

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-48-57>



УДК 620.1.08

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

LPKF-LDS-технология производства трехмерных схем на пластиках

В.С. Иванов[@],
Д.А. Гладкий,
Д.С. Воруничев

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: Ivanovmirea1@yandex.ru

Рассмотрена перспективная технология производства трехмерных схем на пластиках, преимуществами которой являются расположение элементов под углом, точное позиционирование компонентов, корпусирование кристалла. Описаны сферы ее текущего применения и перспективы дальнейшего развития в радиоэлектронной отрасли. Проведен анализ возможностей и ограничений. Показано, что ключевым компонентом технологии является правильный выбор термопласта с подходящими характеристиками применительно к объекту назначения с учетом стойкости к внешним воздействующим факторам. Проведен анализ международной и отечественной нормативной базы по термопластам, позволивший определить ключевые характеристики для 3D-MID-технологии и проводить сравнение механических, тепловых и других свойств. Предложена классификация термопластов по ключевым характеристикам для принятия решения при выборе материалов с учетом применения в радиоэлектронной отрасли с использованием технологии 3D-MID, которая в настоящий момент либо отсутствует, либо представлена не в полном объеме. Исследованы методы испытания материалов, такие как измерение твердости по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу, для применения в технологии производства трехмерных схем на пластиках и обеспечения качества изготовления радиотехнических изделий, позволяющие подтвердить соответствие ключевых параметров материалов. Рассмотрен порядок построения технологического процесса с применением одной из самых распространенных технологий – LPKF-LDS-технологии производства трехмерных схем на пластиках. Технология LPKF-LDS в составе линии 3D-MID планируется к использованию в новой лаборатории «Трехмерные схемы на пластиках и гибких носителях» на кафедре конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем МИРЭА – Российского технологического университета.

Ключевые слова: 3D-MID, MID-изделия, прямое лазерное структурирование, технология «LPKF-LDS», трехмерные схемы на пластиках, термопласты, методы испытаний термопластов

Для цитирования: Иванов В.С., Гладкий Д.А., Воруничев Д.С. LPKF-LDS технология производства трехмерных схем на пластиках. *Российский технологический журнал*. 2021;9(1):48–57. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-48-57>

RESEARCH ARTICLE

LPKF-LDS technology for the production of three-dimensional schemes on plastics

Vyacheslav S. Ivanov[@],
Dmitry A. Gladky,
Dmitry S. Vorunichev

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author, e-mail: Ivanovmirea1@yandex.ru

A promising technology for the production of three-dimensional circuits on plastics, the scope of its current application and prospects for its further development in the radio-electronic industry are considered. The analysis of current opportunities and limitations is carried out. It is shown that the key component of the technology is the correct choice of thermoplastics with suitable characteristics for the intended object, taking into account the resistance to external factors. An analysis of the international and domestic regulatory framework for thermoplastics was conducted. This allowed to determine the key characteristics for 3D-MID-technology and to make a comparison. A classification is proposed on the basis of the key characteristics of thermoplastics for making a decision when choosing materials on the market, taking into account the application in the radio-electronic industry using 3D-MID technology, which is currently either absent or not fully represented. Methods of testing materials for use in the production technology of three-dimensional circuits on plastics and ensuring the quality of manufacturing of radio engineering products, allowing to confirm the compliance of key parameters of materials are studied. The article considers the order of the build process with the application of the LPKF-LDS technology production of three-dimensional circuits on plastics, which allows building a sequence of processes with particular implementation as an example. The considered LPKF-LDS technology as part of the 3D-MID line is planned in the new laboratory “Three-dimensional circuits on plastics and flexible media” at the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Engineering and Telecommunications Systems of MIREA – Russian Technological University.

Keywords: 3D-MID, MID-products, direct laser structuring, LPKF-LDS technology, three-dimensional schemes on plastics, thermoplastics, test methods for thermoplastics

For citation: Ivanov V.S., Vorunichev D.S., Gladky D.A. LPKF-LDS technology for the production of three-dimensional schemes on plastics. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(1):48–57 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-48-57>

Введение

MID-изделие (литое монтажное основание) представляет собой отлитую под давлением деталь из термопласта со структурированной схемой проводников. Свобода выбора геометрической формы MID-изделий говорит об их большом потенциале.

Уже сейчас MID-изделия встроены в мобильные телефоны в качестве антенн, в современные автомобили – в качестве всевозможных кнопок переключения на панели и руле автомобиля. Наручные электронные часы, выпускаемые мировыми лидерами по производству телефонов, радиочастотные метки, позволяющие считывать информацию о местонахождении

объекта, также имеют в своем корпусе MID-изделия. В таких отраслях, как медицина и безопасность, MID-изделия применяются в небольшом количестве, однако повышение теплоустойчивости MID-оснований и миниатюризация изделий говорит о том, что в этих и других новых отраслях MID-изделия будут применяться в больших количествах.

Детали, изготовленные по 3D-MID-технологии, уменьшают массогабаритные параметры изделия, а также упрощают его конструкцию. Несомненно, данная технология – это технология не только настоящего, но и будущего. Сейчас невозможно представить мобильный телефон или автомобиль без встроенного в него MID-изделия, хотя в начале XXI века такого практически не было. Объем продаж MID-изделий в начале нулевых был чуть больше 10 млн евро, сейчас же эта сумма перевалила за 200 млн евро в год. Это значит, что совсем скоро MID-изделия придут в те отрасли промышленности, в которых ранее их невозможно было представить.

Основой создания радиоэлектронного изделия с использованием 3D-MID-технологии и одновременно ключевым компонентом является термопласт. На сегодняшний день на мировом и отечественном рынках представлено большое количество термопластов с различными характеристиками и ценой. При этом отсутствует, либо представлена в неполном объеме классификация по основным характеристикам, по которым было бы возможно принимать решение о применимости данного термопласта для создания радиотехнических изделий различного назначения с использованием 3D-MID-технологии. Стоит отметить, что сама технология 3D-MID имеет различные вариации, позволяющие строить необходимые технологические процессы на основе поставленных задач и может быть применима как для бытовых изделий, где отсутствуют специальные требования по эксплуатации, так и при создании изделий с повышенными требованиями к условиям эксплуатации. Это еще более подчеркивает необходимость исследования и классификации термопластов в зависимости от класса решаемых задач.

Для обеспечения качества изготовления радиотехнических изделий на основе технологии производства трехмерных схем на пластиках не менее важной задачей является проведение необходимых испытаний материалов, например, на твердость. Для этого необходимо правильно выбрать метод и методику испытаний с применением испытательного оборудования и средств измерений. После выбора подходящего материала, позволяющего решить поставленные задачи по устойчивости к внешним воздействующим факторам, и проведения выбранной процедуры испытаний можно смоделировать технологический процесс изготовления изделия с

применением 3D-MID-технологии, соблюдая необходимую последовательность технологических операций.

Цель работы – исследование текущих возможностей технологии производства трехмерных схем на пластиках, анализ требований отечественных и международных стандартов, разработка оптимальных критериев выбора материала основания и методов его испытаний.

1. Классификация термопластов по характеристикам для 3D-MID

Многие страны мира производят различные марки полиамидов, экспортируют их и реализуют на внутреннем. Российские производители отправляют на экспорт 70% всего производства: около 37% поставляется в Китай, 16% – в Индию, 10% – в Турцию, 7% – в Германию. В связи с тем, что в России выпускают, как правило, полиамиды марок ПА6, ПА66, многие виды полиамидов закупают за границей, так как продукция из данных полимеров востребована и пользуется спросом. Проведем сравнительный обзор мировых производителей полиамида с анализом характеристик материала в соответствии с ГОСТ 10589-2016¹, принятым Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации.

Изучение рынка автомобильной промышленности показало [1], что широкое применение в данной отрасли получил полиамид ПА 610. По значению показателя текучести расплава и модуля упругости он превосходит практически все термопласты, а сочетание небольшого водопоглощения с хорошими прочностными свойствами и тепло-, морозостойкостью делает возможным использование ПА-610 в ответственных деталях антифрикционного назначения. Однако его применение ограничено высокой стоимостью. Из ПА-610 методом литья под давлением изготавливают вкладыши и втулки опорных тяг рулевой трапеции, ручки фиксаторов шарнира, вкладыши и рычаги управления коробкой передач, фильтр топливного насоса, зубчатые передачи, уплотнительные устройства, муфты, подшипники скольжения, лопасти винтов, стойкие к действию щелочей, масел, а также антифрикционные покрытия металлов и другие втулки и вкладыши.

Справочные показатели литьевого полиамида по ГОСТ 10589-2016 представлены в табл. 1.

¹ГОСТ 10589-2016 Полиамид 610 литьевой. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2017. 16 с. [GOST 10589-2016 Poliamid 610 lit'evoi. Tekhnicheskie usloviya (Polyamide 610 injection molding. Technical conditions). Moscow: Standardinform; 2017. 16 p. (in Russ.)].

Анализ международного рынка производства PA-610 показал, что одну из лидирующих позиций занимает французская компания Arkema. В табл. 2 приведена спецификация полиамида этой компании под названием «Rilsan Sesno F».

Сравнив характеристики данного полиамида с требованиями ГОСТ 10589-2016, можно прийти к выводу, что почти все они соответствуют ГОСТу, однако температура изгиба под нагрузкой 1.80 МПа составляет 60 °С, что на 5 °С меньше нормы по

Таблица 1. Показатели литьевого полиамида по ГОСТ 10589-2016

Наименование показателя	Норма	Метод испытания
Плотность, г/см	1.09–1.11	ГОСТ 15139
Сопротивление удару по Шарпи на образцах типа 2 без надреза	Не разрушается	ГОСТ 4647
Твердость при вдавлении шарика, МПа	100–150	ГОСТ 4670
Модуль упругости, МПа - при изгибе - при растяжении	1.6×10^3 – 1.7×10^3 1.5×10^3 – 1.7×10^3	ГОСТ 9550
Прочность при растяжении, МПа	50.0–60.0	ГОСТ 11262
Предел текучести при растяжении, МПа	70.0–90.0	Там же
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	100	Там же
Предел прочности при срезе, МПа	40–50	ГОСТ 17302
Удельное объемное сопротивление, Ом·см, не менее	$1-10^{14}$	ГОСТ 6433.2
Удельное поверхностное сопротивление (после пребывания в воде при температуре (20 ± 2) °С в течение 24 ч), Ом	5×10^{12} – 1×10^{13}	ГОСТ 6433.2
Диэлектрическая проницаемость при частоте 106 Гц	4–5	ГОСТ 22372
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 106 Гц, не более	0.06	Там же
Температура изгиба под нагрузкой, °С, не менее, при напряжении 1.80 МПа 0.45 МПа	65 160	ГОСТ 12021
Температура размягчения по Вика, °С	200–220	ГОСТ 15088
Теплостойкость по Мартенсу, °С	55–60	ГОСТ 21341
Коэффициент трения по стали	0.26–0.32	ГОСТ 11629
Средний коэффициент линейного теплового расширения в интервале температур от 20 до 200 °С, С-1	11.7×10^{-5}	ГОСТ 15173
Теплопроводность в интервале температур от 20 до 150 °С, Вт/м·К	0.20–0.19	ГОСТ 23630.2
Показатель текучести расплава при температуре 235 °С, нагрузке 21,19 Н, г/10 мин	4.0–7.0	ГОСТ 11645

Таблица 2. Спецификация PA-610 компании Arkema

Параметры	Сух./Влажн.	Единица измерения	Стандарт
Механические свойства			
Модуль упругости при растяжении	2000/–	МПа	ISO 527-1/-2
Ударная прочность по Шарпи, +23 °С	N/–	кДж/м ²	ISO 179/1eU
Ударная прочность по Шарпи, –30 °С	N/–	кДж/м ²	ISO 179/1eU
Ударная прочность по Шарпи с надрезом, +23 °С	8/–	кДж/м ²	ISO 179/1eA
Ударная прочность по Шарпи с надрезом, –30 °С	6/–	кДж/м ²	ISO 179/1eA
Тепловые свойства			
Температура плавления, 10 °С/min	222/*	°С	ISO 11357-1/-3
Температура изгиба под нагрузкой 1.80 МПа	60/*	°С	ISO 75-1/-2
Другие свойства			
Модуль упругости при растяжении	2000/–	МПа	ISO 527-1/-2
Плотность	1080/–	кг/м ³	ISO 1183

Примечание: N – разрушения не произошло; «–» – результат отсутствует; * – испытание неосуществимо

межгосударственному стандарту. Полиамид данной компании нашел широкое применение в автомобильной промышленности.

Одной из крупнейших компаний в мире по производству полиамида ПА-610 является компания DuPont (США). Этот полиамид может выдерживать высокие температурные нагрузки, а его специальные модификации, обладающие высокой ударной прочностью, представлены в табл. 3.

Анализ параметров из этой спецификации позволяет утверждать, что:

- значение плотности составляет 1080 кг/м³ при диапазоне 1090–1100 кг/м³, указанном в стандарте;
- температура изгиба под нагрузкой 1.80 МПа составляет 54 °С, что на 11 °С меньше, чем в стандарте.

Остальные характеристики лежат в допустимых пределах.

При растяжении и увеличении температуры модуль упругости снижается (рис. 1).

Данный полиамид обладает отличной текучестью, коротким циклом литья, изделия из него легко извлекаются из пресс-формы. Основное применение он нашел в автомобильной промышленности.

Аналитический обзор рынка производителей полиамида в Европе показал, что компания Solvay engineering plastics (Бельгия) является одной из крупнейших на континенте и одной из самых перспективных. Свойства полиамида данной компании, обладающего высокой ударопрочностью при низкой температуре, приведены в табл. 4. Он предназначен для автомобильной промышленности, где необходимо долгосрочное высокотемпературное использование.

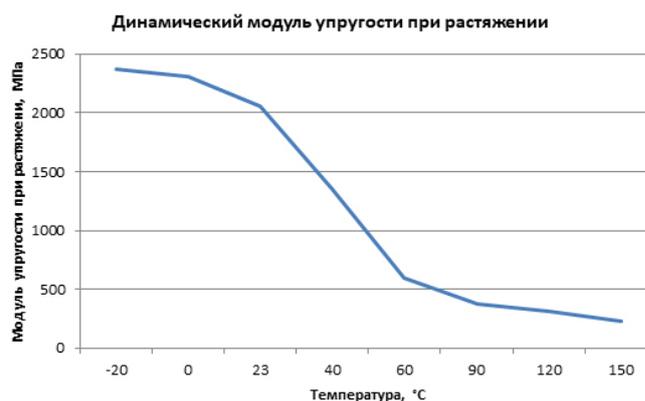


Рис. 1. Динамический модуль упругости ПА-610 при увеличении температуры.

Анализ параметров из этой спецификации позволяет утверждать, что:

- водопоглощение при насыщении составляет 3.1% при норме 3.3%;
- значение плотности составляет 1050 кг/м³ при диапазоне 1090–1100 кг/м³, указанном в стандарте;

На основе проведенного анализа полиамида, входящего в состав продукции трех мировых компаний по производству полиамида можно прийти к выводу, что производители соблюдают не все технические требования, однако их продукция имеет широкий спрос на рынке в промышленности. Такие важные показатели, как температура плавления, соблюдены в соответствии со стандартом, и это значит, что использование материалов допустимо при высоких температурах.

Таблица 3. Спецификация PA-610 компании DuPont

Параметры	Сух./Влажн.	Единица измерения	Стандарт
Реологические свойства			
Усадка при литье, продольная	1.2/*	%	ISO 294-4, 2577
Усадка при литье, поперечная	1.2/*	%	ISO 294-4, 2577
Механические свойства			
Модуль упругости при растяжении	2300/1200	МПа	ISO 527-1/-2
Ударная прочность по Шарпи, +23 °С	N/–	кДж/м ²	ISO 179/1eU
Ударная прочность по Шарпи с надрезом, +23 °С	5.6/–	кДж/м ²	ISO 179/1eA
Тепловые свойства			
Температура плавления, 10 °С/min	225/*	°С	ISO 11357-1/-3
Температура изгиба под нагрузкой 1.80 МПа	54/*	°С	ISO 75-1/-2
Температура изгиба под нагрузкой 0.45 МПа	151/*	°С	ISO 75-1/-2
Другие свойства			
Водопоглощение	3.3/*	%	Сим. по ISO 62
Поглощение влаги	1.4/*	%	Сим. по ISO 62
Плотность	1080/–	кг/м ³	ISO 1183
Специфические свойства материала			
Показатель вязкости	170/*	см ³ /г	ISO 307, 1157, 1628

Примечание: N – разрушения не произошло; «–» – результат отсутствует; * – испытание неосуществимо

Таблица 4. Спецификация PA-610 компании Solvay engineering plastics

Параметры	Сух./Влажн.	Единица измерения	Стандарт
Реологические свойства			
Усадка при литье, продольная	2.4/ *	%	ISO 294-4, 2577
Усадка при литье, поперечная	2.3/ *	%	ISO 294-4, 2577
Механические свойства			
Модуль упругости при растяжении	890/830	МПа	ISO 527-1 /-2
Напряжение при 50% удлинении	50/41	МПа	ISO 527-1/-2
Удлинение в точке разрыва	>50/>50	%	ISO 527-1/-2
Ударная прочность по Шарпи, +23 °С	N/N	кДж/м ²	ISO 179/1eU
Ударная прочность по Шарпи, -30 °С	N/N	кДж/м ²	ISO 179/1eU
Ударная прочность по Шарпи с надрезом, +23 °С	25/55	кДж/м ²	ISO 179/1eA
Ударная прочность по Шарпи с надрезом, -30 °С	4/3.5	кДж/м ²	ISO 179 /1eA
Тепловые свойства			
Температура плавления, 10 °С/min	215/ *	°С	ISO 11357-1 / -3
Толщина испытываемого образца	1.6/ *	мм	IEC 60695-11-10
Другие свойства			
Водопоглощение	3.1/ *	%	Сим. по ISO 62
Поглощение влаги	0.5/ *	%	Сим. по ISO 62
Плотность	1050/—	кг/м ³	ISO 1183

Примечание: N – разрушения не произошло; «—» – результат отсутствует; * – испытание неосуществимо

2. Методы испытаний термопластов

Ключевой компонент в технологиях 3D-MID – пластик, на который наносится металлическое покрытие. При выборе пластика для изготовления основания изделия 3D-MID необходимо руководствоваться важными для этой технологии требованиями. В первую очередь, это возможность металлизации и пайки.

Пирамида пластмасс представляет собой широко распространенный способ графического представления различий между тремя основными подгруппами термопластичных материалов (рис. 2):

- стандартные термопласты;
- промышленные термопласты (конструкционные);
- высококачественные пластмассы (суперконструкционные).

Основным условием выбора полимера является то, чтобы добавка, содержащая оксид металла, была равномерно распределена и достаточно сконцентрирована в термопласте. В настоящее время почти все ведущие производители предлагают LDS версии своих термопластов. Выбрать можно из аморфных и частично кристаллических полимеров от стандартной до высокой температуры термопласта. К ним относятся многочисленные типы материалов, которые могут быть использованы для бессвинцовой пайки [2].

Рассмотрим несколько примеров материалов.

Росан – термопластичный полиэфир на основе полибутилентерефталата (PBT) и полиэтилентереф-

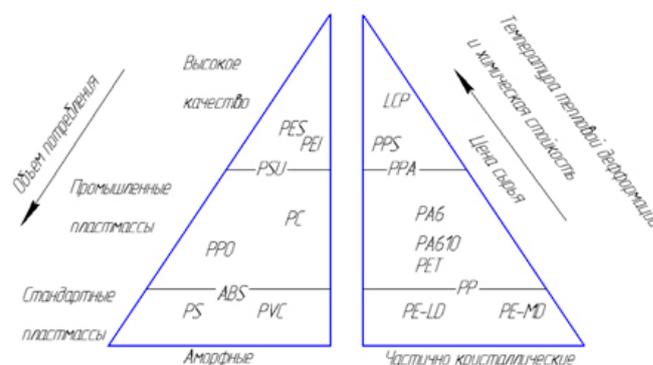


Рис. 2. Пирамида пластмасс.

талата (PET), разработанный компанией Lanxess (Германия). Он обладает высокой устойчивостью к тепловым изменениям, а также хорошей прочностью и твердостью. Кроме того, он имеет высокую абразивную стойкость, надежную химическую стойкость, хорошие электроизоляционные и диэлектрические свойства.

РА6 является частично ароматическим полиамидом на основе материала Utramid от компании BASF AG (Германия). Материал отличается высокой устойчивостью к тепловым искажениям и хорошими механическими свойствами. Кратковременная термостойкость может быть увеличена до 400 °С с помощью сшиваемого варианта этого материала.

LCP (жидкокристаллический полимер) на основе материала Vestra от компании Ticona GmbH (Германия) обладает низкой вязкостью расплава и очень высокой устойчивостью к тепловым искажениям.

PS/ABS (поликарбонат/акрилонитрил/бутадиен/стирол) от компании DSM (Нидерланды) также имеет очень хорошие поверхностные и механические свойства [2]. Изначально пластмассы LDS были черного цвета из-за цвета черных добавок LDS. Теперь это ограничение снято, пластмассовые подразделения компаний SABIC (Саудовская Аравия) и Mitsubishi Engineering Plastics (MEP) (Япония) недавно представили LDS-материалы, которые можно адаптировать практически под любой цвет, который необходим заказчику [3].

Методы определения твердости полиамидов

Широко известным и используемым является испытание твердости по Бринеллю, заключающееся во вдавливании с усилием P , стального шарика диаметром D в поверхность изделия в течение некоторого времени (рис. 3). В результате этого на поверхности остается отпечаток определенного диаметра d [2].

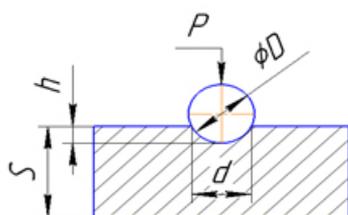


Рис. 3. Схема измерения твердости по Бринеллю.

Твердость определяется делением приложенной к шарикам нагрузки на площадь отпечатка:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \tag{1}$$

Измерение твердости по методу Роквелла заключается во вдавливании алмазного конуса в испытуемый материал под действием двух сил: предварительной P_0 равной 10 кгс, и основной P_1 равной 90 кгс (рис. 4). Общая нагрузка на конус в момент нагружения равна $P = P_0 + P_1$.

После снятия основной нагрузки твердость рассчитывают по глубине отпечатка $h - h_0$ (разность глу-

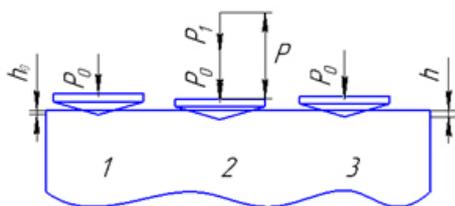


Рис. 4. Схема измерения твердости по Роквеллу.

бин внедрения конуса после снятия основной нагрузки и до ее приложения):

$$HR = 100 - \frac{h - h_0}{0.002} \tag{2}$$

Измерение твердости по Виккерсу происходит с помощью алмаза в форме пирамиды с квадратным основанием. Его вдавливают в поверхность с испытательной нагрузкой $F = 100, 300$ или 600 Н в течение 40 сек (рис. 5).

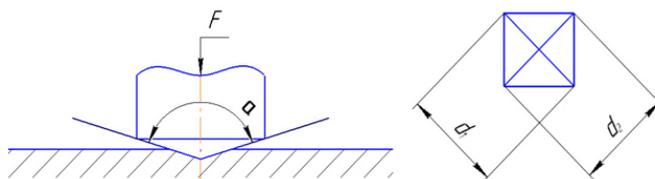


Рис. 5. Схема измерения твердости по Виккерсу.

После снятия нагрузки измеряется длина диагонали отпечатка и рассчитывается число твердости по Виккерсу:

$$HV = (0.189/d_1^2)F \tag{3}$$

3. Технологический процесс LPKF-LDS

LPKF-LDS – перспективный метод создания электронных схем на трехмерных литых пластмассовых деталях разработанный компанией LPKF Laser & Electronics AG (Германия). Процесс получения такой схемы, особенно на трехмерных деталях, значительно проще, чем при использовании стандартной технологии. При этом отпадает необходимость в использовании предварительной химической обработки поверхности (например, травления), что повышает экологические аспекты технологии производства.

Данный процесс состоит из четырех последовательных этапов:

- литье под давлением;
- лазерное структурирование;
- металлизация;
- отделка поверхности.

Виды пластмасс, представленные в предыдущей главе, полностью подходят для использования методом литья под давлением. Прямое лазерное структурирование основано на удалении вещества с поверхности пластика лазерным импульсом и одновременно активации добавки, необходимой для металлизации (рис. 6). Поверхность пластика становится шероховатой, что обеспечивает надежное сцепление между пластмассой и металлирующим слоем.

Следующей стадией является процесс металлизации. Металлизация происходит в химических стаканах вместимостью 5 литров. Сначала образец пластмассу подвергают тщательной очистке в ультразвуковой ванне (рис. 7).

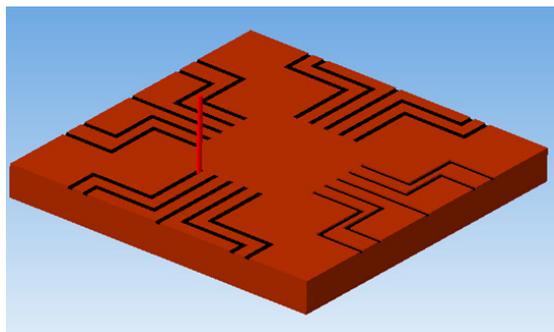


Рис. 6. Лазерное структурирование.

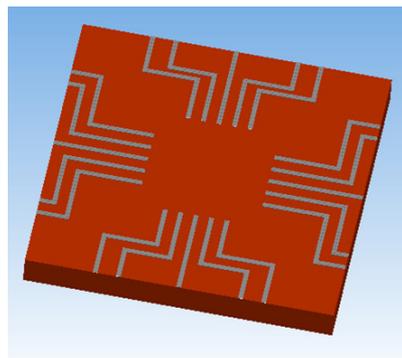


Рис. 9. Никелевая металлизация.

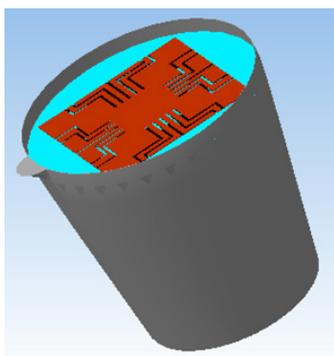


Рис. 7. Очистка пластмассы в ультразвуковой ванне.

После очистки пластмассу погружают в медную ванну (рис. 8). Время выдерживания зависит от активности медной ванны и необходимой толщины меднения. Структурированные лазером участки поверхности меняют черный цвет на цвет меди.

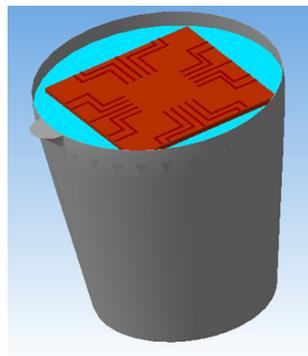


Рис. 8. Меднение пластмассы.

Затем образец погружается в травильный раствор и подвергается затравке в палладиевой ванне, после чего наступает стадия никелевой металлизации (рис. 9).

Завершается процесс металлизации нанесением очень тонкого слоя золотого покрытия (рис. 10). Между всеми стадиями необходима тщательная промывка деионизированной водой.

Завершающим этапом процесса LPKF-LDS является монтаж компонентов. Монтаж на контактные поверхности основания происходит с помощью паяльной пасты или электропроводящего клея (рис. 11).

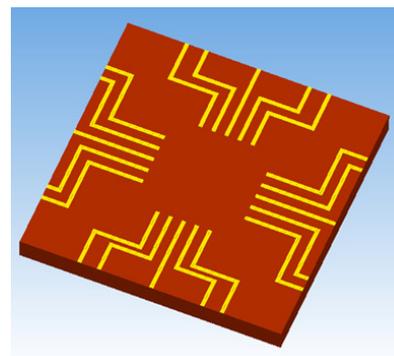


Рис. 10. Нанесение тонкого слоя золотого покрытия.

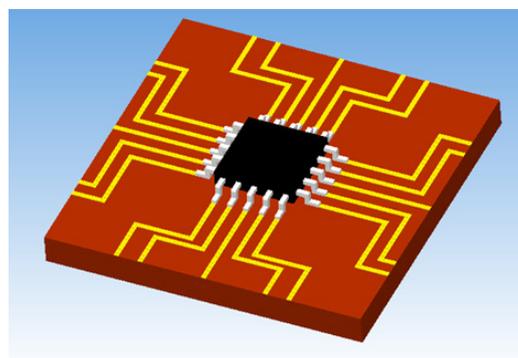


Рис. 11. Монтаж компонентов на основание.

После установки компонентов необходимо провести их выравнивание с тем, чтобы сориентировать нормаль компонента под прямым углом к рабочей поверхности основания. Неровное соединение может привести к вытеканию некоторого количества пасты и к некачественному спаю (рис. 12) [4].

3D-MID-изделия, полученные по данной технологии, находят широкое применение в устройствах связи, в первую очередь – в мобильных телефонах, и в автомобильной промышленности (рис. 13) [5, 6]. В настоящий момент на кафедре конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем МИРЭА – Российского технологического университета создается лаборатория «Трехмерные схемы на пластиках и гибких носителях», которая будет осна-

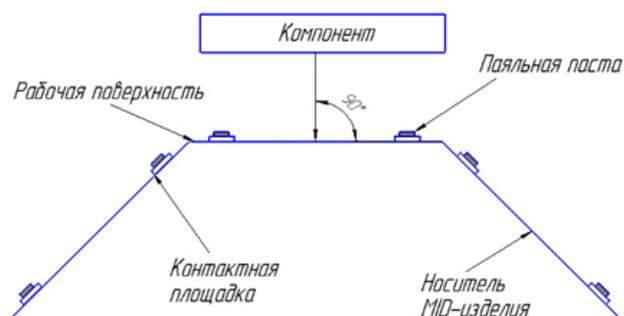


Рис. 12. Монтаж электронных компонентов на рабочую поверхность.

шена линией 3D-MID для использования в учебном процессе и для проведения исследований технологии и ее оптимизации.

Заключение

Авторами был проведен анализ современного состояния и перспектив развития технологии производства трехмерных схем на пластиках [7–10]. В результате проведенного анализа литературных данных были определены необходимые ключевые характеристики базового материала для использования в технологии 3D-MID. Сравнение характеристик проводилось с учетом требований, которые предъявляются современной международной и отечествен-

Литература

1. Франке. Й. 3D-MID. Материалы, технологии, свойства: пер. с англ. яз.; под ред. И.А. Волкова. СПб.: ЦОП «Профессия», 2014. 336 с. ISBN: 978-5-91884-062-7
2. Волков И.А. Технология 3D-MID. Новые возможности прототипирования изделий. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2013;3(125):170–175.
3. Франке Й. 3D-MID сегодня и завтра. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2014;7:125–129.
4. Симидоцкий А.Е., Лицин К.В. 3D MID технология производства трехмерных схем на пластиках. *Наука и производство Урала*. 2016;12:52–54.
5. Шейкин М. Первая Российская конференция 3D-MID. Обзор основных тем. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2013;8:138–147.
6. Группа компаний Остек [электронный ресурс]. URL: <https://ostec-group.ru/>
7. Xu Y., Wu X., Guo X., Kong B., Zhang M., Qian X., Mi S., Sun W. The Boom in 3D-Printed Sensor Technology. *Sensors*. 2017;17(5):1166. <https://doi.org/10.3390/s17051166>
8. Hirt E., Ruzicka K. 3D-MID for Space. In: 2018 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC). 2018. <https://doi.org/10.1109/ESTC.2018.8546449>



Рис. 13. 3D-MID-изделия в автомобильной промышленности и устройствах связи [6].

ной нормативной базой. Определены ключевые характеристики, которые могут быть рекомендованы и учтены при принятии решения по выбору конкретного материала. Проведен анализ существующих методов испытания базового материала, необходимых для обеспечения качества производства, показан типовой технологический процесс на примере LPKF-LDS-технологии.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work. The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Franke Y. 3D-MID. *Materialy, tekhnologii, svoystva*: per. s angl. yaz.; pod red. I.A. Volkova (3D-MID. Materials, technologies, properties: trans. from Engl.; (Ed.) I.A. Volkov. Sankt Peterburg: Professiya; 2014. 336 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-91884-062-7
2. Volkov I.A. 3D-MID Technology. New Products Prototyping Capabilities. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2013;3(125):170–175 (in Russ.).
3. Franke J. 3D-MID Today and Tomorrow. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2014;7:125–129 (in Russ.).
4. Simidotskii A.E., Litsin K.V. 3D MID technology of three-dimensional circuits on plastics. *Nauka i proizvodstvo Urala = Science and Production of the Urals*. 2016;12:52–54 (in Russ.).
5. Sheikin M. The First Russian 3D-MID Conference. Main Topics Review. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2013;8:138–147 (in Russ.).
6. Ostec Corporate Group. URL: <https://ostec-group.ru/>
7. Xu Y., Wu X., Guo X., Kong B., Zhang M., Qian X., Mi S., Sun W. The Boom in 3D-Printed Sensor Technology. *Sensors*. 2017;17(5):1166. <https://doi.org/10.3390/s17051166>

9. LPKF LDS: Laser Direct Structuring for 3D Moulded Interconnect Devices, Feb 2019.

URL: <https://www.lpkf.com/en/industries-technologies/electronics-manufacturing/3D-MIDs-with-laser-direct-structuring-lds/>

10. Kamotesov S., Lombard P., Sernet V., Allard B. et al. Omnidirectional inductive wire-less charging of a 3D receiver cube inside a box. In: Proc. 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). 2018.

<https://doi.org/10.1109/WPT.2018.8639240>

8. Hirt E., Ruzicka K. 3D-MID for Space. In: 2018 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC). 2018.

<https://doi.org/10.1109/ESTC.2018.8546449>

9. LPKF LDS: Laser Direct Structuring for 3D Moulded Interconnect Devices, Feb 2019.

URL: <https://www.lpkf.com/en/industries-technologies/electronics-manufacturing/3D-MIDs-with-laser-direct-structuring-lds/>

10. Kamotesov S., Lombard P., Sernet V., Allard B. et al. Omnidirectional inductive wire-less charging of a 3D receiver cube inside a box. In: Proc. 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). 2018.

<https://doi.org/10.1109/WPT.2018.8639240>

Об авторах:

Иванов Вячеслав Сергеевич, ассистент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: Ivanovmirea1@yandex.ru.

Гладкий Дмитрий Александрович, ассистент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Воруничев Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Vyacheslav S. Ivanov, Assistant, Department of Design and Production of Radio-Electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: Ivanovmirea1@yandex.ru.

Dmitry A. Gladky, Assistant, Department of Design and Production of Radio-Electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia).

Dmitry S. Vorunichev, Senior Lecturer, Department of Design and Production of Radio-Electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia).

Поступила: 19.06.2020; получена после рецензирования: 13.08.2020; принята к опубликованию: 25.09.2020.