



# 4D-ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

## 4D-TECHNOLOGIES FOR PRODUCTION OF THREE-DIMENSIONAL INTEGRATED CIRCUITS

УДК 621.382.2/.3

А.Кондрашин\*, А.Лямин\*, В.Слепцов\* / [condrashin@rambler.ru](mailto:condrashin@rambler.ru)

A.Kondrashin\*, A.Lyamin\*, V.Sleptsov

Произведен анализ возможностей современных 3D MID-технологий (Three Dimensional Molded Interconnected Devices) для производства трехмерных электронных средств (ТЭУ). Определены основные сравнительные характеристики, достоинства и недостатки данных технологий. Предложена новая классификация 3D MID-технологии по дискретизации получения структур и номенклатуры используемых материалов. Доработана классификация объектов ТЭУ. Введено понятие квази-4D и 4D-объектов первого, второго и третьего поколений. Определены ближайшие и долгосрочные перспективы развития 3D MID-технологий. Создана дорожная карта этапов развития современных физических методов формирования ТЭУ.

The analysis of opportunities of modern 3D MID technologies (Three Dimensional Molded Interconnected Devices) for production of three-dimensional electronic devices (TEU) is done. The main comparative characteristics, merits and demerits of these technologies are defined. New classification of 3D MID technology for sampling of structures and the nomenclature of the materials are proposed. Classification of TEU is improved. The concept of quasi-4D and 4D objects of the first, second and third generations is introduced. The near-term and long-term outlook of development of 3D MID technologies is proposed. The road map of development of modern physical methods for TEU manufacturing is created.

**Н**а современном этапе микроминиатюризации электронных устройств возникла насущная необходимость использования любой внутренней "свободной" поверхности изделия электронной техники не только в качестве пассивного конструкционного элемента, но и в качестве материала, способного нести функциональную "нагрузку" (нанесение контактных площадок, проводников, монтаж активных элементов и т.д.), то есть в качестве подложки для формирования интегрально-объемной печатной платы – трехмерных электронных устройств (ТЭУ).

Традиционно в производстве ТЭУ различают два типа сложных объемных объектов:

- квазиобъемные фигуры, создаваемые из отдельных 2D-модулей на базе жестких или гибких подложек методами трафаретной печати,

горячего тиснения, термотрансферного переноса и т.д. [1];

- жесткие объемные (3D) фигуры, которые делятся на два рода: создаваемые на базе жестких подложек традиционными промышленными методами (литье, штамповка) и формируемые послойно при помощи 3D-принтеров [2-6].

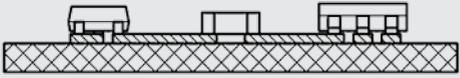
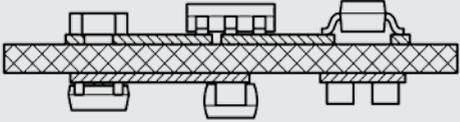
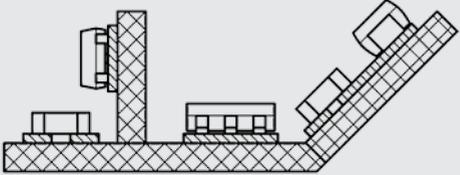
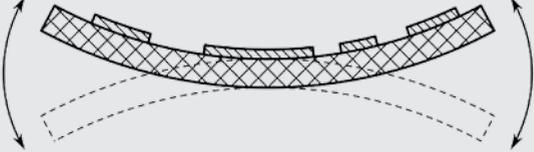
Все указанные типы традиционных 2D- (квази-3D) и 3D-технологий по созданию трехмерных электронных устройств (табл.1) обладают общим не устранимым недостатком – отсутствием возможности формирования многослойных сложных 3D-объектов с использованием в качестве функциональных элементов всех граней, ребер и стенок.

В связи с этим в настоящее время начали развиваться технологии формирования 4D-объектов

\* Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) / Moscow Aviation Institute (National Research University).



Таблица 1. Классификация технологий изготовления 3D-объектов ТЭУ [7]  
 Table 1. Classification of manufacturing processes for 3D TEU [7]

Размерность Dimension	Расположение поверхностей и способ монтажа компонентов Location of the surfaces and assembly manner of the components	Схема монтажа компонентов Assembly diagram
2D	Плоская поверхность; компоненты на одной стороне Flat surface; components on one side	
	Плоские поверхности; компоненты на обеих сторонах Flat surfaces; components on both sides	
Квази-3D Quasi-3D	Плоские поверхности, располагающиеся под углом друг относительно друга Flat surfaces located at an angle relative to each other	
	Гибкие печатные платы (печатная электроника) Flexible circuit boards (printed electronics)	
3D	Поверхности свободной формы без компонентов (3D-печать) Free-form surfaces without components (3D printing)	

**A**t the present stage of microminiaturization of electronic devices there is an urgent need to use any "free" surface of the product of electronic technology not only as a passive structural element but also as a material with certain functions (applying the electrode pads, conductors, installation of active elements, etc.), that is as the substrate for the 3D printed circuit board – a three-dimensional electronic devices (TEU).

Traditionally, there are two types of complex three-dimensional objects in the production of TEU:

- quasi-three-dimensional shapes created from individual 2D modules based on rigid or flexible substrates with use of screen printing, hot stamping, thermal transfer etc. [1];
- rigid three-dimensional (3D) shapes that are divided into two kinds: created on the basis of rigid substrates

with use of traditional industrial methods (casting, stamping) and formed layer by layer using 3D printers [2-6].

All of these types of traditional 2D (quasi-3D) and the 3D technology for creation of three-dimensional electronic devices (table.1) have the general disadvantage, which is the inability to obtain multi-layer complex 3D objects with use of all faces, edges and walls as functional elements.

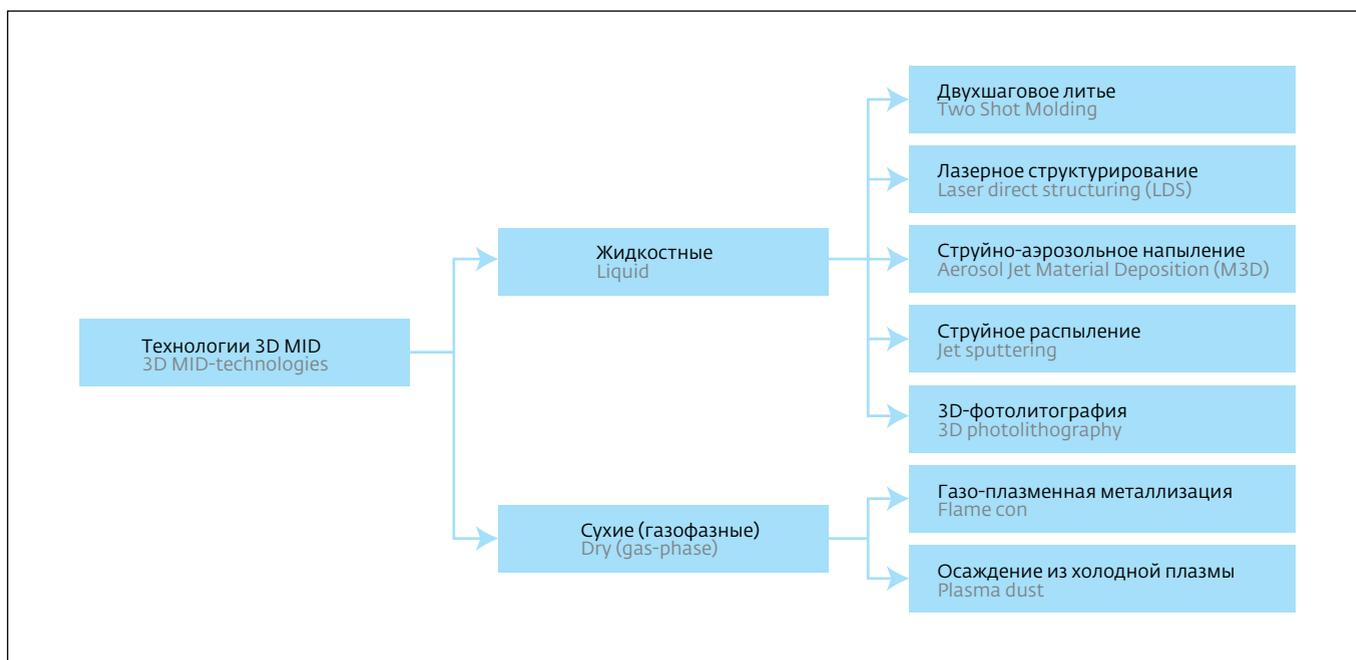


Рис.1. Классификация S-3D MID-технологий

Fig.1. Classification of S-3D MID-technologies

ТЭУ, позволяющих "in situ" (в процессе) формирования детали "выращивать" функциональные многослойные несущие конструкции. При этом снаружи и внутри любого "свободного" объема детали могут быть размещены слои или линии коммутирующих и микросистемных элементов. В настоящее время имеющиеся технологические возможности не позволяют изготавливать ориги-

нальные 4D-объекты ТЭУ в едином производственном цикле.

Первым шагом при разработке технологий получения полноценных 4D-объектов ТЭУ стало создание квази-4D-объектов. Соответствующая группа технологий получила название 3D MID (Molded Interconnected Devices) или технологий изготовления трехмерных схем на базе литого монтажного

In this regard, technologies of creation of 4D TEU, which allows to "grow" functional multilayer structures in the process of forming of parts, are developed. Layers or ranges of switching and microelectronic elements can be placed outside and inside of any "free" volume of these parts. The existing technological capabilities do not allow to produce the original 4D TEU in a single production cycle.

The first step in the development of technologies for production of a full-fledged

4D TEU was the creation of a quasi 4D-objects. Corresponding group of technologies is called 3D-MID (Molded Interconnected Devices) or technologies for the manufacture of 3D IC on molded base [8-10]. Since there is no strict classification of 3D MID, from our point of view, it is reasonable to arrange these technologies in order of the discretization of the structures (table.2):

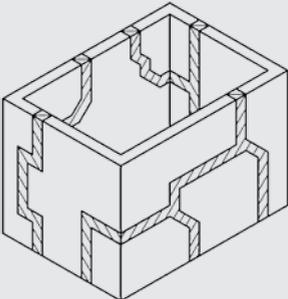
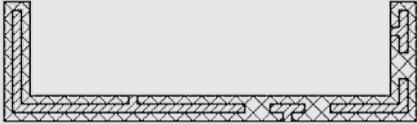
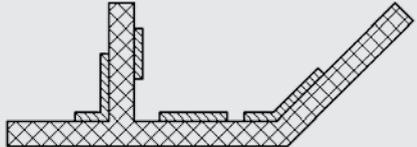
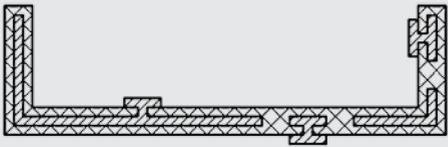
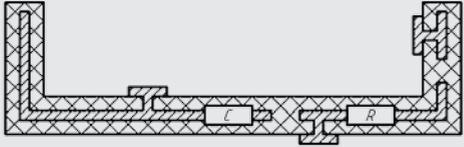
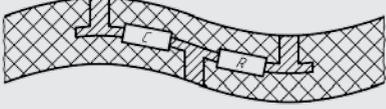
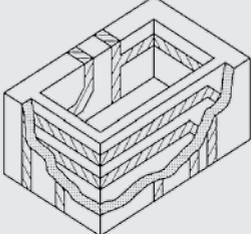
- single-level technologies:
  - V 3D MID (V – volume) or molding technologies (insert molding);

- S-3D MID (S – surface) or surface treatment technologies;
- hybrid (multi-level) 1G 3D MID technologies, where 1G is the generation of miniaturization.

In turn, the surface S-3D MID-technologies (Fig.1) can be classified into: liquid (LS-3D MID) and dry (DS-3D MID) or gas-phase. The first group includes the following technologies:

- 2S-technologie (two step or two shot molding);
- laser direct structuring, LDS;

Таблица 2. Классификация технологий изготовления 4D-объектов ТЭУ  
 Table 2. Classification of manufacturing processes for 4D TEU

<p>Квази-4D-объекты (миллиметровый диапазон ТЭУ) Quasi-4D objects (millimeter range of TEU)</p> 	Одноуровневые Single-level	Сплавные технологии (V-3D MID)	
		Технологии обработки поверхности (S-3D MID)	
	Многоуровневые Multi-level	Гибридные технологии (1G 3D MID)	
		Гибридные технологии (2G 3D MID)	
		Гибридные технологии (3G 3D MID)	
	<p>4D-объекты (микрометровый диапазон ТЭУ) 4D objects (micrometer range of TEU)</p> 	<p>Выращивание многоуровневых ТЭУ свободной формы в едином технологическом цикле                  Growing of multi-level free-form TEU in a single technological cycle</p>	



основания [8-10]. В литературе отсутствует строгая классификация 3D MID-технологий, поэтому, с нашей точки зрения, их целесообразно разделить по дискретизации получения структур (табл.2):

- одноуровневые технологии;
  - V-3D MID (V – volume) или сплавные технологии (литье со вставкой);
  - S-3D MID (S – surface) или технологии обработки поверхности;
- гибридные (многоуровневые) технологии 1G 3D MID, где 1G – поколение миниатюризации. В свою очередь, поверхностные S-3D MID-технологии (рис.1) можно разделить на жидкостные (LS-3D MID) и сухие (DS-3D MID) или газофазные. К жидкостным относятся:
  - двухшаговая заливка или 2S-технология (Two Step или Two Shot Molding);
  - лазерное структурирование (Laser direct structuring, LDS);
  - струйно-аэрозольное напыление (Aerosol Jet или Maskless, Mesoscale, Material Deposition – M3D);
  - струйное распыление;
  - 3D-фотолитография.

К сухим (газофазным) технологиям можно отнести газо-плазменную металлизацию (Flame con) и осаждение с помощью электродугового плазматрона (Plasma dust).

С нашей точки зрения, при рассмотрении 3D MID-технологий необходимо разделять понятия функционального и вспомогательного материалов. Если первый является основным рабочим материалом элемента конструкции, то вспомога-

тельный напрямую не входит в состав рабочего материала, но может участвовать в его формообразовании, изготовлении или эксплуатации.

### 1. СПЛАВНЫЕ 3D MID-ТЕХНОЛОГИИ (V-3D MID)

Одним из наиболее часто применяемых технологий литья (или сплавных технологий), является литье под давлением с предварительно отформованными закладными деталями, которое включает несколько технологических разновидностей [11-13]:

- декорирование в пресс-форме (IMD);
- этикетирование в пресс-форме (IML);
- литье с закладкой (вставкой) пленочных заготовок (FIM);
- литье с закладкой (вставкой) пластиковых или иных готовых элементов (Insert Molding).

Разновидности литья со вставкой пленочных заготовок могут рассматриваться и в качестве отдельных технологий изготовления квази-4D-объектов, и в качестве способов изготовления литых монтажных оснований (MID), например, для S-3D MID-технологий (табл.2).

Традиционно, основная идея литья со вставкой заключается в производстве многокомпонентной многослойной детали при сплавлении в стандартной пресс-форме двух термолabile оснований с прослойкой между ними (рис.2а). Технически эта операция близка к процессу двухсторонней ламинации документов. В качестве прослойки может быть использован практически любой материал: металлические пластины, различные полимеры,

- aerosol jet, maskless, meso-scale or material deposition (M3D);
- jet sputtering;
- 3D photolithography.

Dry (gas-phase) technologies include gas-plasma metallization (Flame con) and cold plasma deposition (Plasma dust).

From our point of view, it is necessary to separate the concepts of functional and accessory materials when considering the 3D MID-technologies. If the first is the primary material of the structural element, then the

accessory one is not included in the functional material, but may participate in its shaping, fabrication or operation.

### 1. V-3D MID TECHNOLOGIES

The injection moulding with pre-shaped embedded parts is one of the most commonly used casting techniques (or moulding technologies). It includes several types of technologies [11-13]:

- in-mold decoration (IMD);
- in-mould labelling (IML);
- film insert molding (FIM);
- insert molding.

Variations of film insert molding can be considered as a separate technologies of fabrication of quasi-4D-objects, and as methods of making molded bases (MID), for example, for S-3D MID technology (table.2).

Traditionally, the main idea of the insert molding is the production of multilayer multicomponent parts with fusion in the standard mold of two coctolabile bases with a layer between them (Fig.2a). Technically this operation is similar to the process of double-sided lamination of

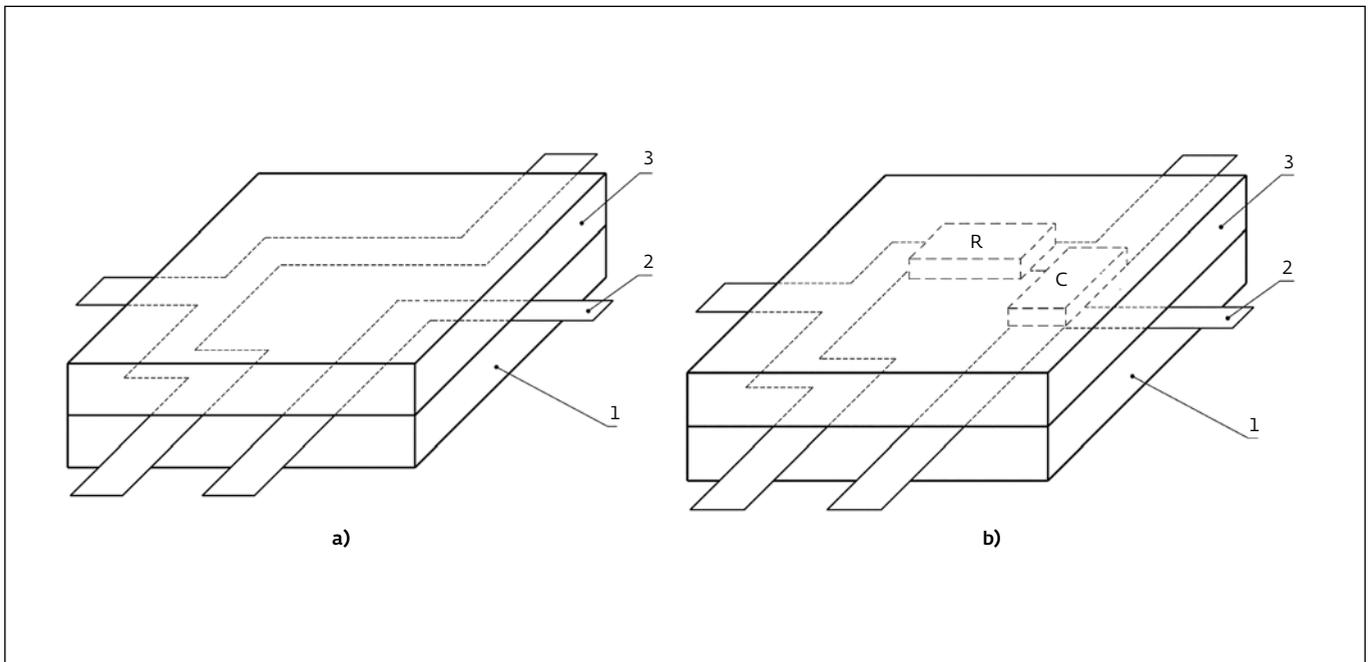


Рис.2. Одноуровневое литье со вставкой первого (а) и второго (б) поколений: 1 – нижнее основание; 2 – коммутирующий слой; 3 – верхнее основание

Fig.2. Single-level insert molding of the first (a) and second (b) generations: 1 – lower base; 2 – switching layer; 3 – upper base

жесткие или гибкие композиты и т.д. В качестве же оснований – термопластики, обладающие различными оптическими, электрическими, механическими и другими характеристиками, или же абсолютно разные материалы.

Современный уровень развития технологий литья со вставкой позволяет осуществлять финиш-

ное сплавление достаточно тонких корпусов-оснований (панелей), используя вместо стандартной конструкционной вставки готовый плоский функциональный модуль (рис.2б) с коммутационной системой или сборочный модуль, состоящий из объемной коммутационной системы и различных компонентов (проводников, резисторов, конденса-

documents. Almost any materials – metal plates, various polymers, rigid or flexible composites, etc. – can be used as the intermediate layer. Thermoplastics that have different optical, electrical, mechanical and other characteristics, or completely different materials are used as bases.

Insert molding allows the finishing fusion of thin packages-bases (panels), using as standard structural insert the flat functional module (Fig.2b) with the switching system or the assembly,

consisting of three-dimensional switching system and different components (conductors, resistors, capacitors, LEDs, etc.), for example, on the basis of the flexible printed circuit board (Fig.3).

The advantages of insert molding:

- low cost of equipment;
- the shortest production cycle per unit of production;
- use of enclosures as a substrate (circuit board) for the TEU;
- ability to use structural and functional modules as an insert.

Disadvantages of insert molding:

- limited range of materials;
- the inability to change the configuration of the TEU in the manufacturing process (use of finished insert);
- restrictions of the configuration for the non-thermoplastic bases (preparation of vias, large alignment errors for separate parts, etc.);
- ability to produce TEU only for the millimeter range using ready modules. ■

To be continued in the next issue

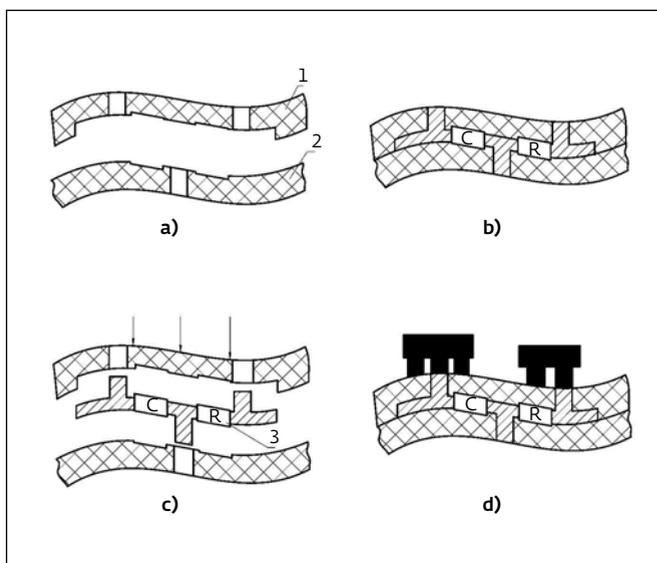


Рис.3. Многоуровневое литье второго поколения со вставкой: а) подготовка многокомпонентных оснований (1 и 2); б) установка вставки, например, слоя проводников с штыревыми вертикальными выводами (3); в) сплавление компонентов основания в пресс-форме; г) готовое квази-4D изделие  
 Fig.3. Multi-level insert molding of the second generation: a) preparation of multicomponent bases (1 and 2); b) inserting (e.g., conductive layer with vertical pins) (3); c) melting of the bases in a press form; d) quasi-4D product

торов, светодиодов и т.д.), например, на базе гибкой печатной платы (рис.3).

Преимущества технологии литья со вставкой:

- дешевизна оборудования;
- самый короткий производственный цикл на единицу продукции;
- использование корпуса изделия в качестве подложки (платы) для ТЭУ;
- возможность использования в качестве вставки как конструкционных, так и функциональных модулей.

Недостатки литья со вставкой:

- ограничения по типам используемых материалов;
- отсутствие возможности менять конфигурацию ТЭУ в процессе изготовления (использование готовой вставки);
- ограничения по конфигурации не термостойких оснований (подготовка переходных отверстий, значительные погрешности при совмещении отдельных частей и т.д.);
- возможность изготовления ТЭУ только миллиметрового диапазона из готовых модулей.

Продолжение в следующем номере

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кондрашин А.А., Лямин А.Н., Слепцов В.В., Махно Д.В. Аспекты формирования трехмерных электронных устройств // Наноинженерия. 2015. № 2(44). С. 3-18.
2. Кондрашин А.А., Лямин А.Н., Слепцов В.В., Махно Д.В. Аддитивные трехмерные электронные устройства // Наноинженерия. 2015. № (49). С. 5-20.
3. Кондрашин А.А., Лямин А.Н., Слепцов В.В., Махно Д.В. Особенности технологии изготовления трехмерных электронных устройств // Научные технологии. 2015. № 6. С. 38-47.
4. Ежеленко В., Трубащевский Д. Эра аддитивного производства наступает // Умное производство. 2015. № 1 (29).
5. Ежеленко В., Трубащевский Д., Колмаков А. Металлическая 3D печать – будущее эффективных производств // Умное производство. 2015. № 3 (31).
6. Современные 3D принтеры // КомпьюАрт. 2015. № 4. С. 10-18.
7. Франке Й. 3D MID материалы, технологии, свойства / Под ред. И.А. Волкова; пер. с англ. – СПб, 2014. 331 с.
8. Бачнак Н. Инновация через 3D технологию – применение и прикладные примеры // Матер. I Российской 3D-MID конференции, Москва, 23-24 октября 2013.
9. Камышная Э.Н., Курносенко А.Е., Иванов Ю.В. Системный анализ 3D-MID технологий // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 11 (<http://engjournal.ru/catalog/it/hidden/1047.html>)
10. Бакарджиева С. 3D-MID: есть шанс догнать лидера // Умное производство. 2015. № 3 (31).
11. Технология вставки Insert Engel // Матер. официального сайта фирмы ZIMK GmbH ([http://www.polymer.ru/letter.php?n\\_id=497&cat\\_id=3](http://www.polymer.ru/letter.php?n_id=497&cat_id=3))
12. Каталог литьевых машин для производства изделия на базе технологии литья со вставкой компании // Матер. официального сайта компании Engel (<http://www.exapro.ru/engel-es-350t-225351-k-sl-litevaia-mashina-dlia-litia-pod-davleniem-p30305139>).
13. Волков И. Электроника на пластике – возвращение // Вектор Высоких технологий. 2013. № 1 (01). С. 40-47.