуществляется нормально к поверхности образца на разрывной машине РП 100-1 (рис. 2.12) при скорости движения ниж-

него захвата ($0,6 \pm 0,03$) м/мин. Прочность соединения оценивается по величине усилия отрыва, определяемого по шкале разрывной машины с точностью $\pm 0,5$ Н, отнесенного к площади отрыва, подсчитанного под микроскопом.

Технические данные РП-100-1:

- 1) Наибольшая нагрузка, в кгс: 100.
- 2) Число поясов на шкале силоизмерителя: 2.
Предельные значения поясов, в кгс: а) 0 – 50; б) 0 – 100.
- 3) Цена деления шкалы на поясе, в кгс: а) 0,1; б) 0,2.
- 4) Погрешность показаний нагрузки, в % от измеряемой величины: ± 1 .
- 5) Скорость движения нижнего захвата, в мм/мин: 600 ± 30 .
- 6) Наименьшее расстояние между захватами, в мм: 470.
- 7) Рабочий ход нижнего захвата, в мм: 200.

Лабораторный стенд НТЦ-13.04.5 (рис. 2.13) предназначен для проведения статических испытаний прочности материалов на осевое растяжение/сжатие. Разрывная машина имеет ручной привод перемещения активного захвата. Программное обеспечение позволяет проводить испытания образцов по заранее заданным параметрам. Графический вывод экспериментальных зависимостей в режиме реального времени и возможность сохранения результатов в отдельный файл для дальнейшей обработки облегчают проведение эксперимента. Характеристики лабораторного стенда приведены в табл. 2.4.



Рис. 2.12. Машина разрывная для испытания на растяжение РП-100-1

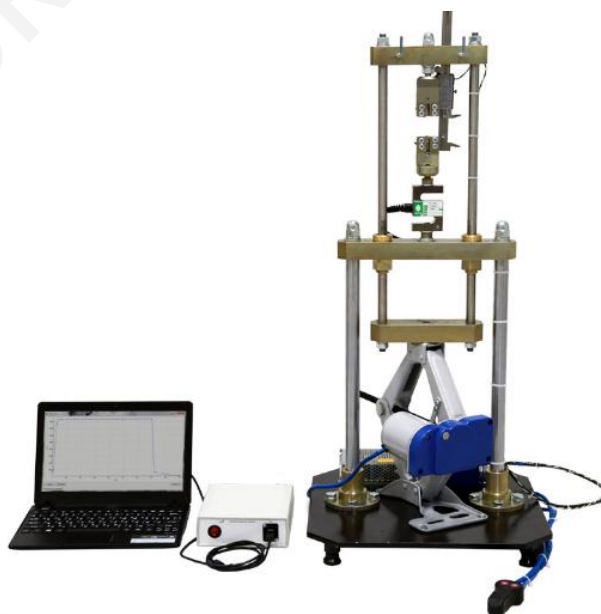


Рис. 2.13. Лабораторный стенд НТЦ-13.04.5

Твердомер ТКС-2М (рис. 2.14) настольного типа предназначается для измерения твердости металлов и сплавов по методу вдавливания алмазного конуса или стального закаленного шарика под действием заданной нагрузки в течение

определенного времени. Технические характеристики твердомера ТКС-2М приведены в табл. 2.5

Таблица 2.4

Характеристики лабораторного стенда НТЦ-13.04.5

Общие характеристики	Питание	~50 Гц 220 В
	Потребляемая мощность, Вт, не более	70
	Номинальное усилие, развиваемое рабочим органом, Н	5000
	Диапазон изменения ширины рабочего пространства, мм	90–260
Габаритные размеры установки	Ширина, мм	500
	Высота, мм	1000
	Длина, мм	600
Габаритные размеры измерителя деформации	Ширина, мм, не более	250
	Высота, мм, не более	70
	Длина, мм, не более	250
	Масса, кг, не более	30



Рис. 2.14. Твердомер ТКС-2М

Таблица 2.5

Технические характеристики твердомера ТКС-2М

Испытательные нагрузки, кгс	Предварительная 3, общие 15, 30, 45
Допустимые погрешности нагрузок, %	Предварительной $\pm 2,5$; общих $\pm 0,66$
Отклонение среднего значения числа твердости, полученного на поверяемом приборе, от средней твердости образцовой меры твердости 2-го разряда МТСР в единицах твердости, не более	Н 15N $92 \pm 2 \pm 1,0$ Н 30N $80 \pm 4 \pm 1,0$ Н 30N $45 \pm 5 \pm 2,0$ Н 45N $49 \pm 6 \pm 2,0$
Вариации по нагрузкам в пределах допустимой погрешности, %	Предварительной 2,5, общих 0,66
Вариации показаний прибора при проверке его образцовыми мерами твердости 2-го разряда МТСР, в единицах твердости, не более	Н 15N $92 \pm 2 \pm 1,0$ Н 30N $80 \pm 4 \pm 1,0$ Н 30N $45 \pm 5 \pm 2,0$ Н 45N $49 \pm 6 \pm 2,0$
Продолжительность цикла испытания, с	5
Потребляемая мощность, кВт	0,075
Наибольшая высота рабочего пространства, мм	200
Расстояние от центра отпечатка до корпуса, мм	130
Габаритные размеры, мм	500 × 240 × 760

Порядок выполнения работы

1. Подать питание на 3D-принтер, вставив вилку в розетку.
2. Выйти в главное меню, нажав на кнопку управления. В меню выбрать пункт «Print from SD».
3. Выбрать необходимую модель из списка, нажав на кнопку. Начнется процесс нагрева стола и экструдера, а затем происходит печать модели.

Примечание. Для принтеров данной модели характерна программная ошибка – при первом запуске не происходит нагрев экструдера. Для ее решения необходимо выйти в главное меню и задать температуру экструдера вручную. Для этого в главном меню выбрать пункт «control», затем пункт «temperature», в меню «nozzle» настроить температуру сопла, в меню «Bed» – температуру термостола.

4. Исследовать геометрические размеры образцов, изготовленных при различных условиях, и внести их в табл. 2.6:

- определить толщину образцов в трех точках с помощью микрометра;
- измерить длину и ширину модели с помощью штангенциркуля;
- измерить радиусы скруглений квадратных отверстий с помощью микроскопа МБС-2;
- измерить диаметры отверстий с помощью микроскопа МБС-2, для каждого отверстия измерения произвести три раза.

Таблица 2.6

Геометрические параметры модели

Параметр	Размеры модели, мм	Реальные размеры, мм				Отклонение Δ	Усадка, α
		X1	X2	X3	Среднее		
Длина	70						
Ширина	20						
Толщина	3						
Радиус скругления	0,2					–	
Диаметр отверстия	8						

Пример образца представлен на рис. 2.15.

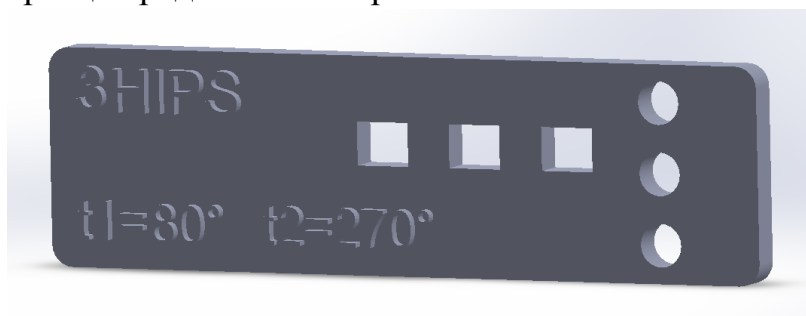


Рис. 2.15. Образец для определения геометрических размеров

5. Рассчитать величину свободной линейной усадки для полученных геометрических размеров детали по формуле (2.1) и внести данные в табл. 2.6:

$$\alpha = (l_0 - l)/l_0, \quad (2.1)$$

где l – соответствующий размер на образце после усадки, мм.

Отклонение линейных размеров относительно номинальных значений рассчитать по формуле (2.2), данные внести в табл. 2.6:

$$\Delta = \Delta_{\text{ном}} - \Delta_{\text{изм}}, \quad (2.2)$$

где $\Delta_{\text{ном}}$ – номинальный линейный размер на 3D-модели, мм;

$\Delta_{\text{изм}}$ – измеренный линейный размер на тестовом образце, мм.

6. Провести испытание модели на растяжение, используя лабораторный стенд НТЦ-13.04.5. Примерные диаграммы растяжения материала детали изображены на рис. 2.16 и 2.17.

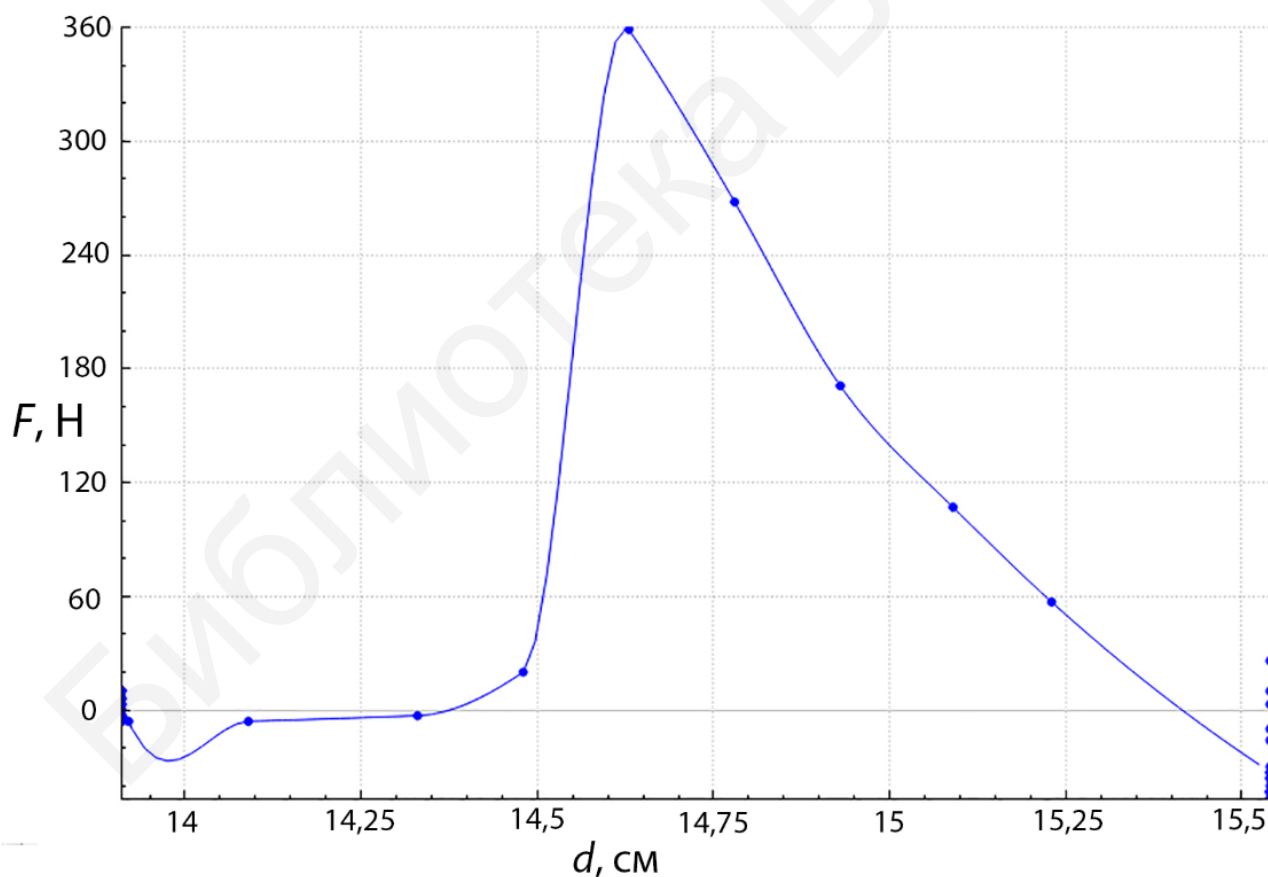


Рис. 2.16. Диаграмма растяжения материала модели № 1 контроля прочности

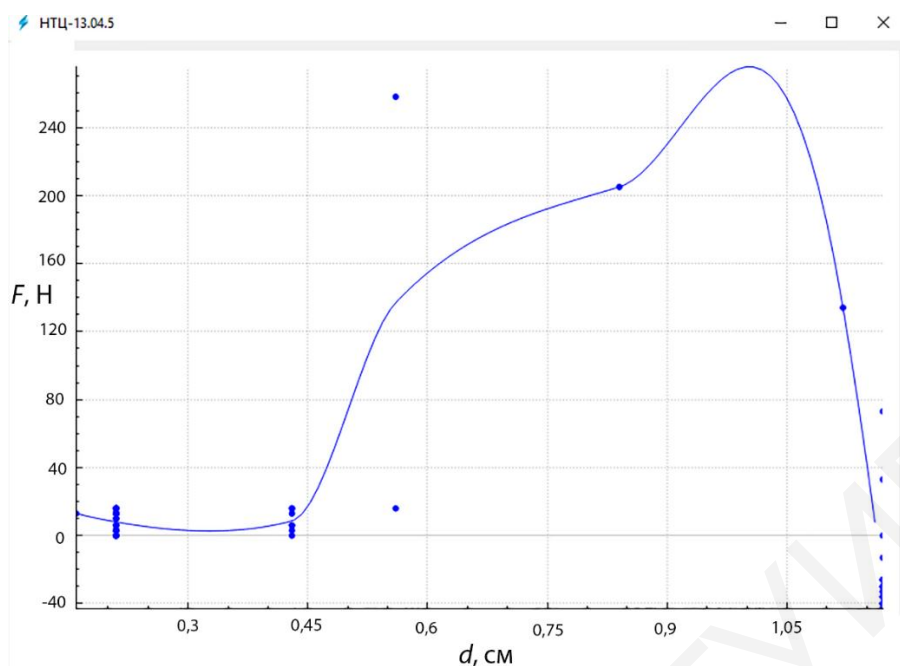


Рис. 2.17. Диаграмма растяжения материала модели № 2 контроля прочности

7. Провести испытание на твердость материала модели с помощью твердомера ТКС-2М. Рассчитать значение микротвердости по формуле (2.3) и экспериментальным данным из табл. 2.7:

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{2F}{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (2.3)$$

где F – нагрузка, кгс;
 S – площадь отпечатка, мм²;
 D – диаметр шарика, мм;
 d – диаметр отпечатка, мм.

Таблица 2.7

Экспериментальные данные исследования твердости

Нагрузка, кгс	Диаметр шарика, мм	Диаметр отпечатка, мм
150	2,5	1,8
150	2,5	1,6
150	2,5	1,95
150	2,5	1,75
150	2,5	1,65

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Внешний вид принтера и его информационная панель.
4. Параметры моделей, изготовленных из заданного материала.

5. Диаграмма растяжения материала.
6. Расчет прочности и микротвердости.

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите особенности изготовления моделей с помощью 3D-принтеров.
2. Назовите методы аддитивного производства.
3. Опишите метод экструзионной печати.
4. Назовите области применения аддитивной печати.
5. Каким образом происходит расчет линейной усадки материала?
6. Каким образом происходит расчет отклонения линейных размеров относительно номинальных?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ MID-ИЗДЕЛИЙ

Цель работы

Изучение физико-кинетической модели процесса формирования отверстий в неметаллических материалах с помощью лазерного излучения и применяемого оборудования, исследование структуры формируемых отверстий.

Теоретические сведения

Полупроводниковая промышленность заинтересована в создании устройств малых размеров с высокой степенью интеграции, широким набором функций и доступных по стоимости. Эффективное решение этой задачи возможно с использованием 3D-модулей.

3D-модуль (далее – 3DM) представляет собой систему, состоящую из двух или более микросхем, расположенных вертикально в стек на одной подложке, каждая из которых предназначена для выполнения своей функции. Конструкция 3DM (рис. 3.1) обеспечивает электрические межсоединения микросхем, содержащихся в модуле, с наружными выводами, теплоотвод (активное, пассивное охлаждение) и защиту от окружающей среды. Сегодня этот подход к созданию микросхем является одним из основных.

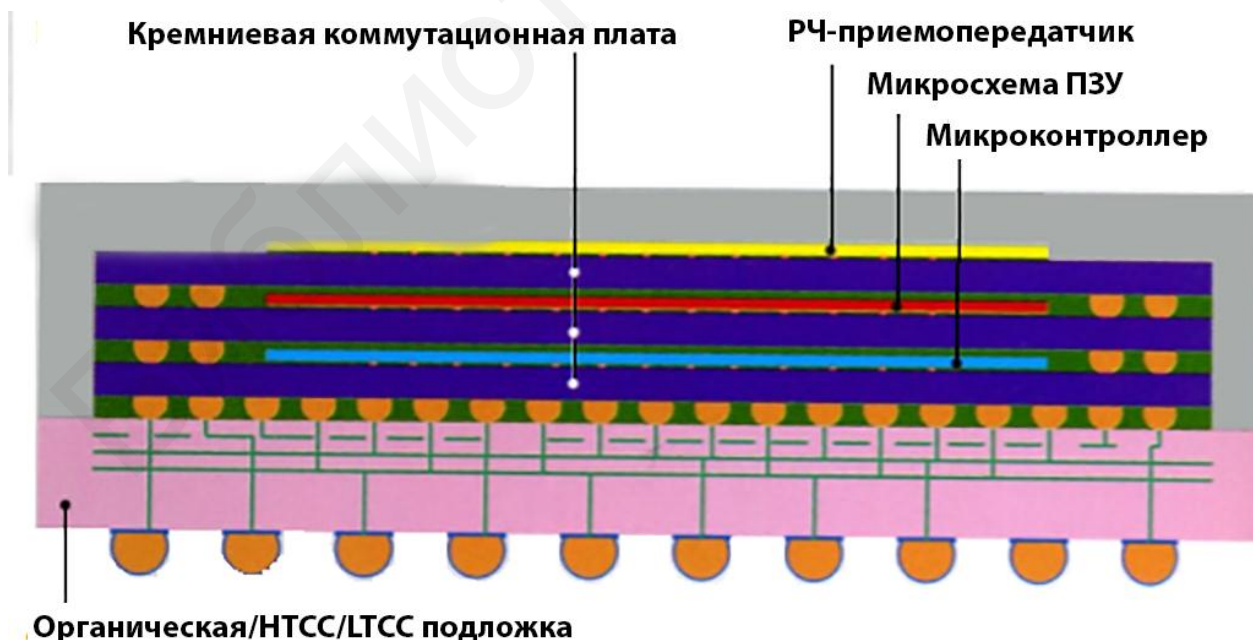


Рис. 3.1. Конструкция 3DM на основе кремниевой коммутационной платы

Основное преимущество 3DM заключается в способности интегрировать множество микросхем на основе различных технологий в единый корпус. В результате удается получить гетеросистему высокой производительности. Одно из современных направлений реализации 3DM технология TSV (Through Silicon Vias – сквозные отверстия в кремнии). Переходные отверстия заполняются проводящим материалом – поликремнием или металлом (медь, золото, вольфрам и др.), в результате образуются вертикальные проводники, связывающие кристаллы в стеке. Создать отверстия необходимого диаметра с соответствующим уровнем качества методами сверления или травления крайне затруднительно при малом диаметре отверстия (0,1–0,3 мм).

Лазерная обработка отверстий – один из перспективных методов создания таких отверстий. При воздействии лазерного излучения в виде отдельного импульса образование отверстия происходит за счет плавления и испарения материала. Большое значение в формировании отверстий при обработке плавящихся материалов единичным импульсом имеет перераспределение жидкой фазы до момента затвердевания. В результате этого форма отверстия может значительно отличаться от той, которая в момент окончания импульса определялась геометрией луча, кинетикой испарения и гидродинамикой выброса части материала в жидкой фазе. Образование большого объема жидкой фазы и ее неполное удаление из отверстия являются, как правило, неблагоприятными и трудноуправляемыми факторами, существенно снижающими эффективность и точность сверления единичным импульсом лазерного излучения.

С этой точки зрения высокое качество отверстий обеспечивается при сверлении испаряющихся (сублимирующихся) неметаллов, при разрушении которых под действием лазерного излучения жидкая фаза практически отсутствует. Основным методом повышения точности и качества лазерной размерной обработки является многоимпульсная обработка материалов (МИО). Сущность МИО заключается в том, что отверстия формируются за серию импульсов излучения лазера определенной энергии и длительности, последовательно доводящих размеры отверстий до необходимых.

Основными процессами, приводящими к образованию отверстий в материалах с использованием лазерного излучения, являются испарение и плавление вещества. По глубине отверстие растет за счет испарения, а по диаметру – за счет плавления стенок и вытеснения жидкости избыточным давлением паров. При взаимодействии лазерного излучения с поверхностью материала часть излучения поглощается и рассеивается продуктами разрушения.

Лазерная обработка применяется главным образом для получения отверстий диаметром $d_{\text{отв}}$ до 0,5 мм и глубиной h до 5 мм. Применение МИО позволяет расширить технологические возможности лазерной прошивки и получить отверстия с соотношением $h/d_{\text{отв}}$ до 50. Правильный выбор режимов обработки позволяет перейти от получения черновых отверстий к получению чистовых, точность размеров и формы которых достигают 7-го качества.

При сверлении, как и при резании, свойства обрабатываемого материала существенно влияют на параметры лазера, необходимые для выполнения операции. Сверление осуществляют импульсными лазерами, работающими как в режиме свободной генерации с длительностью импульсов порядка 1 мкс, так и в режиме с модулированной добротностью с длительностью в несколько десятков наносекунд. В обоих случаях происходит тепловое воздействие на материал, его плавление и испарение из зоны. В глубину отверстие растет в основном за счет испарения, а по диаметру – за счет плавления стенок и вытекания жидкости при избыточном давлении паров. В настоящее время достаточно полно разработана модель кинетики образования отверстия в непрозрачном материале, согласно которой глубина h и диаметр отверстия D определяются по формулам:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{D_0}{\operatorname{tg} \gamma}\right)^3 + \frac{3W}{\pi \operatorname{tg}^2 \gamma \rho L_0}} - \frac{D_0}{\operatorname{tg} \gamma}; \quad (3.1)$$

$$D = 2 \cdot \sqrt[3]{D_0^3 + \frac{3W \operatorname{tg} \gamma}{\pi \rho L_0}}, \quad (3.2)$$

где D_0 – начальный диаметр лунки;

$W = P\tau_{\text{и}}$ – энергия излучения импульсного оптического квантового генератора;

P – импульсная мощность;

$\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса;

γ – половинный угол раствора светового конуса;

L_0 – удельная энергия испарения материала при $T = 0$ К.

Из формул видно, что значения величин h и D нелинейно зависят от параметров, характеризующих применяемую оптическую систему (D_0, γ), лазер (W) и природу обрабатываемого материала (L_0). Однако в большей мере величины h и D зависят от $\operatorname{tg} \gamma$, характеризующего угол светового конуса, создаваемого оптической системой.

Геометрия отверстия существенно зависит от положения пятна относительно обрабатываемой поверхности (рис. 3.2). В сходящемся световом пучке характерным является конический профиль отверстия, а в расходящемся – цилиндрический. За счет неравномерности распределения излучения по сечению светового пятна и во времени в течение импульса, а также вследствие теплопроводности и гидродинамических явлений профиль отверстия, задаваемый ходом лучей, искажается. В частности, появляется характерная воронка на входе и плавный переход от дна к стенкам, а при больших расфокусировках профиль отверстия становится параболическим.

Степень фокусировки, соответствующая наибольшей глубине и наименьшему диаметру, различна. Наибольшая глубина отверстий достигается при фо-

кусировке лазерного луча на некоторое расстояние вглубь от поверхности материала. Наименьший диаметр обеспечивается при размещении фокальной плоскости на поверхности обрабатываемого материала.

Если бы механизмом разрушения было испарение вещества, то условия получения отверстия максимальной глубины h_{\max} за один импульс с энергией W_n и длительностью τ_n соответствовали бы фокусировке излучения на поверхность обрабатываемой детали, обеспечивая минимальный диаметр лунки.

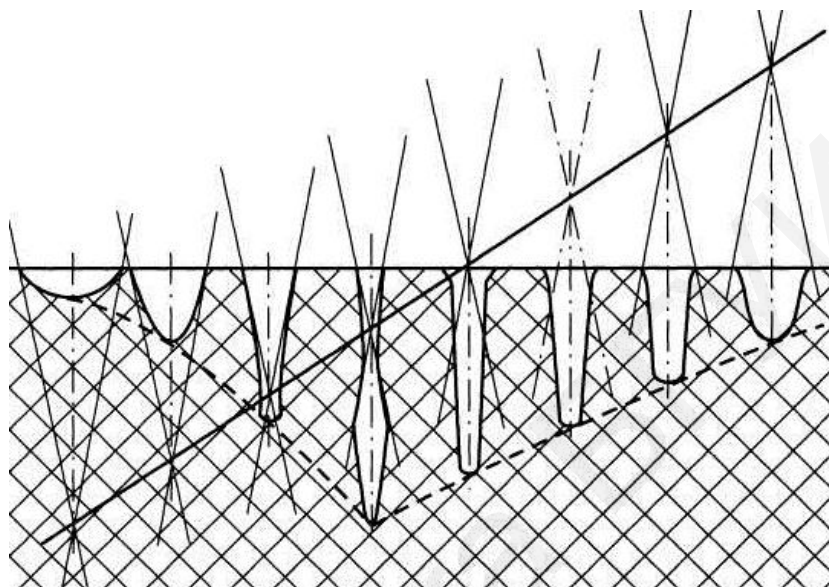


Рис. 3.2. Профили отверстий при различных положениях фокуса лазерного луча относительно поверхности детали

Наличие оплавления стенок в расходящемся пучке изменяет условия оптимальной фокусировки излучения таким образом, что для получения максимальной глубины требуется сфокусировать лазерный пучок на некотором расстоянии l_0 от поверхности вблизи материала.

Смещение фокуса l_0 зависит не только от параметров фокусирующей системы, но и от диаметра лазерного пучка на выходном зеркале лазера d , его расходимости θ и расстояния z_0 от выходного зеркала. В случае удаления линзы от лазера (или уменьшения выходной апертуры пучка) глубина отверстия может значительно увеличиться при оптимальном смещении фокуса линзы по сравнению с глубиной, обеспечиваемой при фокусировке на поверхность материала.

Микрообработка материалов лазерным излучением предъявляет требования к таким параметрам источника излучения, как длина волны λ , угловая расходимость θ и длительность импульса τ_n . Зона воздействия, определяемая минимальными размерами лазерного пучка d в фокусе объектива, связана с длиной волны излучения соотношением

$$d = 1,22 \lambda (f/D)M^2, \quad (3.3)$$

где f – фокусное расстояние объектива;

D – диаметр несфокусированного лазерного пучка;
 M^2 – коэффициент, характеризующий отличие реального лазерного пучка от идеального гауссова пучка, имеющего минимальную дифракционную расходимость θ :

$$M^2 \sim D \theta. \quad (3.4)$$

Таким образом, чем короче длина волны и меньше угловая расходимость, тем больше возможностей сфокусировать излучение и обеспечить минимально возможный размер зоны воздействия. Для более длинных импульсов величина зоны термического влияния равна

$$\delta = 2(a\tau_n)^{1/2}, \quad (3.5)$$

где a – коэффициент температуропроводности, зависящий от теплофизических свойств материала.

Пикосекундные лазеры с их короткими тепловыми глубинами проникновения в материал подложки и высокими частотами следования импульсов могут обеспечить высокую производительность обработки и значительно уменьшают пагубные влияния от высокой тепловой нагрузки и больших температурных градиентов в материале. Преимуществами обработки ультракороткими импульсами лазерного излучения являются отсутствие значительной зоны термического влияния, ударной волны, микротрещин, оплавленных зон и выплесков, теплового повреждения поверхностных слоев материала.

При многоимпульсной обработке за счет того, что импульсы в серии разделены временными интервалами, реализуется возможность изменения взаимного расположения обрабатываемой детали и фокусирующей оптической системы в процессе получения одного отверстия. При относительном смещении оптической системы и образца перед очередным импульсом на величину, равную толщине слоя, испаренного за предыдущий импульс, плотность мощности лазерного излучения на движущейся границе испарения по всей глубине отверстия сохраняется практически постоянной. Такое смещение можно проводить непрерывно, согласуя скорость движения с частотой следования импульсов. На рис. 3.3 представлено изображение отверстия в неметаллической подложке, созданное с помощью лазерного излучения.

Таким образом, использование лазера дает следующие преимущества:

- отсутствует механический контакт между сверлящим инструментом и материалом, а также поломка и износ сверл;
- увеличивается точность размещения отверстия, так как оптика, используемая для фокусировки лазерного луча, используется также и для наводки его в необходимую точку;
- достигается большее отношение глубины к диаметру сверления, чем это имеет место при других способах сверления.

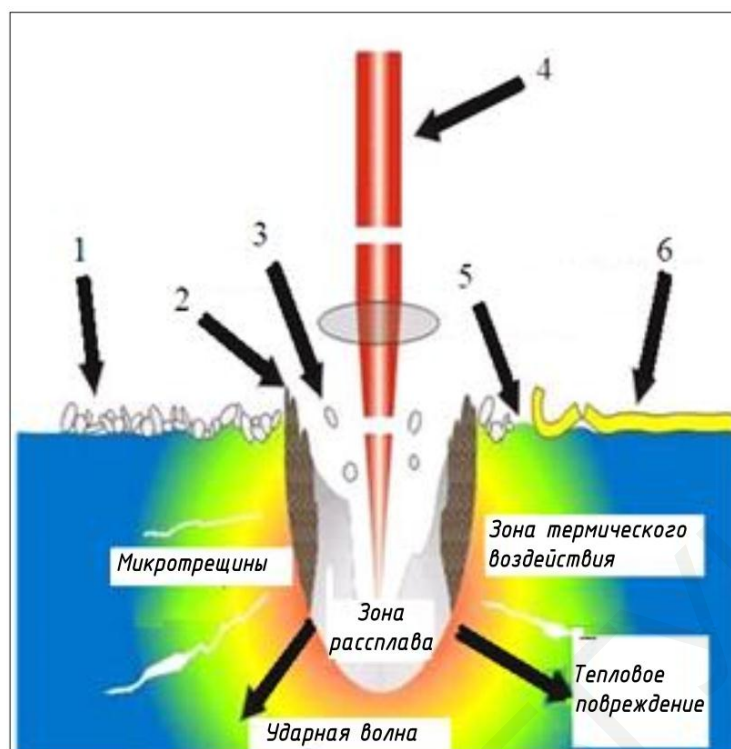


Рис. 3.3. Формирование отверстия в неметаллической подложке:
 1 – повреждение поверхности; 2 – испарение слоя; 3 – выплеск материала;
 4 – лазерный луч; 5 – повреждение поверхности ударной волной;
 6 – разрушение наружных структур

Используемое лабораторное оборудование

Лабораторная установка LOTIS (рис. 3.4) состоит из источника оптического излучения, блоков регулирования энергии излучения, питания и управления, оптической системы и системы охлаждения лазера. В качестве источника оптического излучения применен квантовый генератор на алюмоиттриевом гранате с неодимом с длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульсов 10 мкс и частотой следования 1–50 Гц.



Рис. 3.4. Внешний вид лазерной лабораторной установки

Для накачки активного элемента применена ИК-лампа мощностью 2 кВт. Энергия импульса лазерного излучения составляла 0,75 Дж при напряжении на лампе ОКГ 900 В и частоте импульсов 3 Гц, а средняя мощность излучения в импульсе – 3,75 кВт.

Оптическая система формирует пространственные характеристики пучка как инструмента обработки. Для наводки оптического излучения и юстировки оптической системы используется маломощный газовый лазер, излучение от которого вводилось в оптическую систему формирования лазерного излучения с помощью полупрозрачного зеркала. Для позиционирования изделий применен координатный стол с двумя степенями свободы и точностью позиционирования $\pm 0,1$ мм. Управление работой лазера и координатного стола организовано от блока управления шаговым двигателем и ПЭВМ с помощью управляющей программы. В установке применена двухконтурная система охлаждения лазера с теплообменным устройством типа «вода – вода» с термостабилизацией охлаждающей жидкости, циркулирующей по замкнутому контуру при помощи жидкостного насоса УО-1. Схема лабораторной установки представлена на рис. 3.5.

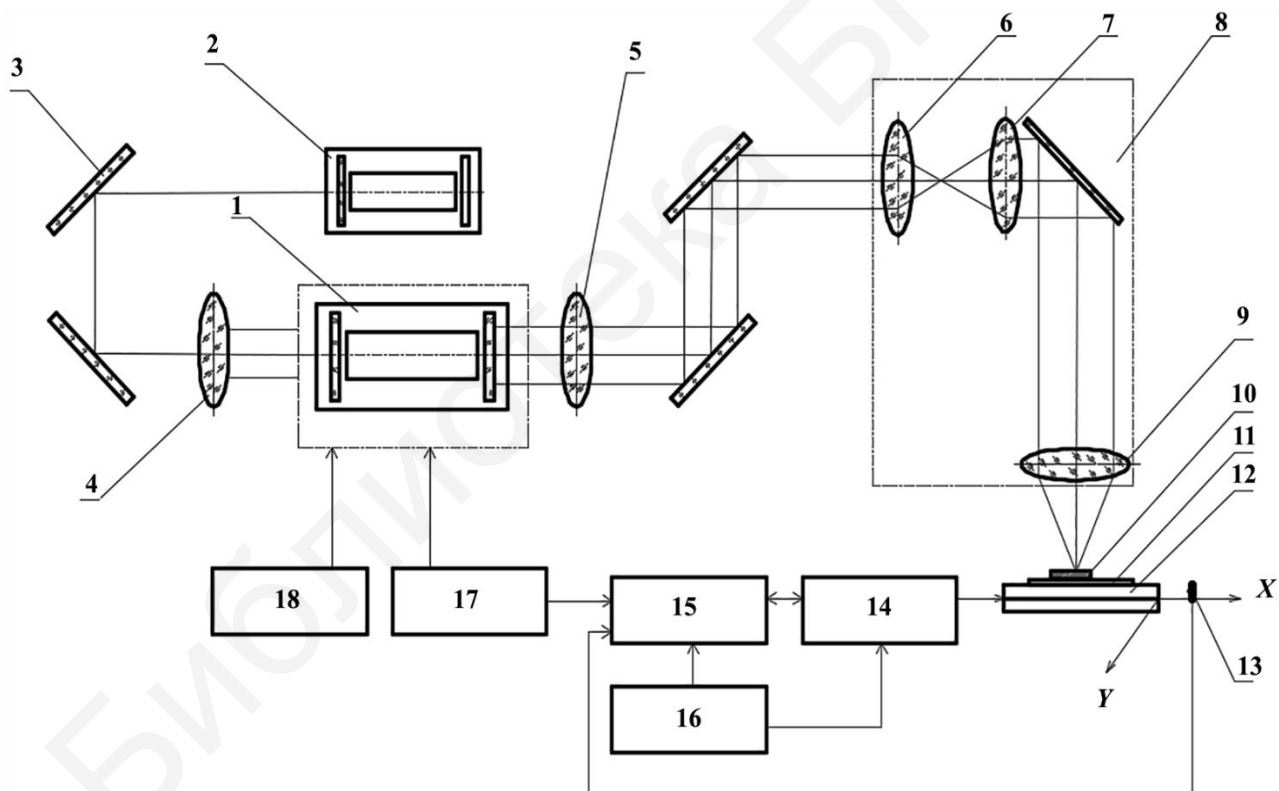


Рис. 3.5. Схема лабораторной установки:

- 1 – ОКГ YAG; 2 – газовый лазер, 3 – отражающее зеркало; 4 – глухое зеркало; 5 – выходное зеркало; 6 и 7 – софокусные линзы; 8 – оптическая система; 9 – фокусирующая линза; 10 – образец; 11 – асбестовая пластина; 12 – координатный стол; 13 – ограничитель; 14 – шаговый двигатель; 15 – блок управления; 16 – ПЭВМ; 17 – блок питания; 18 – система охлаждения лазера

В качестве активной среды используется алюмоиттриевый гранат («YAG», Y₃Al₅O₁₂), легированный ионами неодима (Nd). В момент вспышки лампы

накачки атомы активного элемента переходят в возбужденное состояние и испускают фотоны. Пока атом не вышел из возбужденного состояния, влетающий в него фотон выбивает другой фотон, при этом когерентность, длина волны, поляризация, фаза хода у этих фотонов будут одинаковыми. Глухое зеркало возвращает более 99 % излучения, выходное зеркало – около 90 % излучения, при этом на выходе будет всего 10 % излучения.

Излучаемая источником накачки световая энергия фокусируется в активной среде и частично поглощается ею. Примесные ионы Nd^{3+} активной среды переходят в возбужденные состояния, и создается инверсия населенностей. Возникают условия для усиления светового излучения. При превышении коэффициента оптического усиления над суммарными потерями резонатора в последнем возбуждаются электромагнитные колебания. Через полупрозрачное зеркало резонатора осуществляется отбор энергии электромагнитного поля, и на выходе оптической излучающей головки создается монохроматический направленный пучок света.

Чтобы луч лазера падал на обрабатываемую поверхность заготовки, его следует «повернуть» и «подвести» к нужной точке. Для этого используется система линз и зеркал. Первое отражающее зеркало установлено сразу после газового лазера, отвечающего за настройку лазерной системы и прицеливание при проведении процесса. Оно отклоняет луч газового лазера на второе отражающее зеркало, которое, в свою очередь, отклоняет луч на глухое зеркало. Глухое зеркало пропускает луч газового лазера, но отражает излучение, создаваемое твердотельным лазером. Отраженное излучение попадает на выходное зеркало, которое пропускает луч газового лазера и часть излучения твердотельного лазера. Далее лучи газового и твердотельного лазеров проходят две софокусные линзы и попадают на отражающее зеркало, которое установлено под углом в 45° к горизонтали, – оно отражает лазерный луч вниз, внутрь головки излучателя. Сама головка содержит фокусирующую линзу для создания «пятна» излучения необходимой площади. Излучатель также содержит систему перемещения головки для настройки или изменения фокусировки (размера «пятна»). Луч фокусируется в линзе и передается на материал. Наибольшая полезная мощность лазерного излучения образуется в наименьшей точке фокуса. Расположение составных частей оптической системы показано на рис. 3.6.

Лазерный станок Yueming CMA 0604-B-A (Китай), внешний вид которого изображен на рис. 3.7, а характеристики приведены в табл. 3.1, хорошо подходит для среднесерийного производства негабаритных изделий. Этот производительный станок предоставляет возможность подключения поворотного устройства, оснащен функцией автоматического подъема рабочего стола и имеет мощный газовый лазер (CO_2 до 130 Вт). Скорость гравировки – до 500 мм/с, реза – 30 м/мин, точность – до 0,01 мм).

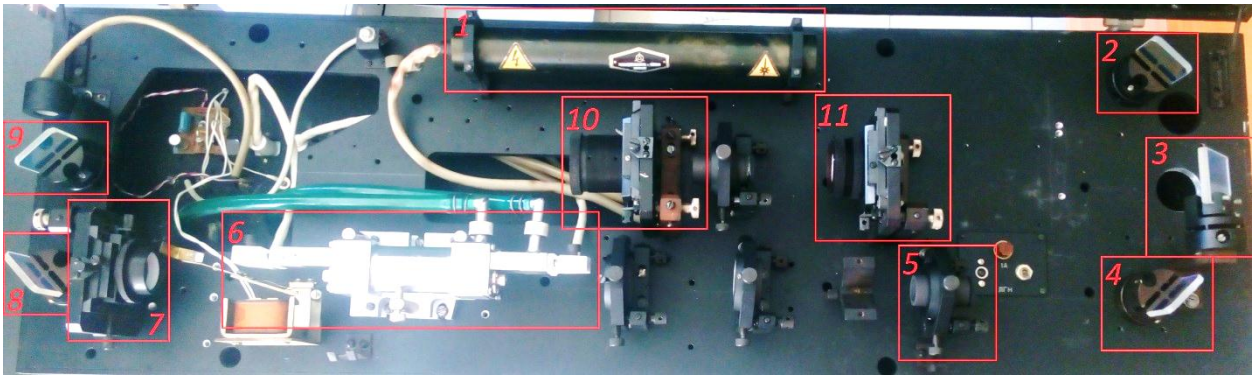


Рис. 3.6. Расположение составных частей оптической системы:
 1 – газовый прицельный лазер; 2, 3, 4, 8, 9 – отражательные зеркала;
 5 – глухое зеркало; 6 – оптический квантовый генератор; 7 – выходное зеркало;
 10, 11 – софокусные линзы



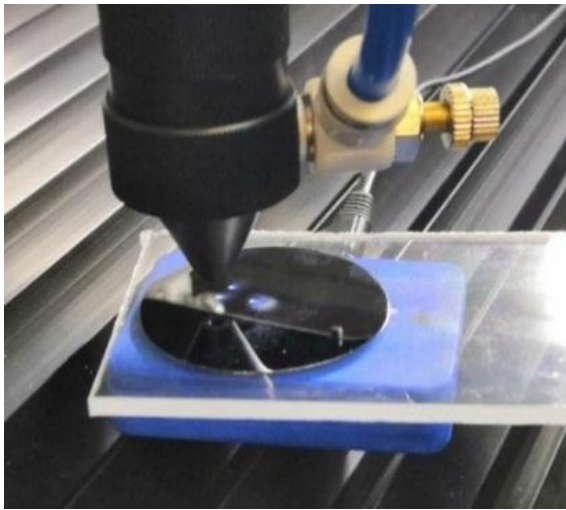
Рис. 3.7. Внешний вид установки лазерной резки CMA 0604-B-A

Таблица 3.1

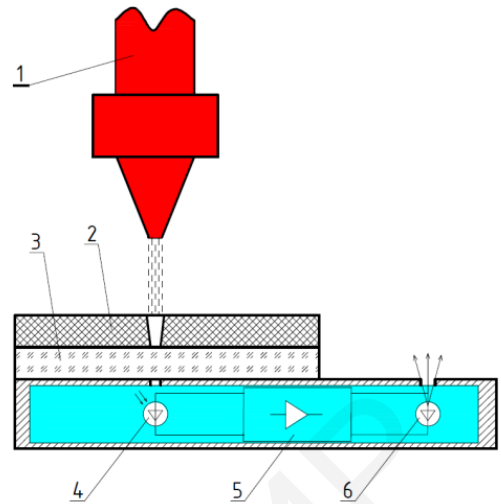
Характеристики лазерного станка CMA 0604-B-A

Параметр	Значение
Диаметр луча	0,1 мм
Мощность лазера	80 Вт
Расстояние до поверхности	5,5 мм
Длина волны лазера на CO ₂	10,6 мкм
Количество импульсов до прожигания отверстия	21 импульс
Длительность импульса	42–43 мс, пауза – 54 мс
Толщина кремниевой пластины	300 мкм

Внешний вид лазерной головки и схема лазерной прошивки приведены на рис. 3.8.



а



б

Рис. 3.8. Внешний вид (а) и схема (б) лазерной прошивки отверстий:
 1 – лазер; 2 – кремниевая подложка; 3 – плексиглас; 4 – фотодиод;
 5 – модуль усилителя; 6 – светодиод

Для определения размеров отверстий на кремниевых пластинах используется 50X-500X USB-цифровой микроскоп Supereyes B008 (рис. 3.9), который подключается к компьютеру.



Рис. 3.9. Микроскоп Supereyes B008

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать глубину и диаметр отверстий при следующих условиях:
 $D_0 = 0,2$ см; $W = 1$ Дж; $\gamma = 11^\circ$; $L_0 = 13\,678,57$ Дж; $\rho = 2,33$ г/см³.

2. При работе на установке ЛОТИС подготовить блок питания лазера БПЛ-66/33 (рис. 3.10) к работе. Включить питание блока, переключив тумблер «СЕТЬ». Индикаторы «СЕТЬ», «РАЗРЯД» должны загореться зеленым светом.



Рис. 3.10. Блок питания лазера БПЛ-66/33

3. Переключить тумблер «СЕТЬ» на блоке питания газового лазера. Индикатор должен загореться оранжевым светом.

4. Однократно нажать кнопку «ЗАРЯД». Индикатор над кнопкой должен загореться красным светом. Индикатор «РАЗРЯД», горящий зеленым светом, должен погаснуть. Далее нажать кнопку «ДУГА». Индикатор над кнопкой должен загореться зеленым светом.

5. Выставить частоту 5 Гц при помощи переключателя «ЧАСТОТА, Hz».

6. Надеть защитные очки.

ВНИМАНИЕ! При отсутствии защитных очков запрещается приближаться к работающей установке ближе чем на 1,1 м.

7. Убедившись, что луч прицельного лазера падает на асбестовую пластину, переключить тумблер «РАБОТА». Индикатор над кнопкой должен загореться зеленым светом.

ВНИМАНИЕ! Во время работы установки ЗАПРЕЩАЕТСЯ помещать в зону лазерного излучения посторонние предметы, части тел, снимать защитные очки, нажимать кнопки «РАЗРЯД», «ЗАРЯД», «ДУГА», переключать тумблеры «СЕТЬ», «ЧАСТОТА, Hz». В случае возникновения нештатной ситуации необходимо остановить работу установки с помощью тумблера «РАБОТА» и сообщить преподавателю.

8. Проверить напряжение накачки на встроенном на лицевой панели вольтметре. Значение должно быть в пределах 0,7–0,8 кВ. В случае несоответствия переключателем «УРОВЕНЬ» выставить необходимое значение. Запрещается повышать напряжение более 0,8 кВ.

9. Переключить тумблер «РАБОТА», остановив работу лазерного излучателя. Индикатор над кнопкой, горящий зеленым светом, должен погаснуть.

10. Выставить частоту 50 Гц переключателем «ЧАСТОТА, Hz».

11. Установить на координатный стол образец. Совместить зону прошивки с красной точкой прицельного лазера.

12. Убедившись, что луч прицельного лазера падает на место запланированной прошивки отверстия, переключить тумблер «РАБОТА». Индикатор над кнопкой должен загореться зеленым светом.

13. Выполнить прошивку отверстия согласно указаниям преподавателя.

14. Переключить тумблер «РАБОТА», остановив работу лазерного излучателя. Индикатор над кнопкой, горящий зеленым светом, должен погаснуть.

При необходимости повторения опытов повторить пп. 9–14, внося коррективы в параметры процесса, если это было указано преподавателем.

15. Нажать кнопку «РАЗРЯД», остановив работу лазерного излучателя. Вы услышите характерный щелчок. Индикаторы над кнопками «ЗАРЯД», «ДУГА», горящие зеленым и красным светом, должны погаснуть. Индикатор кнопки «РАЗРЯД» должен загореться зеленым светом.

16. Переключить тумблер «СЕТЬ» на блоке питания газового лазера. Индикатор, горящий оранжевым светом, должен погаснуть.

17. Выключить питание блока, переключив тумблер «СЕТЬ». Индикаторы «СЕТЬ», «РАЗРЯД» должны погаснуть.

18. **При работе на лазерном станке СМА 0604-В-А выполнить следующие действия:**

- разместить образец на рабочем поле станка;
- настроить фокусное расстояние линзы 50,8 мм;
- выбрать мощность 40 Вт;
- переместить лазерную головку к образцу;
- закрыть крышку станка;
- нажать кнопку в настройках станка Laser on/off;
- нажать кнопку Pulse, выполнить обработку в соответствии с условиями, контролируя время обработки по показаниям фотодатчика.

19. С помощью микроскопа Supereyes B008 измерить диаметры полученных отверстий в подложках. Подсоединить USB-кабель микроскопа к компьютеру. Запустить программу Measurement.

20. Положить тестовый образец кремниевой подложки под линзу микроскопа. Настроить высоту микроскопа и степень увеличения до уровня оптимальной видимости отверстия.

21. Убрать образец и положить на его место линейку. На панели инструментов сохранить изображение линейки, нажав кнопку «Capture Picture» (значок фотоаппарата) (рис. 3.11). Изображение сохраняется в папке C:\Program Files\Measurement\CapPicture.

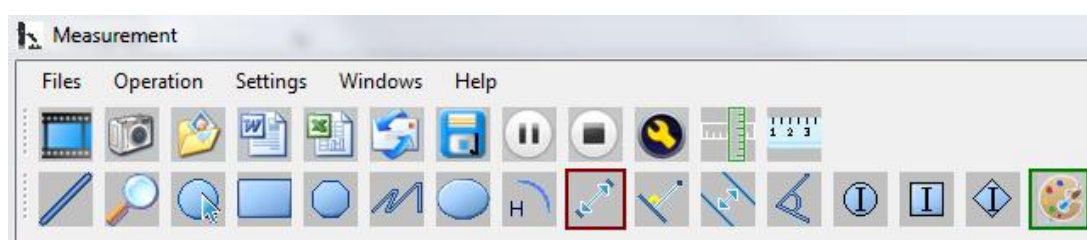


Рис. 3.11. Панель инструментов

22. На рабочей панели в окне Picture появится сохраненное изображение с названием «месяц день – номер изображения». Следует открыть его, щелкнуть на названии (рис. 3.12).

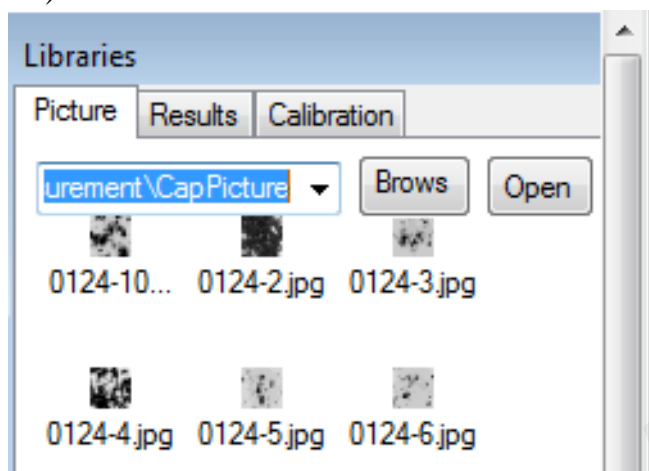


Рис. 3.12. Список сохраненных изображений на рабочей панели

23. На панели инструментов выбрать Distance Measurement и измерить количество пикселей в 1 мм (рис. 3.13). На рабочей панели перейти в окно Calibration и добавить новое правило, нажав Add (рис. 3.14).

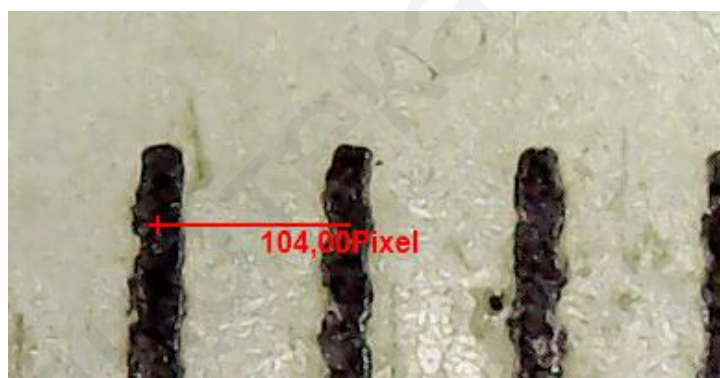


Рис. 3.13. Измерение расстояния в пикселях

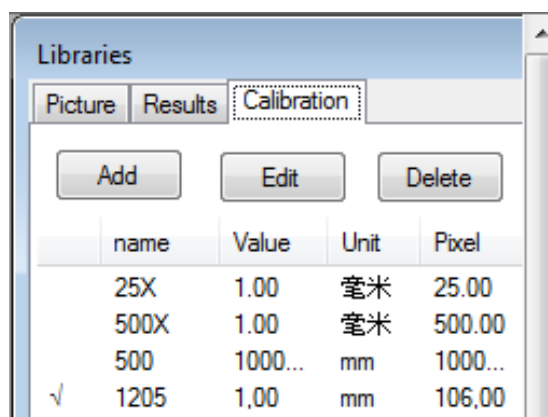


Рис. 3.14. Список правил в окне калибровки

24. Создать новое правило, введя все параметры (рис. 3.15).

Рис. 3.15. Создание нового правила калибровки

25. Убрать линейку, после чего подложить кремниевую подложку и найти отверстие. Измерить диаметр с помощью инструмента Distance Measurement (рис. 3.16). Отредактированное изображение вместе с расстояниями сохранить щелкнув на значке Picture save as на панели инструментов.

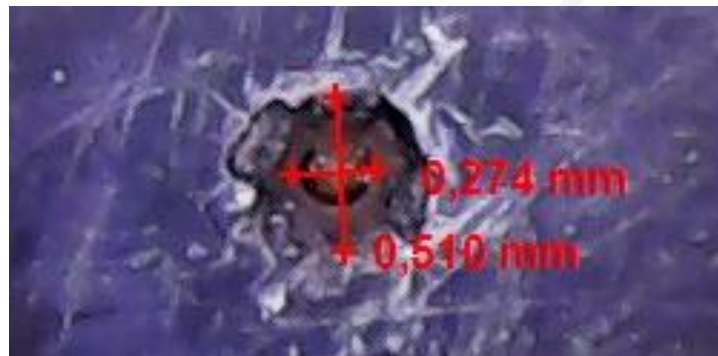


Рис. 3.16. Изображение отверстия с измеренными диаметрами

26. Заполнить табл. 3.3. В качестве параметра, характеризующего данный процесс, можно использовать конусообразность отверстия:

$$k = \frac{D_0 - D}{h}, \quad (3.6)$$

где h – толщина подложки.

Таблица 3.3

Параметры лазерного формирования отверстий в подложке

Длина волны	Мощность, мВт	Входное отверстие D_0 , мм	Выходное отверстие D , мм	Конусообразность
1,064 мкм	80			
	60			
	40			
10,6 мкм	80			
	60			
	40			

27. Построить графические зависимости конусообразности отверстий от мощности и длины волны лазерного излучения.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Схема процесса лазерной прошивки.
4. Теоретические расчеты параметров отверстий.
5. Результаты измерений диаметров отверстий.
6. Графики зависимостей.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите 3D-модули, особенности их конструкции, перспективы, применения.
2. Назовите способы создания отверстий в 3D-модулях.
3. Изложите методику создания отверстий в кремниевой подложке с помощью лазера.
4. Опишите физико-кинетическую модель прошивки отверстия.
5. Объясните влияние параметров обработки и фокусировки на диаметр и глубину отверстий.
6. Назовите преимущества и недостатки лазерной прошивки отверстий.

Лабораторная работа № 4

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ И МОНТАЖА ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Цель работы

Разработка технологии сборки и монтажа интегрированных электронных систем с SMD-компонентами.

Теоретические сведения

В настоящее время сборка электронных модулей на печатных платах (ПП) осуществляется по технологии поверхностного или смешанного монтажа. При наличии в конструкции электронного модуля (ЭМ) поверхностно-монтируемых компонентов (SMD) и электронных компонентов сквозного монтажа выделяют следующие основные варианты монтажа модулей (рис. 4.1): *одностороннего поверхностного монтажа*, в котором на одной стороне печатной платы расположены только SMD; *двустороннего поверхностного монтажа*, в котором на двух сторонах печатной платы расположены только ПМК; *смешанного совмещенного монтажа*, в котором на одной стороне печатной платы размещаются сложные SMD и компоненты со штыревыми выводами; *смешанного сложного монтажа*, в котором на лицевой стороне печатной платы размещаются сложные SMD и компоненты со штыревыми выводами, а на противоположной – только SMD, и *смешанного разнесенного монтажа*, где компоненты со штыревыми выводами размещаются на лицевой стороне платы, а простые SMD – на обратной стороне.

Технологический процесс сборки *электронного модуля одностороннего поверхностного монтажа* начинается с нанесения методом трафаретной печати припойной пасты на контактные площадки. Компоненты устанавливаются на печатную плату, и осуществляется их пайка. Для плат с двусторонней установкой компонентов приведенные выше операции повторяются. Компоненты, находящиеся на лицевой стороне печатной платы, повторно подвергаются нагреву (рис. 4.2). Однако вследствие действия сил поверхностного натяжения в припойной пасте они остаются на своих местах.

Технологический процесс сборки *модуля смешанного совмещенного монтажа* начинается с монтажа SMD на паяльную пасту. Затем устанавливают компоненты, монтируемые в отверстия, и осуществляют селективную пайку их выводов, что снижает тепловую нагрузку на плату и затраты на материалы.

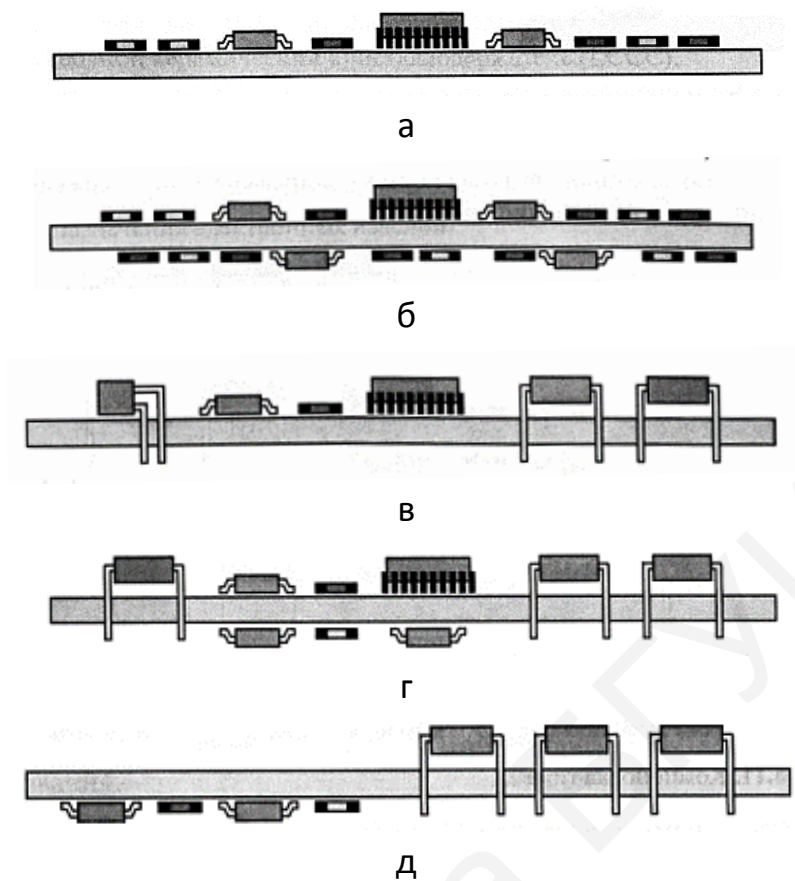


Рис. 4.1. Электронный модуль одностороннего (а), двустороннего поверхностного (б), смешанного совмещенного (в), смешанного сложного (г) и смешанного разнесенного (д) монтажа

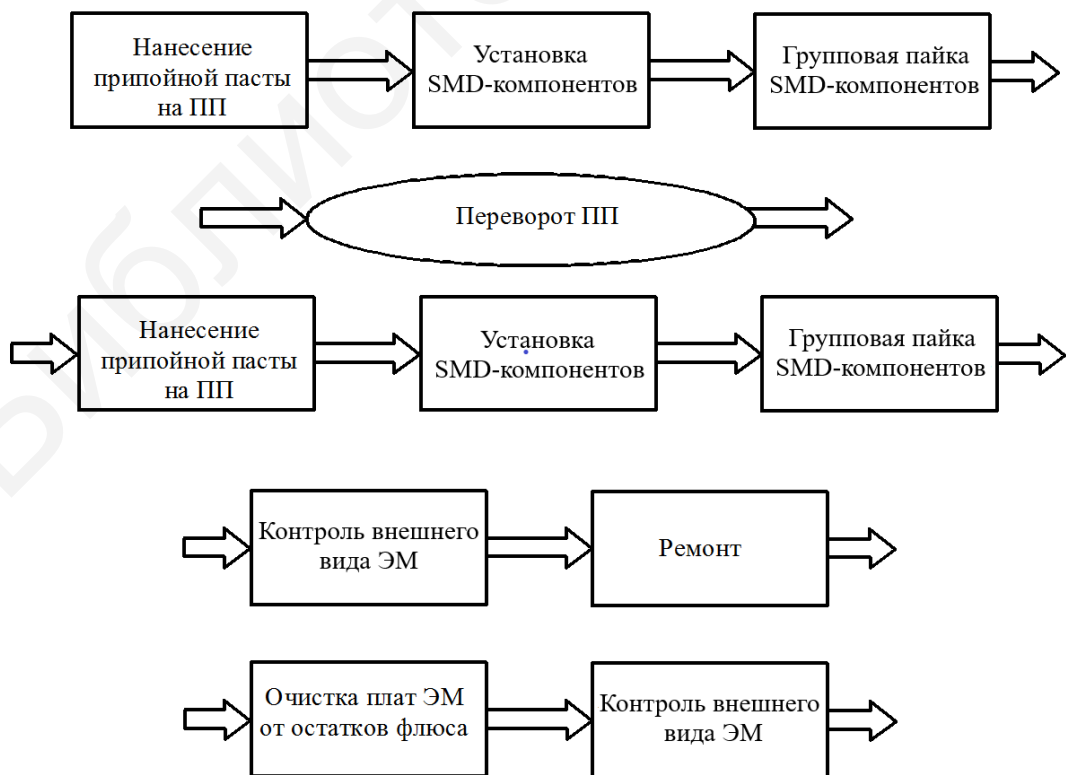


Рис. 4.2. Схема технологического процесса двустороннего поверхностного монтажа

Технологический процесс сборки *модуля смешанного сложного монтажа* является комбинацией процессов сборки модулей смешанного совмещенного и одностороннего поверхностного монтажа. Это наиболее сложный вариант для практической реализации, потому что он содержит максимальное число операций.

Если в *модуле смешанного разнесенного монтажа* применены компоненты с матричными выводами типа BGA, компоненты типа QFP и компоненты в металлокерамических корпусах, то технологический процесс его сборки реализуется по схеме в соответствии с рис. 4.3. При этом применяются операции, аналогичные предыдущим вариантам сборочных процессов.

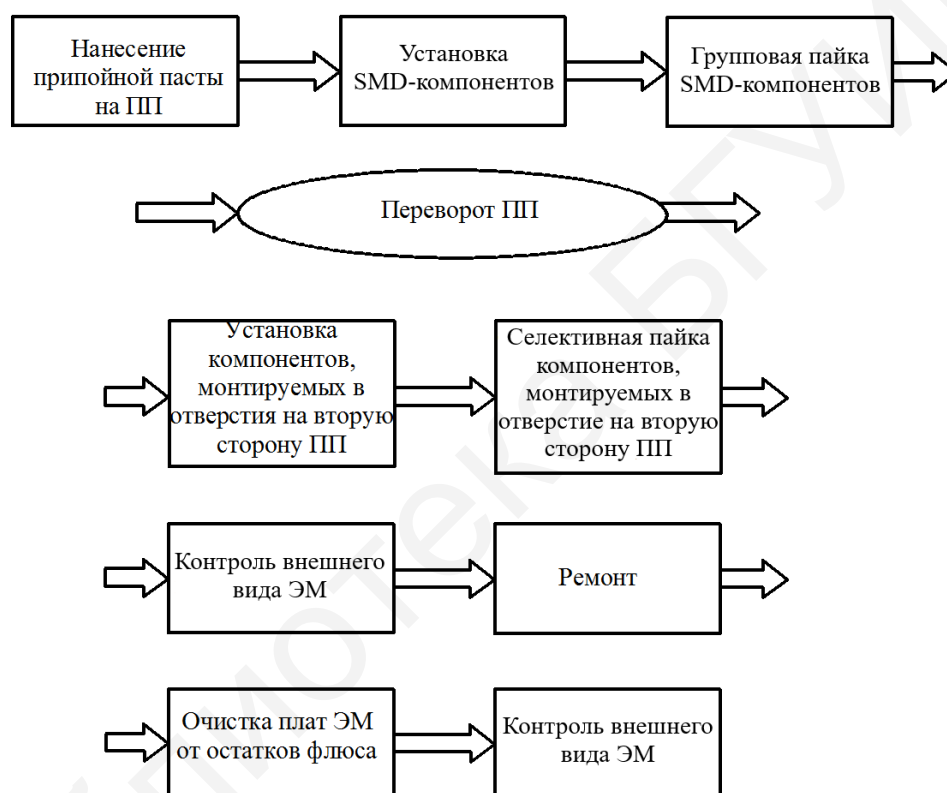


Рис. 4.3. Схема технологического процесса смешанного монтажа

Если же в модуле смешанного разнесенного монтажа применены простые SMD, то вначале они устанавливаются на клей, затем плата переворачивается, на вторую сторону устанавливаются компоненты сквозного монтажа и осуществляется волновая пайка всех компонентов. SMD за счет предварительного приклеивания во время пайки остаются на своих местах. Заключительные операции всех технологических процессов – очистка и контроль и при необходимости ремонт.

Нанесение паяльной пасты на печатную плату может происходить двумя методами: диспенсорным и трафаретным.

Техника трафаретной печати проста: при движении ракеля по поверхности трафарета паяльная паста продавливается сквозь его апертуры на контактные площадки (рис. 4.4). Наиболее важная фаза этого процесса – продвижение пасты вдоль поверхности трафарета при определенной силе прижатия ракеля и со строго выверенной скоростью его перемещения. Трафарет и ракель должны быть чистыми, а параметры силы и скорости перемещения ракеля – соответствовать характеристикам пасты. Ошибки в этих параметрах приводят к коротким замыканиям или непропаям. Преимущество трафаретного метода в том, что паста может быть нанесена слоем до 300 мкм (в предельных случаях до 650 мкм) с очень высокой точностью. Обычно отверстия трафарета открывают лишь 50–90 % площади контактных площадок, что исключает нанесение излишнего количества паяльной пасты. В результате данный метод в отличие от диспенсорного позволяет осуществлять высокоточный монтаж компонентов со сверхмалым шагом выводов.



Рис. 4.4. Трафаретное нанесение пасты

При нанесении паяльной пасты трафаретным методом используют специальные установки, которые делятся на два типа: лабораторные ручные рамы и полуавтоматические или автоматические принтеры. В ручных или полуавтоматических установках паяльная паста вручную размещается на трафарете и затем прожимается сквозь него на контактные площадки платы с помощью ракеля. Автоматические установки могут работать без вмешательства оператора, причем современные установки имеют встроенные 2D-системы контроля качества, что

позволяет проводить контроль сразу после нанесения паяльной пасты, не повышая тактовое время линии. Таким образом, отпадает необходимость промежуточного контроля.

Диспенсорный метод нанесения наиболее часто применяется в единичном и мелкосерийном производстве. К основным его преимуществам относятся простота переналадки оборудования и отсутствие необходимости изготавливать дорогостоящий трафарет. В основе диспенсорного метода лежит применение пневматического дозатора (рис. 4.5).

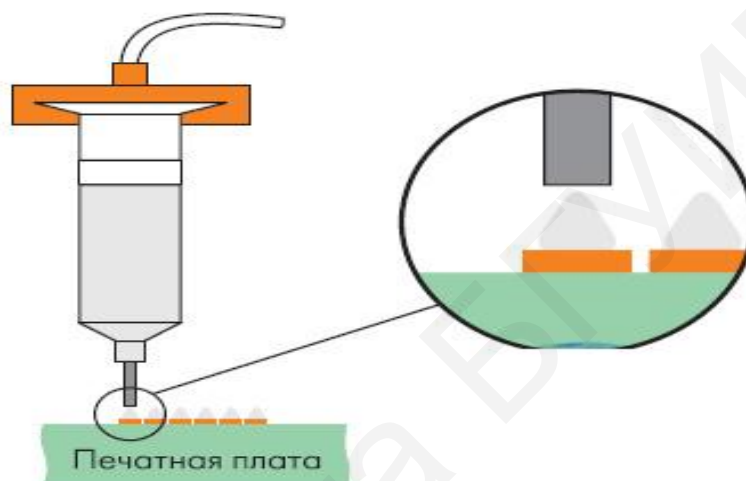


Рис. 4.5. Диспенсорное нанесение пасты

Под действием сжатого воздуха или шнека паста выдавливается через иглу на поверхность контактных площадок платы. Метод пригоден как для ручного нанесения, так и для автоматического. Производительность ручной работы для опытных операторов достигает 120 точек/мин, при автоматическом нанесении – 800 точек/мин. При ручном нанесении пасты возможны два наиболее опасных вида брака: неточное дозирование, которое приводит к замыканиям после оплавления припоя, и разное количество пасты на контактных площадках одного компонента, что приводит к эффекту опрокидывания. При автоматическом нанесении брак может возникнуть только по вине оператора (за исключением отказа оборудования по техническим причинам), поскольку точность современных установок достаточна.

Расчет расхода паяльной пасты выполняют с помощью уравнения Бернулли. Сначала находят скорость истечения пасты из дозатора. На поршень площадью S_0 действует внешняя сила F , и паста вытекает из отверстия площадью S (рис. 4.6).

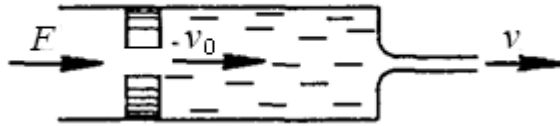


Рис. 4.6. Схема истечения пасты из дозатора

Обозначая скорость поршня через v_0 , имеем

$$\frac{F}{S_0} + \frac{1}{2} \rho v_0^2 = \frac{1}{2} \rho v^2. \quad (4.1)$$

В соответствии с уравнением неразрывности, если выбрать трубку с поперечным сечением S настолько малым, чтобы скорости жидкости во всех точках сечения были одинаковыми, причем это сечение ориентировано перпендикулярно линиям тока, то масса жидкости m , протекающей через это сечение за время t , будет равна

$$m = \rho v S t. \quad (4.2)$$

В стационарном потоке масса m одна и та же для любого поперечного сечения выбранной трубки тока, поэтому согласно формуле (4.2)

$$\rho_1 v_1 S_1 = \rho_2 v_2 S_2. \quad (4.3)$$

Если жидкость можно рассматривать как несжимаемую, то $\rho_1 = \rho_2$ и условие (4.3) принимает вид

$$v_1 S_1 = v_2 S_2. \quad (4.4)$$

Учитывая выражение (4.4), получаем

$$v S = v_0 S_0. \quad (4.5)$$

Выражая из формулы (4.5) v_0 и подставляя в формулу (4.1), получаем

$$\frac{F}{S_0} = \frac{1}{2} \rho v^2 \left[1 - \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 \right]. \quad (4.6)$$

Обычно площадь отверстия иглы во много раз меньше площади поршня: $S \ll S_0$. Тогда, пренебрегая квадратом отношения S/S_0 по сравнению с единицей, находим силу, необходимую для выдавливания пасты:

$$F = \frac{1}{2} \rho v^2 S_0. \quad (4.7)$$

Скорость вытекания паяльной пасты при этом равна

$$v = \sqrt{\frac{2F}{\rho S_0}}. \quad (4.8)$$

Подставив в выражение (4.8) формулу расчета давления $P = F/S$, получаем следующее выражение:

$$v = \sqrt{\frac{2SP}{\rho S_0}}. \quad (4.9)$$

При этом масса выдавленной пасты за промежуток времени $t = 1$ с рассчитывается следующим образом:

$$m = \frac{S_0 v}{\rho}. \quad (4.10)$$

Подставив значение v из формулы (4.9), получим

$$m = \frac{S_0}{\rho} \sqrt{\frac{2SP}{\rho S_0}} = \sqrt{\frac{2SS_0P}{\rho^3}}. \quad (4.11)$$

Плотность паяльной пасты равна

$$\rho = \frac{P \cdot M}{100 \%}, \quad (4.12)$$

где M – процент содержания металла в паяльной пасте;

P – плотность припоя в паяльной пасте.

Плотность припоя в паяльной Sn62RM92 равна 8,5 г/см³. Содержание металла в этой же паяльной пасте равно 90 %. Подставив эти значения в формулу (4.12), получим

$$\rho = \frac{8,5 \cdot 90 \%}{100 \%} = 7,65 \text{ г/см}^3.$$

С учетом размеров дозатора и плотности пасты Sn62RM92A, при $S_0 = 6,15 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$, $S = 1,02 \text{ см}^2$ построена зависимость массы выдавленной пасты от давления (рис. 4.7) и от времени дозирования (рис. 4.8).

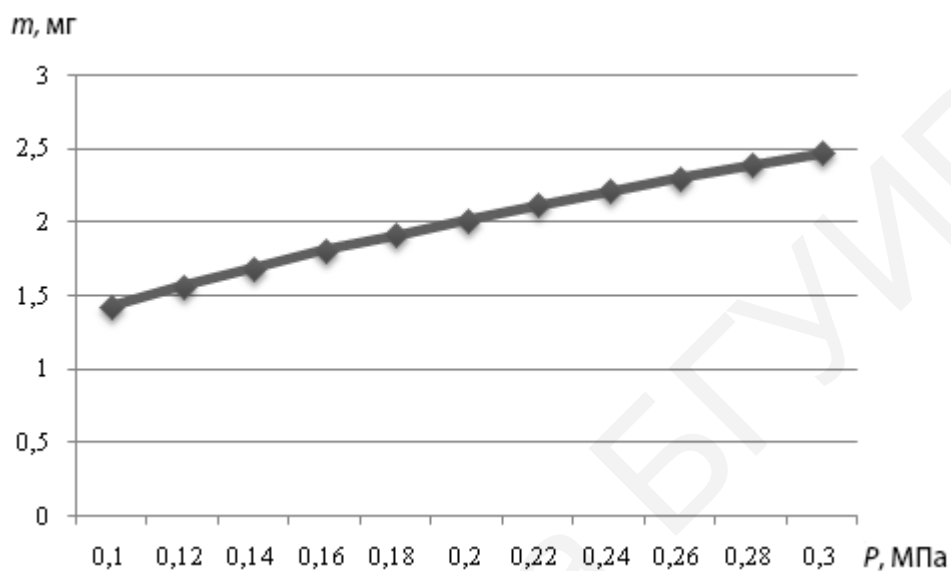


Рис. 4.7. Зависимость массы дозируемой пасты от давления

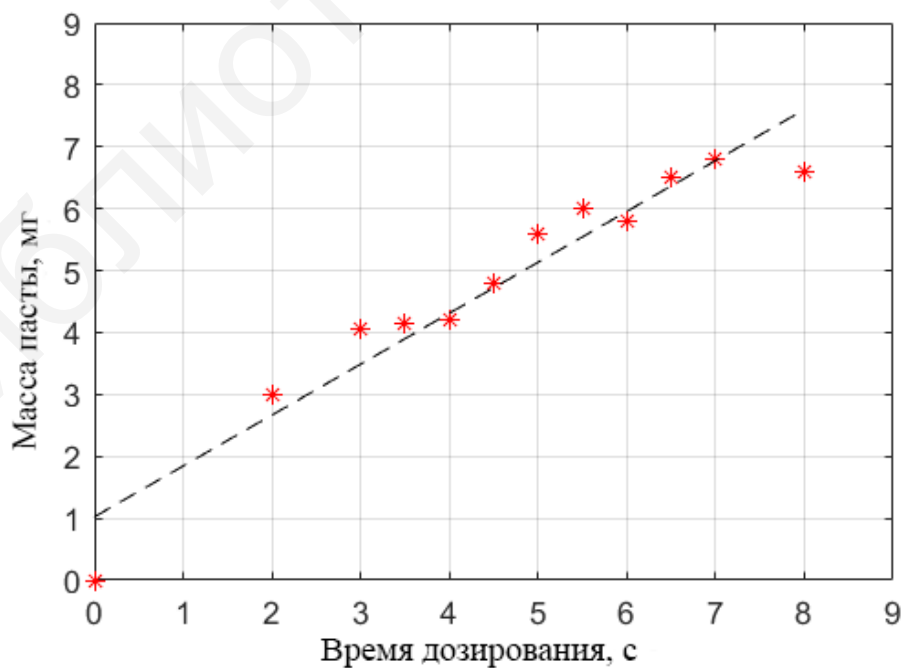


Рис. 4.8. Зависимость массы дозируемой пасты от времени дозирования

Процесс пайки является наиболее ответственным этапом технологии поверхностного монтажа (ПМ), от которого зависят надежность и технические характеристики электронных модулей. В технологии ПМ широко применяется метод групповой пайки с помощью инфракрасного нагрева (ИК-пайка). В настоящее время этот метод находит все более широкое применение ввиду преимуществ, связанных с возможностями более гибкого управления режимами нагрева (наличие нескольких температурных зон, возможность получения любого температурного профиля в зоне пайки).

Пайка оплавлением дозированного припоя является сложным физико-химическим процессом, протекание которого определяется действием чаще всего всех видов теплообмена (конвективный, кондуктивный, излучением), процессами испарения, а также свойствами применяемых материалов. Этот процесс в общем случае можно разделить на пять фаз:

- испарение растворителя из припойной пасты;
- активация и воздействие флюса на зону пайки;
- предварительный нагрев компонентов и платы;
- плавление припоя и смачивание им соединяемых частей;
- контролируемое охлаждение модуля до необходимой температуры.

Практическое применение новых методов пайки требует понимания физико-химических процессов, протекающих на каждой из указанных выше фаз, а также проведения во многих случаях экспериментальных исследований для выбора оптимального метода и режимов пайки.

Если в традиционном монтаже в отверстиях качество паянного соединения обеспечивается также и механическим креплением выводов компонентов, то при ПМ под высоким качеством пайки следует понимать прежде всего получение «упругих» мест пайки (рис. 4.9), в которых высота гантели припоя на торцах и выводах компонентов не должна превышать две трети высоты корпуса.



Рис. 4.9. Виды паяных соединений SMD

Избыток припоя будет способствовать также смещению компонента во время пайки из-за возникающих результирующих моментов. Поэтому важным требованием к процессу пайки является обеспечение упругих паяных соединений и их повторяемости в технологических циклах производства ПМ-изделий.

Значительное влияние на качество пайки оказывает температурно-временной профиль процесса. Основные применяемые методы оплавления припоя (в парогазовой фазе, ИК-нагрев и обдувом нагретым воздухом (принудительной конвекцией) обеспечивают различные температурно-временные диаграммы нагрева. Поэтому температурно-временной профиль процесса пайки (рис. 4.10) должен быть обоснованно определен (исходя из конструктивных особенностей *SMD*, применяемых материалов и др.) до выбора метода и оборудования для пайки.

Процесс оплавления припоя можно разделить на три фазы: предварительный нагрев, оплавление, охлаждение. Фаза предварительного нагрева создает благоприятные предпосылки для качественного оплавления припоя. В частности, в течение этой фазы осуществляется равномерный нагрев до требуемой температуры платы и компонентов, испарение растворителя из припойной пасты, удаление оксидных пленок за счет действия флюса и расплавление частиц припойной пасты.

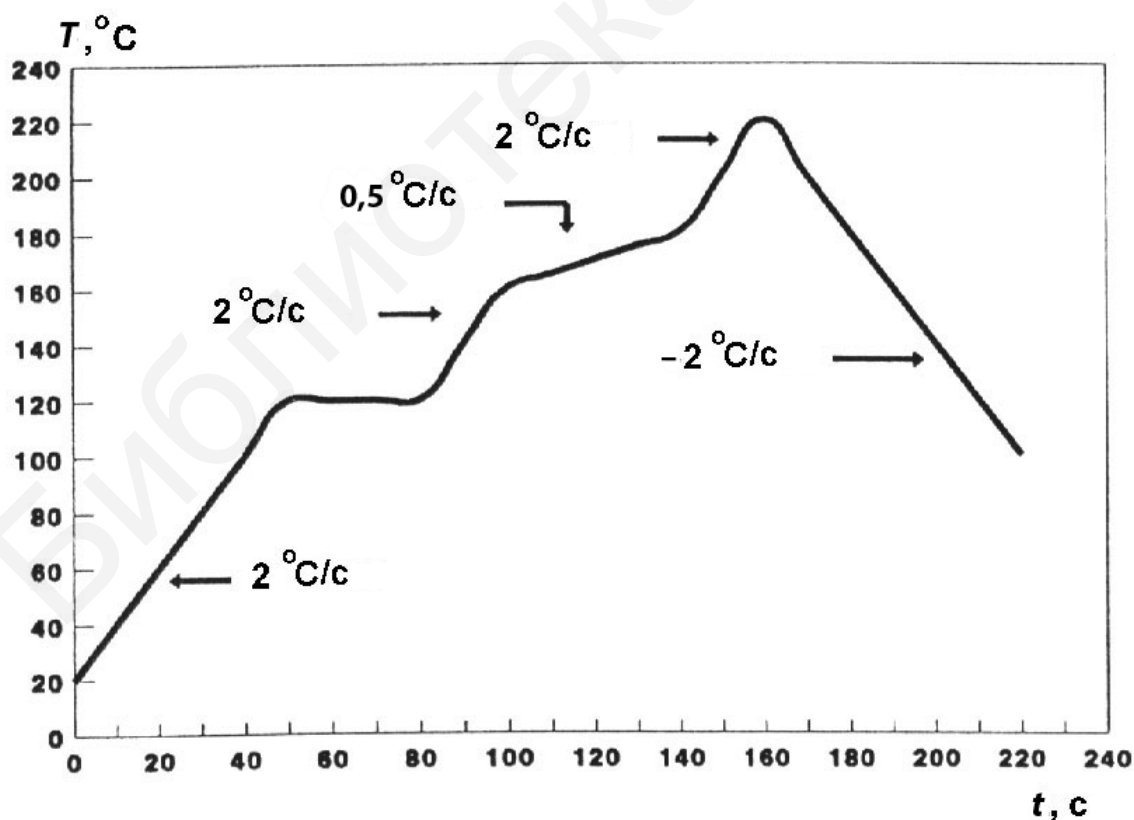


Рис. 4.10. Типовой термопрофиль ИК-пайки

Непосредственно фаза оплавления припоя протекает при температуре, превышающей температуру плавления применяемого сплава, что обеспечивает снижение сил поверхностного натяжения припоя и увеличивает смачиваемость соединяемых поверхностей. Время выдержки изделия при этой температуре оказывает существенное влияние на качество пайки. Длительность и температурный профиль фазы охлаждения также оказывают влияние на свойства паяного соединения, в частности, на этой фазе формируются мелкозернистая структура сплава и уровень остаточных напряжений. Рекомендуемый режим охлаждения – 2 °С/с, хотя может применяться скорость охлаждения до 5 °С/с.

Температурно-временной профиль процесса пайки оказывает также влияние на действие флюса. В этом отношении необходимо учитывать две характеристики: температуру активации флюса и время, необходимое для активации флюса. Флюс должен быть активирован в течение времени, достаточного для растворения окисных пленок с контактных площадок, вывода компонентов и припойной пасты. В идеале эти процессы должны завершиться до начала полного расплавления припоя. Установлено, что для большинства применяемых флюсов температура активации составляет 110–120 °С, требуемое время активированного состояния – от 30 до 90 с.

При основной фазе плавления температура нагрева припоя должна превышать температуру плавления на 25–40 °С в течение 20–60 с. Это обеспечивает качественное смачивание поверхностей соединяемых деталей.

При выборе температурно-временного профиля необходимо учитывать допустимые температуры нагрева компонентов, особенно активных. Большинство таких компонентов могут подвергаться без разрушений воздействию температур 210–220 °С в течение 20–60 с. Критичны к высокоскоростным тепловым воздействиям конденсаторы, в которых тепловой удар может вызвать появление трещин и отслоение металлизации. Рекомендуемая скорость изменения температуры при пайке конденсаторов составляет не более 2 °С/с.

После сборки и монтажа электронных модулей обязательными контрольными операциями являются визуальный и электрический контроль. Визуальным контролем проверяют: внешнее соответствие изделия чертежу, образцу, качество крепления деталей, сборочных единиц (совмещается с операцией стопорения резьбовых соединений), качество паяных и сварных соединений, отсутствие внешних дефектов (трещин, следов коррозии и т. д.), качество отделки поверхности в сравнении с эталоном или образцами, маркировку изделия.

Наружный осмотр проводят как невооруженным глазом, так и с помощью лупы (×4), микроскопа бинокулярного МБС-9 с 50-кратным увеличением или специальных приборов и приспособлений. Дефекты при создании сборочных

единиц возникают в результате неправильного программирования, технических отказов или субъективных факторов, поэтому целесообразно проверять качество и правильность сборки до монтажа. В процессе контроля можно выявить следующие дефекты поверхностного монтажа (рис. 4.11):

1) **спаи** выводов компонентов с шагом между выводами 0,5 мм, которые возникают вследствие неправильно спроектированного трафарета (с отступлением от требований международного стандарта IPC-SM-782 A), когда размеры апертуры трафарета превышают размеры контактных площадок;

2) **непропай** выводов вследствие неправильно подобранного температурного профиля и «теневого эффекта», характерного для метода ИК-пайки;

3) **дефект «надгробный камень»**, возникающий из-за неправильного профиля ИК-пайки и смещения чип-компонента;

4) **смещение выводов** элементов относительно контактных площадок вследствие неточности позиционирования;

5) **недостаточная высота паяного соединения (галтели)** согласно критериям оценки качества международного стандарта IPC-A-610 вследствие сбоя в настройке полуавтомата для нанесения пасты;

6) **шарики припоя** вдоль корпусов чипов, которые нарушают требования к эстетическому виду выпускаемой продукции.



Шарик припоя



Непропай выводов



Смещение выводов



Спаи выводов



Недостаточная высота галтели



Дефект «надгробный камень»

Рис. 4.11. Дефекты поверхностного монтажа

Электрический контроль модулей является необходимой операцией, предшествующей настройке. Эту операцию осуществляют, используя электромонтажные схемы изделия и специальные стенды.

Критичны к высокоскоростным тепловым воздействиям ПМ-конденсаторы, в которых тепловой удар может вызвать появление трещин и отслоение металлизации. Рекомендуемая скорость изменения температуры при пайке конденсаторов составляет не более 2 °С/с. Имеются конструкции, выдерживающие без разрушения нагрев/охлаждение со скоростью 3–6 °С/с.

Применение ИК-пайки является новым перспективным направлением в технологии поверхностного монтажа, которое обеспечивает уменьшение затрат на эксплуатацию оборудования при одновременном повышении качества паяных соединений.

Устройство и работа манипулятора ЭМ-4725-1

Манипулятор и его составные части изображены на рис. 4.12.

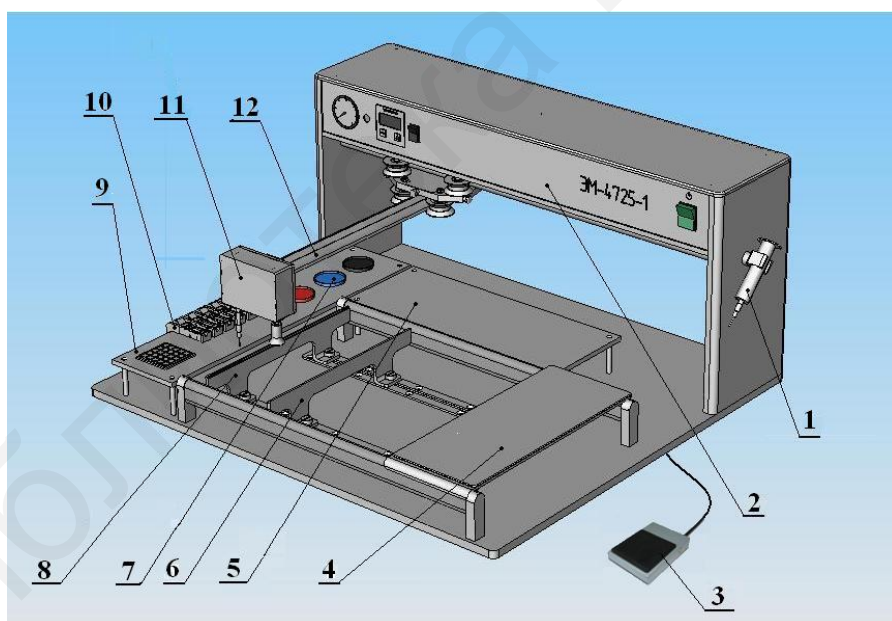


Рис. 4.12. Манипулятор поверхностного монтажа кристаллов ЭМ-4725-1:

- 1 – дозатор; 2 – блок управления; 3 – педаль; 4 – подлокотник;
- 5, 9 – предметный столик; 6, 8 – рабочий столик; 7 – чашка;
- 10 – держатель блистер-лент; 11 – вакуумный пинцет; 12 – привод Y

В основе работы манипулятора лежит монтаж чип-элементов на печатную плату, осуществляемый в следующем порядке:

- а) нанесение паяльной пасты на поверхность платы при помощи дозатора;

б) присоединение чип-элементов к поверхности платы при помощи вакуумного пинцета.

Перечень органов управления манипулятором приведен в табл. 4.1, а их расположение на блоке управления показано на рис. 4.13.

Таблица 4.1

Органы управления и контроля на манипуляторе

Позиция	Наименование
1	Манометр
2	Регулятор давления
3	Таймер
4	Кнопка включения дозатора
5	Кнопка включения манипулятора

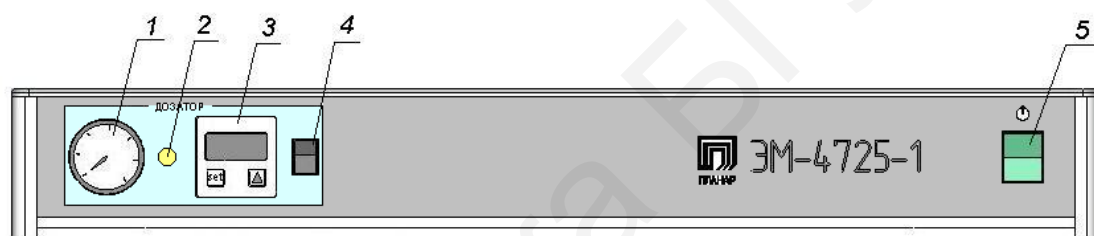


Рис. 4.13. Блок управления:

1 – манометр; 2 – регулятор давления; 3 – таймер;
4 – кнопка включения дозатора; 5 – кнопка включения манипулятора

Манипулятор состоит из следующих составных частей: вакуумного пинцета; привода Y вакуумного пинцета; дозатора; подлокотника и монитора.

Дозатор включает в себя колбу 1 (см. рис. 4.12), педаль 3 и органы управления. Для того чтобы начать работу с дозатором, включают манипулятор кнопкой 5, затем включают кнопку 4 (см. рис. 4.13). Регулятором 2 устанавливают необходимое для дозирования давление воздуха, а с помощью таймера 3 устанавливают необходимое время дозирования. С помощью колбы наносят дозы клея или пасты на поверхность печатной платы, нажимая ногой на педаль 3 (см. рис. 4.12).

Установка ИК-пайки (рис. 4.14) предназначена для оплавления припойных паст при сборке электронных модулей с поверхностно-монтируемыми изделиями электронной техники. Установка осуществляет пайку как с одной стороны, так и одновременно с двух сторон платы. В качестве источника ИК-излучения применены галогенные лампы мощностью 300 Вт для верхнего блока нагревателя и 1000 Вт для нижнего блока подогрева. Для лампы КИ 220-1000 при питающем напряжении 220 В максимальная спектральная интенсивность излучения

($I_{\lambda_{\max}}$) достигает 52 Вт/(см·мкм) на длине волны 1,1 мкм, а для КГМ 30-300 $I_{\lambda_{\max}}=18$ Вт/(см·мкм) на длине волны 1,3 мкм. Перед пайкой верхний ИК-рефлектор (см. рис. 4.14), укрепленный на конце поворотной штанги, ориентируют на центр рабочей зоны. Затем плату с SMD устанавливают в рабочую зону так, чтобы монтируемые элементы оказались в ее центре.

После установки платы осуществляется запуск предварительного нагрева клавишей 8. Температура в зоне пайки начинает расти со скоростью 5 °С/с до установленного значения в 100 °С, после чего необходимо отключить предварительный нагрев (клавиша 8) и осуществить запуск верхнего нагревателя термостол (клавиша 9), далее температура растет со скоростью 5–14 °С/с до установленного значения в пределах 200–210 °С. Через некоторое время происходит полное оплавление припоя на выводах и нагрев прекращается (клавиша 9).

Верхний ИК-нагреватель оснащен оригинальной системой фокусировки теплового излучения, позволяющей обеспечить равномерное температурное поле. Используемое ИК-излучение с длиной волны 2–8 мкм оптимально в плане соотношения отражаемой и поглощаемой тепловой энергии темными и светлыми поверхностями объекта.

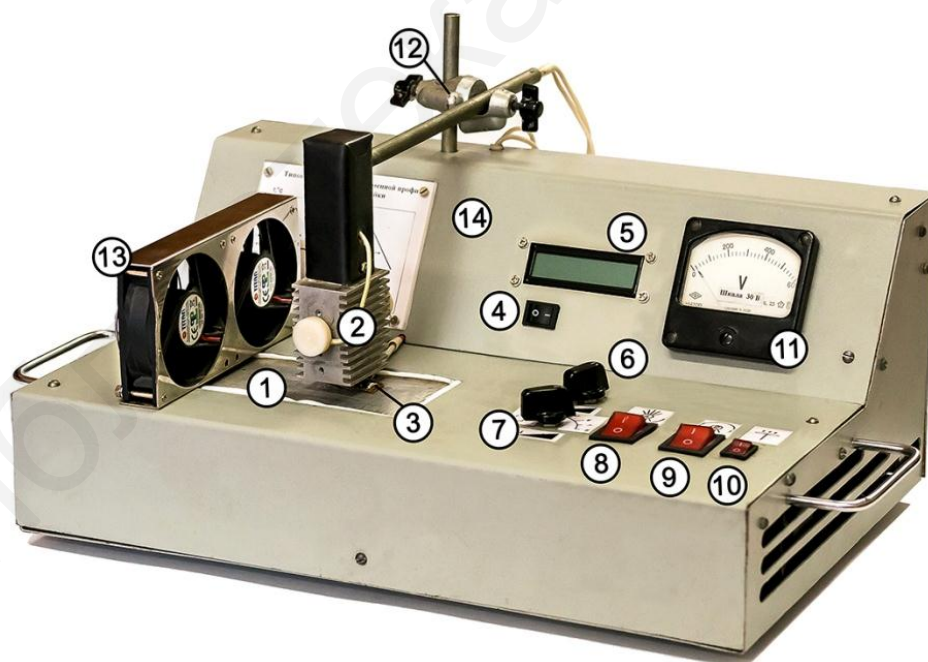


Рис. 4.14. Установка инфракрасной пайки:

- 1 – термостол; 2 – верхний ИК-нагреватель; 3 – термопара; 4 – клавиша включения блока управления; 5 – ЖК-дисплей; 6; 7 – регуляторы мощности нагрева; 8 – клавиша включения нижнего нагрева; 9 – клавиша включения верхнего нагрева; 10 – клавиша включения вентиляторов; 11 – вольтметр для контроля напряжения на верхнем нагревателе; 12 – кронштейн верхнего нагревателя; 13 – вентиляторы; 14 – передняя панель

Значения температуры на поверхности микромодуля измеряются при помощи термопары градуировки ХК и используются в качестве входных параметров системы регулирования. Термопара закреплена непосредственно на поверхности микромодуля.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со сборочным чертежом электронного микромодуля и определить места установки элементов. Получить платы и SMD для пайки.

Примечание. Характеристики некоторых SMD-компонентов приведены на рис. 4.15 и в табл. 4.2. Электронный микромодуль ММАК выполнен по технологии двустороннего поверхностного монтажа (рис. 4.16). Перечень элементов приведен в табл. 4.3.

2. Очистить поверхность платы с помощью растворителя и тампона.

3. Нанести паяльную пасту дозатором на посадочные места под чип-элементы. Дозу пасты регулировать количеством нажатий на педаль. При загустении пасты добавить в нее разбавитель.

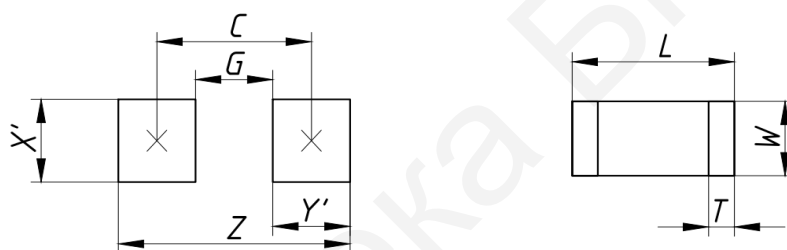


Рис. 4.15. Схематическое изображение SMD-элементов

Таблица 4.2

Размеры некоторых SMD-компонентов

Типоразмер		Размеры контактной площадки					Размеры SMD-компонента		
в дюй- мах	в милли- метрах	Z	G	X'	Y'	C	L	W	T
0603	1608	2,413	0,635	1,016	0,889	1,524	1,55 + 0,10 1,55 - 0,05	0,85 ± 0,10	0,3 ± 0,2
0805	2012	3,175	0,889	1,397	1,143	2,032	2,00 + 0,20 2,00 - 0,10	1,25 ± 0,15	0,3 ± 0,2
1206	3216	4,572	1,524	1,778	1,524	3,048	3,20 + 0,20 3,20 - 0,10	1,60 ± 0,15	0,45 ± 0,2
1210	3225	4,572	1,524	2,667	1,524	3,048	3,20 ± 0,20	2,50 ± 0,25	0,55 ± 0,2

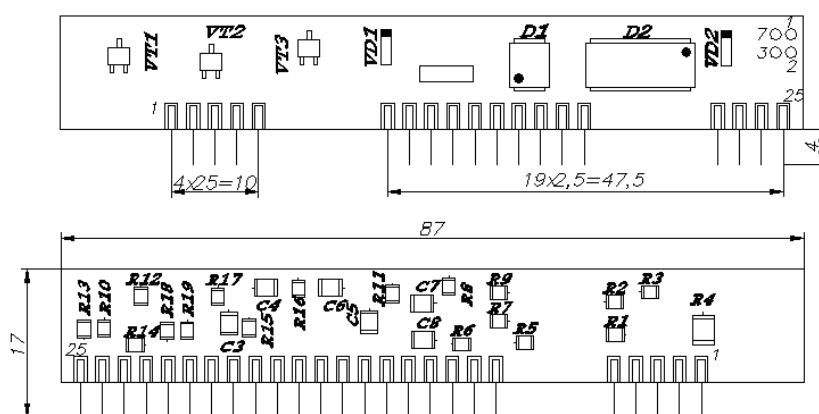


Рис. 4.16. Электронный микромодуль

Таблица 4.3

Перечень элементов

Номер позиции	Наименование	Обозначение
1	Гребенка выводная	–
2–16, 18–20	Резистор P1-12	R1–R15, R17, R18, R20
17	Резистор ЧИП 1206	R19
21, 28	Конденсатор МЧ 2220-2	C1, C6
22–27	Конденсатор МЧ 1206-2	C2-C7, C8
29	Диод LL4448	VD2
30	Стабилитрон 1N822A	VD1
31	Транзистор 2N2221	VT2
32	Микросхема IN311AD	D1
33	Микросхема MC145567 DW	D2
34	Транзистор BD237	VT1
35	Транзистор BD139	VT3

4. Подготовить вакуумный пинцет к работе, для чего выполнить следующие действия: включить в сеть компрессор УК25-1,6М; тумблер I компрессора перевести в верхнее положение; создать разрежение в системе 10 Па; открыть клапан вакуумного пинцета и проверить эффективность удержания элемента на рабочем торце.

5. Закрепить плату на столике ручной установки элементов и установить 2–3 типа SMD на плату вакуумным пинцетом согласно сборочному чертежу и варианту задания (рис. 4.16, табл. 4.3). Для этого включить монитор кнопкой Power на тюнере, а затем кнопкой Power на мониторе. Включить манипулятор ЭМ-4725-1 кнопкой 5 (см. рис. 4.13). Захват элементов выполнить вакуумным инструментом с ячеистых кассет или блистер-лент. Перемещение компонентов и их ориентацию в пространстве осуществить при помощи рукоятки 11 (см. рис. 4.12).

Для того чтобы захватить компонент, необходимо при помощи рукоятки подвести вакуумный пинцет с инструментом к компоненту и коснуться

его, совершив небольшой перебеж для включения вакуума, далее при помощи рукоятки переместить компонент в нужное место и, сориентировав его, установить на плату, совершив небольшой перебеж для выключения вакуума.

6. Создать температурный профиль ИК-пайки, для чего произвести первичную настройку станции: регуляторы 6, 7 (см. рис 4.14) установить в положение max. Включить блок управления станцией переключателем 4, при этом на ЖК-дисплее отобразится текущая температура. Включить нижний нагреватель клавишей нагрева 8 и контролировать изменение температуры платы по дисплею на передней панели установки 5. При достижении температуры 100 °С отключить нижний нагреватель 8 и включить верхний нагреватель клавишей 9. При достижении температуры в рабочей зоне 220 °С отключить верхний нагреватель и включить вентилятор охлаждения переключателем 10.

7. Построить графики зависимости температуры в зоне пайки от времени нагрева, сравнить их с теоретическим температурным профилем ИК-пайки и определить оптимальные параметры процесса.

8. Установить плату микромодуля в рабочую зону установки ИК-пайки и выполнить пайку SMD в соответствии с оптимальным температурным профилем. По окончании пайки выключить нагрев и охлаждение.

9. Провести визуальный контроль качества пайки SMD с помощью бинокулярного микроскопа МБС-2: отметить такие дефекты, как мостики и натеки припоя, непропаи и др., определить число шариков припоя, образовавшихся в процессе пайки (по всей площади платы), и др. Осуществить контроль качества установки элементов на плату, измерив величины смещения элементов по осям X, Y ; ($\Delta x, \Delta y$), как показано на рис. 4.17. Рассчитать угол отклонения элемента по формуле

$$\Delta\varphi = \arctg \frac{\delta_1}{\delta_2}. \quad (4.13)$$

Данные внести в табл. 4.4.

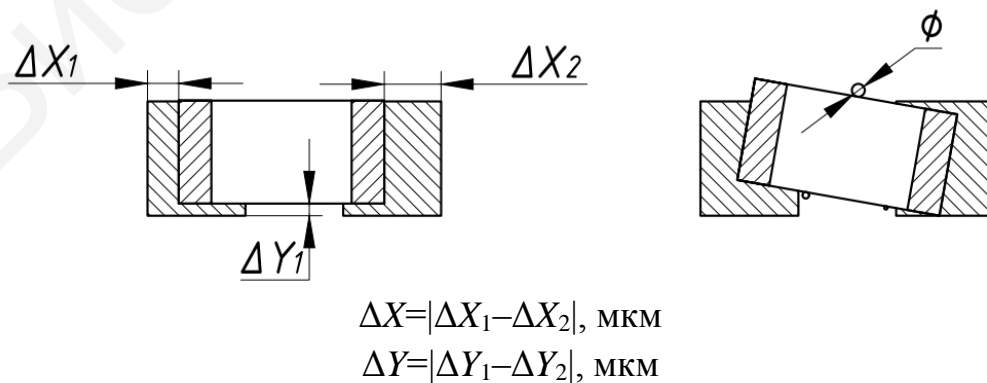


Рис. 4.17. Схема определения дефектов

Результаты контроля позиционирования

Обозначение элемента	Δx , мкм	Δy , мкм	$\Delta \varphi$, град	δ , мкм	Диаметр шариков припоя, мкм	Прочие дефекты
R1						
.....						

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Схема технологического процесса сборки и монтажа модуля.
4. Температурный профиль пайки SMD-компонентов.
5. Результаты контроля качества сборки микромодуля.
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите особенности элементной базы поверхностного монтажа.
2. Назовите преимущества технологии поверхностного монтажа.
3. Какие фазы включает в себя пайка оплавлением?
4. Опишите температурные профили пайки SMD-элементов обычным и бессвинцовым припоем.
5. Опишите принцип работы и основные параметры установки ИК-пайки.
6. Назовите типичные дефекты поверхностного монтажа.

Лабораторная работа № 5

МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПАЙКИ SMD-КОМПОНЕНТОВ

Цель работы

Изучение методик микропроцессорного управления технологическими процессами пайки SMD-компонентов в 3D-электронных модулях с использованием программируемого мини-компьютера Raspberry.

Теоретические сведения

Сегодня технология 3D-электронных модулей является бурно развивающейся областью электроники, которая активно поддерживается государством и множеством частных компаний. В связи с этим актуальной задачей является подготовка молодых специалистов в этой области, которые могли бы заниматься решением проблем микроконтроллерного управления процессами монтажа SMD-компонентов с применением инфракрасного нагрева. В отличие от существующих аналогов в данной работе в качестве основы для управления технологическими процессами используется одноплатный мини-компьютер Raspberry PI. Это устройство включает в себя микропроцессор с архитектурой ARM11, 512 МБ оперативной памяти и встроенный графический процессор. Благодаря такой комбинации, на Raspberry PI можно решать ресурсоемкие задачи машинного зрения и искусственного интеллекта, а также задачи по управлению технологическими процессами.

Компьютер Raspberry PI снабжен двумя портами USB2.0, HDMI и композитными видеовыходами, что позволяет выполнять работы без использования отдельного персонального компьютера. Управляющая программа составляется и тестируется на стороне Raspberry PI в графической среде операционной системы Debian. Наличие входов/выходов общего назначения и распространенных шин передачи данных (SPI, I2C и UART) значительно упрощает соединение с различными датчиками, индикаторами и исполнительными устройствами.

Компоновочная схема Raspberry PI Model B представлена на рис. 5.1, а, внешний вид – на рис. 5.1, б. Расшифровка обозначений:

- CPU&GPU – центральный процессор с интегрированным графическим ускорителем;
- 512MB RAM – модуль ОЗУ 512 МБ;
- HDMI – выход HDMI для подключения цифрового дисплея высокого разрешения;

- RCA Video – выход RCA для подключения аналогового дисплея;
- Audio – выход звуковой карты;
- USB – порт USB;
- LAN – порт сети Ethernet;
- LEDs – набор индикаторов работы сети, питания и флеш-карты;
- GPIO (General Purpose Input/Output) – порт ввода/вывода общего назначения;
- Power – разъем питания microUSB;
- SD Card – разъем для флеш-карты с операционной системой.

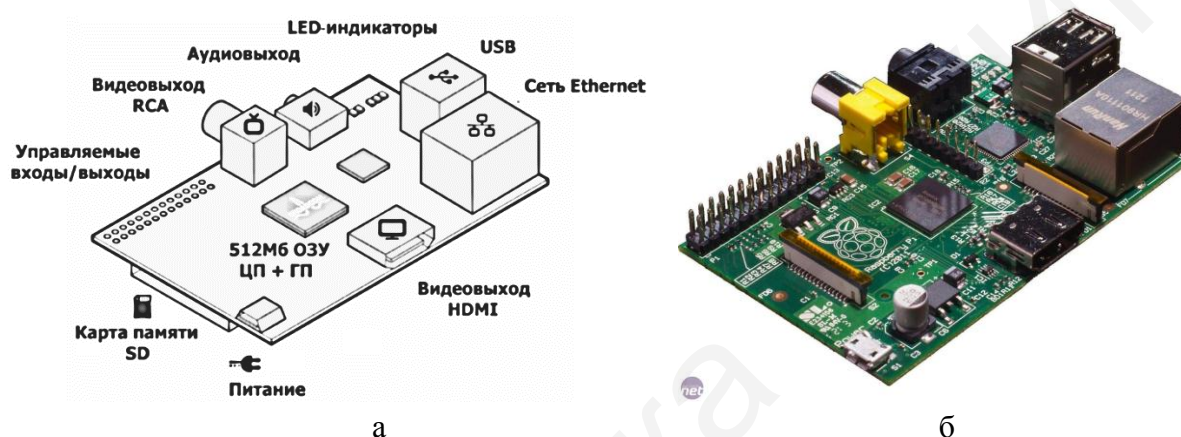


Рис. 5.1. Компоновочная схема (а) и внешний вид (б) Raspberry PI Model B

Подготовка Raspberry PI к работе

1. Подключение периферии и модуля флеш-памяти.

Для работы с Raspberry PI потребуется клавиатура и мышь с USB-интерфейсом. Необходимо подключить эти устройства к двум доступным USB-портам Raspberry PI, вставить флеш-карту с операционной системой в соответствующий разъем, который отмечен на схеме устройства как SD Card.

2. Подключение внешнего VGA-дисплея.

При использовании внешнего дисплея с VGA-интерфейсом необходимо сначала подключить VGA-кабель дисплея к переходнику HDMIVGA, а затем присоединить этот переходник к HDMI-порту Raspberry PI.

3. Подключение питания.

Для подключения питания к Raspberry PI достаточно присоединить кабель блока питания к microUSB-разъему, а затем включить блок питания в сеть.

4. Подключение измерительного устройства.

Для подключения измерительного устройства к Raspberry PI необходимо присоединить кабель к USB-разъему или же к отдельному выводу общего назначения. Raspberry PI с подключенными внешними интерфейсами изображен на рис. 5.2.

5. Вход в систему.

На флеш-карте, прилагаемой к комплекту, установлена операционная система Raspbian на базе Linux Debian. После включения устройства в сеть на дисплее отобразится информация о загрузке ОС в оперативную память. По завершении загрузки появится рабочий стол.



Рис. 5.2. Внешний вид лабораторного макета на базе Raspberry PI

В качестве источников ИК-нагрева для пайки SMD-компонентов выбраны: в ближней ИК-области излучения спектра – галогенная лампа накаливания КГМ 30/300 (рис. 5.3, а), в средней ИК-области – керамический ИК-нагреватель типа SHTS/4 (рис. 5.3, б) фирмы Elstein. Сверхвысокотемпературный излучатель SHTS фирмы Elstein состоит из керамического корпуса, заполненного высококачественной теплоизоляцией. В ребра передней черной нагревательной панели встроена электрическая нагревательная спираль. Благодаря прочности монтажа нагревательной спирали излучатель может эксплуатироваться независимо от его положения. На задней стороне находится стандартный патрон фирмы Elstein для крепления. Для защиты керамики и нагревательной спирали нагреватель покрыт особой черной глазурью. При высоких рабочих температурах она передает до 25 % больше энергии излучения, чем обычная белая глазурь. В сочетании с позолоченной обратной стороной КПД нагревателя достигает 75 %. Характеристики данных нагревателей приведены в табл. 5.1.

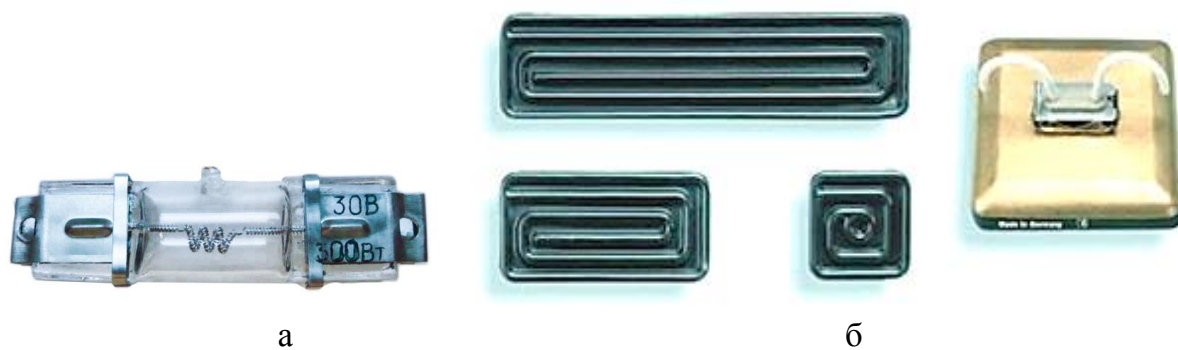


Рис. 5.3. Инфракрасные нагреватели:
 а – галогенная ИК-лампа КГМ 30-300;
 б – керамический ИК-нагреватель Elstein SHTS/4

Таблица 5.1

Основные характеристики ИК-нагревателей

Характеристика	КГМ 30-300	SHTS/4
Длина волны, мкм	0,7–1,5	2–10
Максимальная интенсивность излучения, кВт/м ²	34,6	76,8
Рабочая температура, К	900	1130
Мощность, Вт	300	300
Напряжение питания, В	30	220
Габаритные размеры, мм	50 × 12 × 12	60 × 60 × 30

Структурная схема микропроцессорного управления термопрофилем ИК-нагрева изображена на рис. 5.4.



Рис. 5.4. Схема микропроцессорного управления термопрофилем ИК-нагрева

Данное измерительное устройство включает в себя термопару и согласующее устройство. Микропроцессорный блок управления Raspberry PI управляет температурой нагрева посредством изменения напряжения на ИК-нагревателе и вентиляторе, а также выводит данные на дисплей. ИК-нагреватель керамического типа Elstein SHTS/4 питается от лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) напряжением 230 В.

Рекомендуемые термопрофили для двух видов паст даны на рис. 5.5.

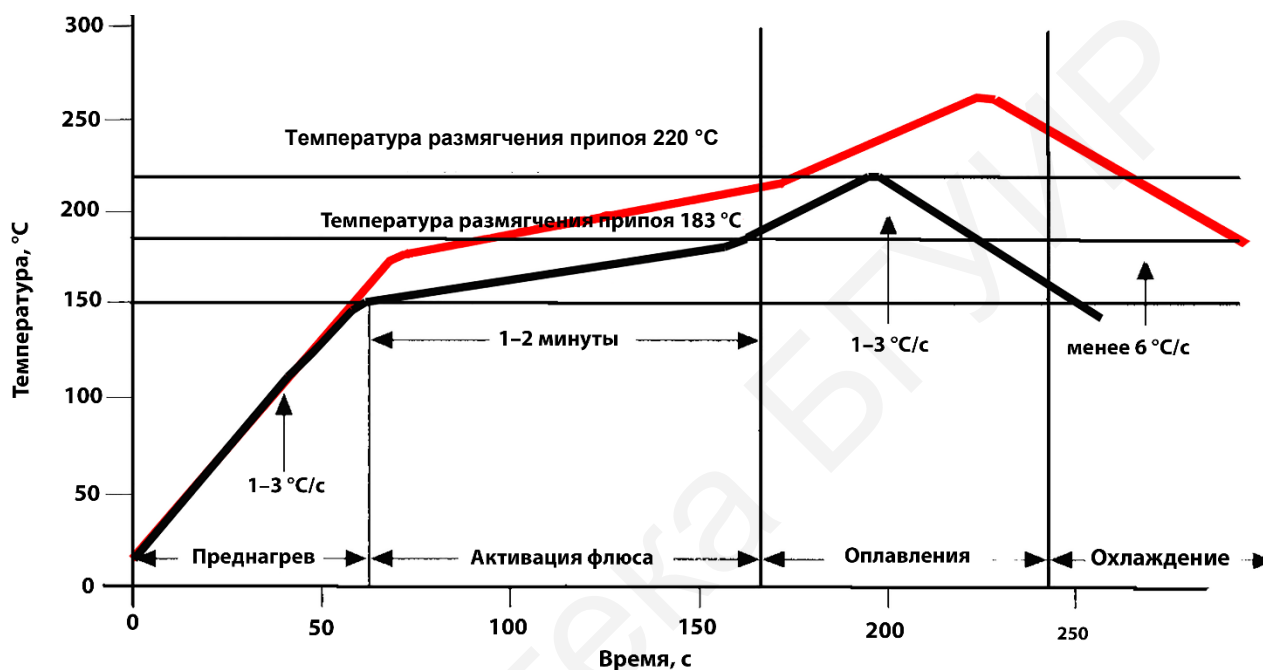


Рис. 5.5. Температурный профиль оплавления паяльных паст

Порядок выполнения работы

1. Включить дисплей и Raspberry PI, используя сетевые шнуры.
2. Запустить сервер из консоли – откроется терминал . Ввести команды – `cd picoReflow – Enter`, далее – `./picoreflowd.py`. Открыть браузер и ввести адрес `0,0,0,0:8081t` (рис. 5.6).
3. Настроить термопрофили бессвинцового и свинцовосодержащего припоя. В открывшемся окне добавить профиль, нажав кнопку «+». В окне Profile Name назвать свой первый термопрофиль. Добавить точки термопрофиля при помощи кнопки «+» и развернуть меню, щелкнув на значке списка в соответствии с заданным вариантом (рис. 5.7). Сохранить термопрофили.

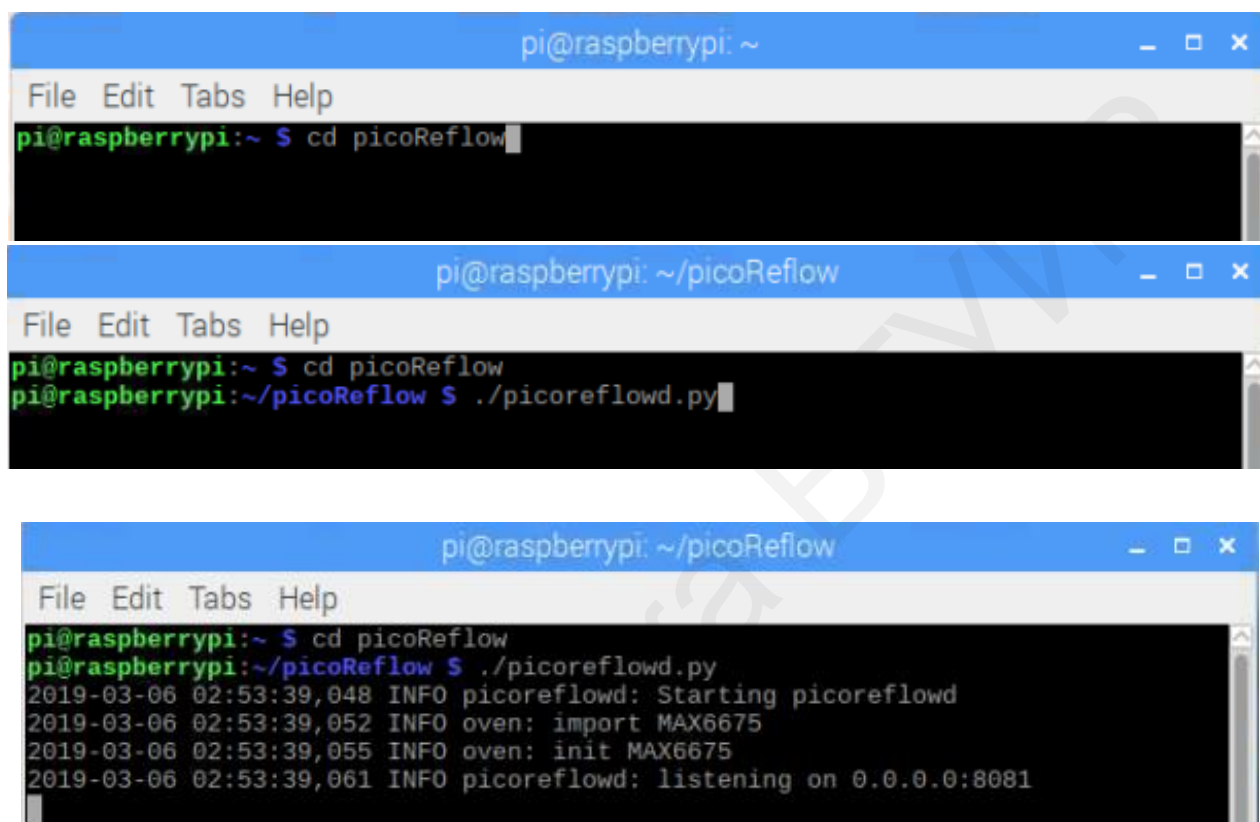


Рис. 5.6. Скриншоты настройки Raspberry PI

4. При настройке в ручном режиме нажать кнопку Start и, изменяя напряжение на ЛАТР, установить температуру в зоне ИК-нагрева, как на эталонном термопрофиле.

5. После выполнения задания необходимо сохранить оба термопрофиля и добавить их в отчет. Чтобы создать скриншот термопрофиля, достаточно нажать кнопку PrtSc и сохраниться в корне /home/pi. Подключить флеш-карту к Raspberry и сохранить термопрофили (рис. 5.8).

6. Рассчитать среднюю скорость нагрева на каждом участке термопрофиля, время до расплавления припоя и суммарное время пайки. Оценить точность поддержания температуры в заданных точках термопрофиля и в целом по всему термопрофилю.



Рис. 5.7. Настройка термопрофилей оплавления паяльной пасты

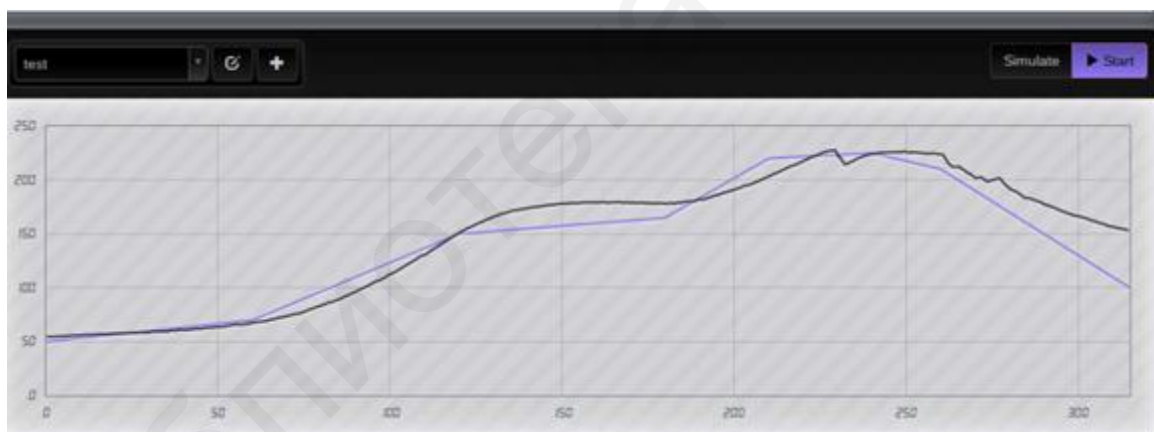


Рис. 5.8. Эталонный и экспериментальный термопрофили оплавления пасты

Содержание отчета

1. Компоновочная схема и общий вид Raspberry Pi.
2. Схема управления термопрофилем оплавления паяльной пасты.
3. Таблицы экспериментальных данных и термопрофили по результатам экспериментов.
4. Расчет скорости нагрева на отдельных участках термопрофиля, времени пайки и точности поддержания температуры.
5. Анализ результатов эксперимента.
6. Выводы.

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите состав микрокомпьютера Raspberry Pi и его возможности.
2. Приведите характеристики источников нагрева для оплавления паяльной пасты.
3. Опишите схему микропроцессорного управления термопрофилем ИК-нагрева.
4. Назовите характерные зоны термопрофиля оплавления пасты и дайте оценку точности поддержания температуры.
5. Назовите типичные ошибки при отслеживании заданного термопрофиля нагрева.

Библиотека БГУИР

Литература

1. Фрайке, Й. 3D-MID. Материалы технологии, свойства / Й. Фрайке ; под ред. И. А. Волкова ; пер. с англ. – СПб. : ЦОП «Профессия», 2014. – 336 с.
2. Кондрашин, А. А. Современные технологии изготовления трехмерных электронных устройств / А. А. Кондрашин, А. Н. Лямин, В. В. Слепцов. – М. : ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 210 с.
3. Тебеньков, В. Н. Исследование системы лазерной модификации материалов в технологии 3D MID / В. Н. Тебеньков. – СПб. : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – 76 с.
4. Смелов, В. Г. Исследование точности печати на 3D принтере : метод. указания к лабораторной работе / В. Г. Смелов, Р. А. Вдовин. – Самара : Изд-во Самарского ун-та, 2017. – 50 с.
5. Вейко, В. П. Сборник задач по лазерным технологиям / В. П. Вейко, Е. А. Шахно. 3-е изд., испр. и доп. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2007. – 67 с.
6. Соколова, Т. Н. Лазерная размерная обработка материалов, применяемых в электронной технике / Т. Н. Соколова, Л. А. Сурменко. – М. : ЦНИИ Электроника, 1988. – 71 с.
7. Ланин, В. Л. Лазерное формирование отверстий в кремниевых подложках 3D электронных модулей / В. Л. Ланин, С. Волк, А. Первенецкий // Технологии в электронной промышленности. – 2019. – № 2. – С. 65–67.
8. Технология поверхностного монтажа : учеб. пособие / С. П. Кундас [и др.]. – Минск : Армита – Маркетинг, Менеджмент, 2000. – 350 с.
9. Медведев, А. М. Сборка и монтаж электронных устройств / А. М. Медведев. – М. : ТЕХНОСФЕРА, 2007. – 256 с.
10. ГОСТ Р 56427-2015. Пайка электронных модулей радиоэлектронных средств. Автоматизированный смешанный и поверхностный монтаж с применением бессвинцовой и традиционной технологий. Технические требования к выполнению технологических операций. – М. : Стандартинформ, 2015. – 31 с.
11. Ланин, В. Л. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники / В. Л. Ланин, А. П. Достанко, Е. В. Телеш. – Минск : Изд. центр БГУ, 2007. – 574 с.
12. Ланин, В. Л. Температурно-временные профили пайки электронных модулей / В. Л. Ланин, И. И. Сергачев // Технологии в электронной промышленности. – 2012. – № 4. – С. 34–38.

Учебное издание

Ланин Владимир Леонидович
Самуйлов Иван Владимирович

**АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ИННОВАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

ПОСОБИЕ

Редактор М. А. Зайцева

Корректор Е. Н. Батурчик

Компьютерная правка, оригинал-макет О. И. Толкач

Подписано в печать 31.08.2021. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс». Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,5. Тираж 30 экз. Заказ 61.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014, №2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014. Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск