

А.А. Кондрашин, А.Н. Лямин, В.В. Слепцов



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ  
ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2016

УДК 621.396.6:658.274; 621.396.6:621.717

ББК 32.844

К64

**К64 Кондрашин А.А., Лямин А.Н., Слепцов В.В.**  
**Современные технологии изготовления трехмерных электронных устройств**  
**Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 150 с. ISBN 978-5-94836-450-6**

С развитием высоких технологий производства электронных устройств становится реальным выпуск трехмерных электронных устройств (ТЭУ), в том числе субмикронных монолитных схем.

На основе классификации формирования ТЭУ на плоских (2D) и квазиобъемных (квази-3D) подложках рассмотрены основные принципы и характеристики технологий плоской печати. Сделав вывод о невозможности изготавливать по этим технологиям объемные структуры сложной формы в непрерывном технологическом цикле, проанализированы возможности современных аддитивных технологий для производства ТЭУ. Классификация данных технологий по физическому принципу воздействия на конструкционный материал и выявление их общих недостатков показали, что использование традиционных аддитивных технологий, как и традиционных 2D технологий печати, не позволяет формировать многослойные сложные 3D объекты.

Решением данной задачи являются еще только разрабатываемые гибридные технологии, названные в данной работе «4D технологиями формирования ТЭУ», т.к. только они позволят формировать «монолитные» детали, выращиваемые внутри свободного объема или на любой поверхности функциональных многослойных структур или конструкций. Первым шагом к созданию 4D технологий формирования ТЭУ является внедрение 3D MID-технологий. Проведен сравнительный анализ возможностей различных 3D MID-технологий формирования ТЭУ, выявлены недостатки данных технологий и приведены примеры их реализации в промышленности.

В тоже время, исходя из возможностей современных технологий, создана классификация 4D объектов ТЭУ. Представлены перспективы развития технологий для создания 4D объектов ТЭУ

Учебное пособие может быть рекомендовано бакалаврам и магистрам высших учебных заведений.

© 2016, А.А. Кондрашин, А.Н. Лямин, В.В. Слепцов

© 2016, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-450-6

# Содержание

<b>Предисловие</b> .....	<b>5</b>
<b>Введение</b> .....	<b>7</b>
<b>Глава 1. Печатная электроника для квази-3D ТЭУ</b> .....	<b>8</b>
1.1. Технологии фиксированной печати .....	11
1.1.1. Трафаретная (screen) печать .....	11
1.1.2. Глубокая печать (ротogrавюрная – gravure) .....	13
1.1.3. Высокая печать (флексография – flexographic) .....	15
1.1.4. Горячее тиснение (твёрдо-трансферный перенос) .....	17
1.1.5. Офсетная печать (offset) .....	18
1.1.6. Нанопечатная литография (nanoimprint lithography) .....	22
1.1.7. Общие выводы по технологиям фиксированной печати .....	25
1.2. Технологии нефиксированной печати .....	26
1.2.1. Матричная печать .....	26
1.2.2. Электрография (светодиодная ксерография и лазерное копирование) .....	27
1.2.3. Ризография .....	29
1.2.4. Струйная печать .....	30
1.2.5. Термография .....	32
1.2.6. Общие выводы по технологиям нефиксированной печати квази-3D-объектов .....	36
1.3. Сравнение технологий формирования квазиобъемных фигур на базе 2D-подложек .....	36
<b>Глава 2. 3D-технологии производства ТЭУ</b> .....	<b>42</b>
2.1. Технологии склеивания порошков .....	45
2.2. Технологии теплового воздействия на конструкционный материал до процесса формирования слоя .....	47
2.2.1. Экструзия (выдавливание расплава) материала FDM (Fused deposition modeling) / FFF (Fused Filament Fabrication) .....	47
2.2.2. Струйное распыление расплавленного материала (DODJet и MJM) .....	49
2.3. Технология теплового воздействия на конструкционный материал в процессе формирования слоя .....	51
2.3.1. Ламинирование листовых материалов LOM (Laminated Object Manufacturing) .....	51
2.3.2. Ультразвуковая консолидация (наплавление) (UAM – Ultrasonic Additive Manufacturing) .....	53
2.3.3. Селективное тепловое спекание SHS (Selective Heat Sintering) ...	54
2.3.4. Селективное лазерное спекание порошков СЛС (SLS – Selective Laser Sintering) .....	55
2.3.5. Лазерное сплавление материалов (LENS – Laser Engineered Net Shaping) .....	57
2.3.6. Электронно-лучевое сплавление порошков (EBM – Electron Beam Melting) .....	58

2.3.7. Электронно-лучевое сплавление твердых веществ EBF3 (Electron Beam Free Form Fabrication) .....	59
2.4. Технологии фотополимеризации .....	61
2.4.1. Облучение УФ-лазером SLA (Stereo Lithography Apparatus) .....	61
2.4.2. Облучение УФ-лампой (FTI (Film Transfer Imaging) или DLP) ...	62
2.4.3. Выращивание монолита из раствора CLIP (Continuous Liquid Interface Production) .....	64
2.4.4. Облучение УФ-лампой через маску (послойное уплотнение) SGC (Solid Ground Curing) .....	66
2.4.5. Струйное распыление фотопластика (PJP – Plastic Jet Printing) с одновременной засветкой УФ-лампой (Poly Jet – Photopolymer Jetting) .....	68
2.5. Заключение главы 2 .....	69
2.5.1. Достоинства и недостатки аддитивных технологий .....	69
2.5.2. Ближайшие перспективы внедрения 3D-принтеров.....	74
2.5.3. Перспективные технологии изготовления трехмерных электронных устройств (ТЭУ).....	77
<b>Глава 3. 4D-технологии производства ТЭУ .....</b>	<b>78</b>
3.1. Сплавные 3D MID-технологии (V-3D MID).....	79
3.2. Жидкостные S-3D MID-технологии (LS-3D MID) .....	83
3.2.1. Двухшаговая заливка или «2S»-технология (Two Step или Two Shot Molding).....	83
3.2.2. Лазерное структурирование (LDS-технология – Laser Direct Structuring).....	85
3.2.3. Субтрактивное лазерное структурирование LSS (Laser Subtractive Structuring) .....	89
3.2.4. Струйно-аэрозольная технология (Aerosol-Jet Deposition - AJD или M3D – Maskless, Mesoscale, Material Deposition) .....	90
3.2.5. Струйное распыление (металлизация).....	93
3.2.6. 3D-фотолитография (3D-Photoimaging) .....	94
3.3. Газофазные (сухие) S-3D MID-технологии (DS-3D MID) .....	96
3.3.1. Газоплазменное (газотермическое) напыление (технология Flamecon) .....	97
3.3.2. Осаждение при помощи электродугового плазмотрона (технология Plasmadust) .....	99
3.4. Анализ перспективы развития 3D MID-технологий .....	102
3.5. Перспективы развития 3D-технологий ТЭУ.....	111
<b>Литература .....</b>	<b>118</b>
<b>Приложение 1. Контрольные вопросы к главе 1 .....</b>	<b>125</b>
<b>Приложение 2. Контрольные вопросы к главе 2 .....</b>	<b>133</b>
<b>Приложение 3. Контрольные вопросы к главе 3 .....</b>	<b>143</b>

# Предисловие

С развитием новых технологий конструирования и производства электронных устройств за счет создания и редактирования их трехмерных компьютерных моделей и новых типов устройств и материалов для послойного создания физического объекта все более реальным становится воспроизводимый выпуск полноценных трехмерных электронных устройств (ТЭУ). В связи с этим представляется необходимым произвести новую классификацию сложных объемных (3D) объектов и всех современных технологий их изготовления по физическому принципу воздействия на конструкционный материал. Только выявив преимущества и недостатки данных технологий и определив приоритетные направления их развития, можно будет определить перспективы развития современных физико-химических методов формирования ТЭУ.

В первой главе пособия выявлены основные принципы и возможности формирования ТЭУ на плоских (2D) и квазиобъемных (квази-3D) подложках. Проанализированы основные характеристики методов печати: максимальная толщина слоя, наличие контакта, тип переноса печатного изображения (фиксированное, нефиксированное), производительность и т.д. Показано, что использование современных технологий «плоской печати» не позволяет изготавливать объемные структуры сложной формы в непрерывном технологическом цикле.

Во второй главе пособия проанализированы возможности современных аддитивных технологий для производства ТЭУ по их основным характеристикам: диапазонам толщин наносимых материалов, максимальному разрешению формирования структур и производительности методов. Произведена классификация данных технологий по физическому принципу воздействия на конструкционный материал. Показано, что общими недостатками всех аддитивных технологий являются сложность получаемых структур, ведущая к худшим механическим свойствам, достаточно низкое разрешение изготавливаемых объектов (до 1 мкм) и высокая стоимость сформированных изделий, что значительно ограничивает возможность их массового (конвейерного) производства. Использование традиционных аддитивных технологий, как и традиционных 2D-технологий печати, также не позволяет формировать многослойные сложные 3D-объекты с использованием в качестве функциональных элементов всех граней, ребер и толщин стенок.

В третьей главе пособия введено понятие 4D-технологии формирования ТЭУ различных поколений, позволяющей формировать «монолитные» детали, «выращивая» внутри свободного объема или на любой поверхности функциональные многослойные структуры или конструкции. То есть данные технологии должны обеспечивать размещение слоев или линий коммутирующих и дискретных микроселектронных элементов в любом месте «свободного» объема детали. Первым шагом при разработке данного типа объектов стало создание квази-4D-объектов, а группа технологий для их формирования получила название 3D MID-технологий (Three Dimensional Molded Interconnected Devices). В главе 3 произведен сравнительный анализ возможностей различных 3MID-технологий формирования ТЭУ. Показано, что основным недостатком 3D MID-технологий является невозможность изготовления полноценных 4D-деталей ТЭУ с использованием в качестве функциональных элементов всех свободных граней, ребер и объема (или всей толщины стенок). Приведены примеры внедрения 3D MID-технологий в производство изделий радиоэлектроники.

В заключении представлены этапы и перспективы развития (так называемая дорожная карта) современных физических методов формирования ТЭУ до 2026 г.

Данный материал является блоком, который может использоваться в курсах «Моделирование конструкций и технологических процессов производства ЭС», «Научные и организационные проблемы конструирования и технологии РЭС», «Проектирование и технология РЭС специального назначения», «Нанотехнология и наноматериалы в производстве ЭС», «Средства отображения информации», «Физико-химические основы нанотехнологии и технологии электронных средств» и «Интегральные устройства радиоэлектроники и наноэлектроники».

# Введение

До недавнего времени электронное устройство состояло из печатного узла (печатной платы с установленными на ней чипами пассивных и активных элементов) и корпуса. Основным элементом, определяющим размер печатной платы, являются интегральные микросхемы (ИМС). С развитием технологий микроэлектроники наблюдается постоянное увеличение степени интеграции элементов самих микросхем, т.е. увеличение числа элементов ИМС на единицу площади поверхности за счет уменьшения их размеров. Это приводит к постоянному уменьшению размера самой печатной платы или к уменьшению количества печатных плат за счет увеличения их функциональности. Соответственно уменьшаются и габаритные размеры самого печатного узла.

Следующим этапом микроминиатюризации устройств является необходимость использования корпуса печатного узла не только в качестве пассивного конструкционного несущего элемента, но и в качестве объемной печатной платы (трехмерных электронных устройств – ТЭУ). Первые неудачные попытки создать ТЭУ (наносить токопроводящие дорожки непосредственно на внутренние поверхности объемных пластиковых корпусов) относятся еще к 80-м годам XX века.

И только с развитием новых принципов конструирования устройств за счет создания их трехмерных компьютерных моделей, новых типов устройств послойного создания физического объекта и новых материалов стало возможно наладить воспроизводимый выпуск полноценных ТЭУ.

# ГЛАВА I.

## ПЕЧАТНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ДЛЯ КВАЗИ-3D ТЭУ

В настоящее время в производстве ТЭУ различают несколько типов сложных объемных объектов (см. таблицу 1.1):

– объемные фигуры (квази-3D объекты), создаваемые из отдельных 2D-модулей на базе жестких или гибких подложек [1–2];

– жесткие объемные (3D) фигуры [3–4, 92], создаваемые послойно при помощи 3D-принтеров (или многофункциональных устройств) и ex-situ технологий (дополнительных посттехнологий) обработки поверхности;

– жесткие объемные (3D) фигуры, получаемые традиционными промышленными методами (литьем, штамповкой и т.д.) и ex-situ технологий обработки поверхности (3DMID) [5].

**Таблица 1.1.**

Классификация монтажных оснований и устройств

<i>Размерность</i>	<i>Расположение поверхностей и способ монтажа компонентов</i>	<i>Схема монтажа компонентов</i>
2D	Плоская поверхность; компоненты на одной стороне	
	Плоские поверхности; компоненты на обеих сторонах	
Квази-3D	Плоские поверхности, располагающиеся под углом друг относительно друга	
	Гибкие печатные платы (печатная электроника)	
3D	Поверхности свободной формы без компонентов (3D-печать)	

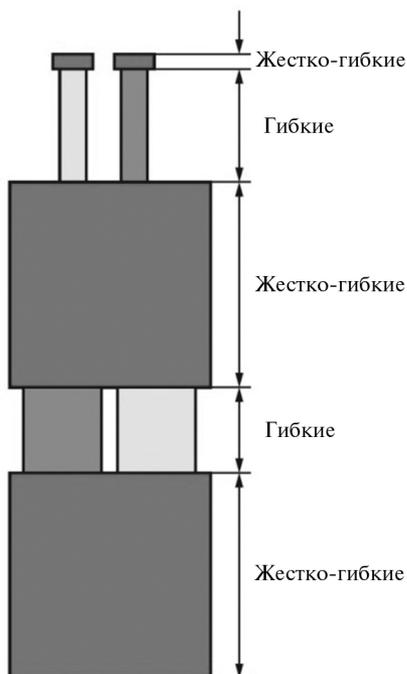
Создание первых ТЭУ осуществлялось именно на базе нанесения покрытий различного вида (проводящих резистивных, полупроводящих или диэлектрических) на:

- жесткие подложки (стеклотекстолит, гетинакс и т.д.) [6];
- гибкие подложки (полиэтилентерефталат (PET), полиэтиленнафталат (PEN), полиимид (PI), полипропилен (PP), полилактид (PLA), бумага, полиэтилен и т.д.) [7–8].

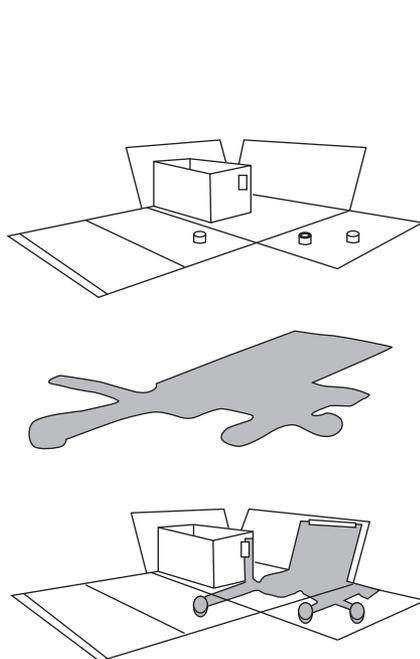
Это направление не потеряло своей актуальности и по настоящее время. В большинстве случаев нанесение покрытий на гибкие и жесткие подложки аналогично. Разница лишь в соединении гибкой и жесткой платы в единый модуль (рис. 1.1) или в размещении гибкой печатной платы внутри жесткого 3D-корпуса (рис. 1.2) [9].

С точки зрения типа переноса изображения все технологии 2D-печати (рис. 1.3) можно подразделить на:

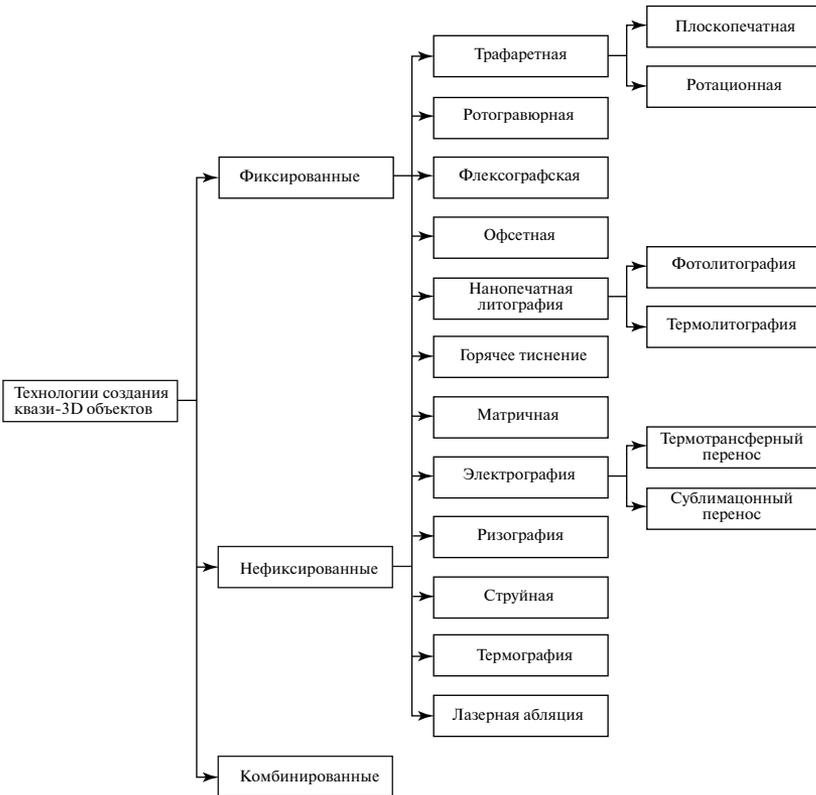
- фиксированное печатное изображение переносится со специально изготовленной печатной формы (штампа, вала и т.д.) на подложку.



**Рис. 1.1.** Модульное соединение гибких и жестких частей платы



**Рис. 1.2.** Квази-3D-моделирование гибких и жестких частей платы



**Рис. 1.3.** Классификация технологий создания квази-3D-объектов

При этом максимальный размер изображения определяется, например, длиной окружности цилиндра (трафаретная, глубокая и т.д.), а качество изображения – современным уровнем технологии изготовления печатного элемента на печатной форме (computer-to-press);

- нефиксированное (динамическое) изображение переносится на подложку с редактируемого источника и не требует изготовления постоянной фиксированной печатной формы. Максимальное разрешение для черно-белой или цветной печати измеряется в dpi (струйная, лазерная абляция, матричная и т.д.) (computer-to-print);

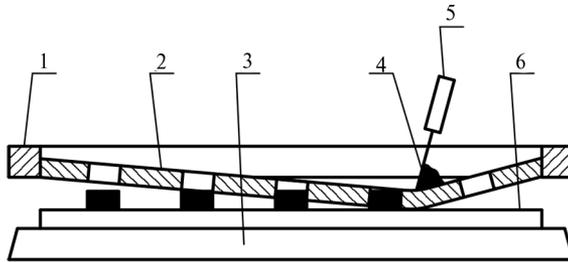
- гибридная технология – сочетание фиксированной и нефиксированной печати. Например, трафаретная печать для создания толстых покрытий и струйная для создания тонких покрытий с высокой точностью.

## 1.1. Технологии фиксированной печати

### 1.1.1. Трафаретная (screen) печать

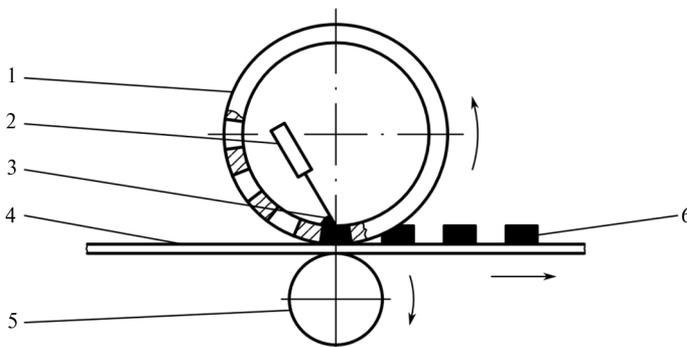
Технология нанесения рисунка в трафаретной печати состоит в продавливании пасты через трафарет с использованием ракеля. В настоящее время существуют две технологии трафаретной печати – плоскочечатная (flat screen printing) и ротационная (rotary screen printing) [10]. Они отличаются между собой формой и расположением трафарета (рис. 1.4 и 1.5).

В плоскочечатных установках (рис. 1.4) материал покрытия (4) продавливается ракелем (5) на подложку (6), закрепленную на осно-



**Рис. 1.4.** Трафаретная плоскочечатная печать:

1 – рама трафарета; 2 – трафарет; 3 – основание; 4 – функциональные чернила; 5 – ракель; 6 – подложка



**Рис. 1.5.** 1 – печатный вал с трафаретом; 2 – ракель; 3 – наносимый материал; 4 – подложка; 5 – прижимной вал; 6 – нанесенное покрытие

вании (3), через ячейки трафарета (1), располагаемого между ракелем и подложкой. Производительность этих установок невысока в связи с предварительным приготовлением (раскром) плоских заготовок и периодической подачей их в камеру осаждения.

Для повышения производительности используется полая ротационная установка печати (рис. 1.5), в которой трафарет (1) (печатная форма) представляет собой полый цилиндр с ячейками (2), внутри которого помещается ракель (2), переносящий краску на подложку (4), продавливая ее через ячейки вращающегося печатного цилиндра. Трафаретная краска закачивается непрерывно в трафаретную форму насосом.

Для получения качественного отпечатка с четким краем рисунка заданной толщины для использования данного метода при формировании элементов ТЭУ необходимо осуществить контроль следующих технологических параметров:

- вязкости паст. Пасты должны обладать тиксотропностью (способностью под действием механического давления увеличивать текучесть (уменьшать вязкость)) и затем после прекращения давления снова загустевать. Чем больше вязкость, тем толще пленка;
- параметры ракеля:
  - угол встречи (атаки) с поверхностью подложки (выбирается от  $4^\circ$  до  $60^\circ$  – чем меньше угол встречи, тем больше давление и толщина пленки);
  - твердость материала ракеля (величина его прогиба). Большой прогиб уменьшает угол атаки, увеличивая расход пасты;
  - давление ракеля на трафарет (повышение давления увеличивает толщину слоя пасты);
  - скорость перемещения ракеля (чем выше скорость перемещения, тем меньше толщина наносимой пленки);
- параметры трафарета:
  - размеры ячеек (для получения толстых пленок однородной толщины необходимо применять крупную сетку, а для точного воспроизведения – более мелкую сетку или регулировать натяжение одной сетки);
  - зазор между трафаретом и подложкой. Увеличение зазора приводит к увеличению толщины слоя;
- режимы термообработки:
  - сушка. При этом удаляются летучие компоненты. Так как сразу наносится слой значительной толщины, то требуется определенное время сушки;

– обжиг. При этом происходит, например, удаление органической связки и спекание. При производстве толсто пленочных электронных схем сначала вжигается рисунок проводников при температуре 850 °С, далее диэлектриков при  $T = 750$  °С, а затем и резисторов при  $T = 700$  °С;

– охлаждение (скорость падения температуры и ее конечное значение);

- скорость перемещения подложки.

К преимуществам метода можно отнести:

- получение за один проход самых толстых пленок из всех известных промышленных методов нанесения;
- широкий диапазон толщин наносимых покрытий;
- края линий более четкие, чем у линий, формируемых струйной печатью [10].

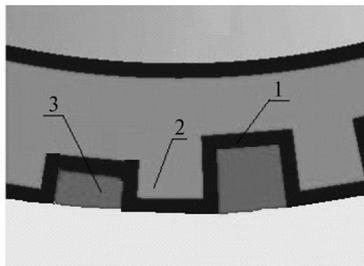
К недостаткам метода относятся:

- низкая скорость формирования пленки;
- достаточно низкое разрешение до 50 мкм;
- высокая стоимость ротационных трафаретов.

### 1.1.2. Глубокая печать (ротогравюрная – gravure)

Глубокая печать – способ печати с использованием формового цилиндра, на котором печатающие элементы (1) утоплены по отношению к пробельным (2) (рис. 1.6).

В печатных машинах для глубокой печати (рис. 1.7) наносимое вещество подается на формовый цилиндр (3) и попадает в печатные углубления, которые определяют объем, форму и местоположение отпечатков наносимого материала. При вращении формового цилиндра печатные углубления заполняются наносимым материалом, а его излишки



**Рис. 1.6.** Элементы формового цилиндра:

1 – печатающий элемент; 2 – пробельный элемент; 3 – наносимое вещество

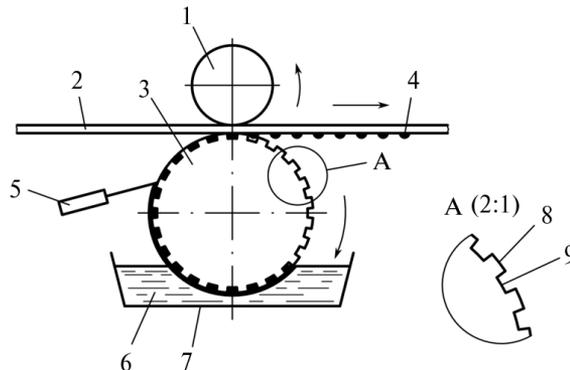
удаляются ракелем (5). При прокатывании подложки (2) через ролики печатного прижимного (1) и формовного цилиндров на нем формируются отпечатки (4), различные по толщине и площади.

К преимуществам метода можно отнести:

- высокую производительность;
- возможность нанесения отпечатков различной толщины на одно основание;
- простоту технологического процесса;
- экономию наносимого материала по сравнению с трафаретной печатью.

К недостаткам метода относят:

- необходимость удаления наносимого вещества с пробельных элементов формы;
- большие размеры традиционного оборудования. Но в последнее время появились относительно небольшие установки компании Daetwyler R&D (США) (например модели AccuPress MicroGravure) для глубокой печати микроэлементов печатной электроники, которые производят на этой установке гибкие дисплеи на органических светодиодах;
- образование неровностей на краях сформированных элементов;
- высокую стоимость формовного цилиндра;
- для получения высокоточных элементов необходимо использование специальных подложек.



**Рис. 1.7.** Установка глубокой печати:

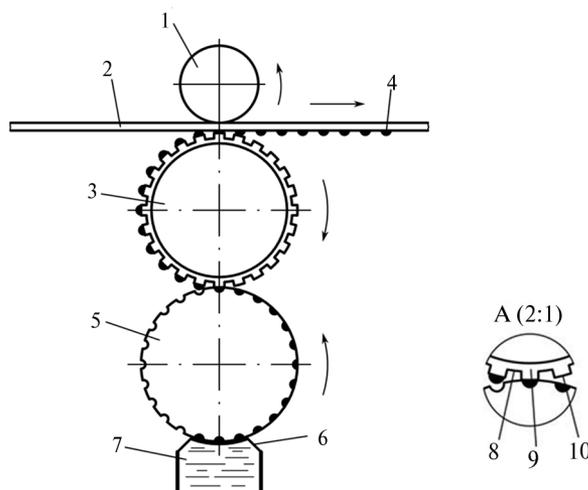
1 – печатный вал (цилиндр); 2 – подложка; 3 – формовный вал (цилиндр) с печатной формой; 4 – нанесенный материал; 5 – ракель (лезвие); 6 – наносимый материал; 7 – ванна; 8 – пробельный элемент; 9 – печатный элемент

### 1.1.3. Высокая печать (флексография – flexographic)

Высокая печать (или флексография) – это способ печати с использованием гибких (flexibilis) резиновых форм и быстросохнущих текучих материалов [11]. Существуют два вида флексографических установок: камер-ракельного типа (рис. 1.8) и дукторного типа (рис. 1.9).

В установках камер-ракельного типа, в отличие от глубокой печати во флексографии (рис. 1.8), добавлен второй анилоксовый цилиндр (anilox roll) (5), забирающий наносимый материал из ванны (или дозатора) (7) и переносящий его на выступающие печатающие элементы упругой печатной формы (10), расположенной на формовном валу (3), на котором находится гибкая печатная форма. Излишки материала удаляются ракельными ножами (6). Далее наносимый материал переносится на подложку (2), прокатываемую между формовным цилиндром печатной формы и прижимным валом (1). При соприкосновении с подложкой для полного перехода наносимого материала необходимо давление.

В установках дукторного типа, в отличие от установок камер-ракельного типа, дозирование краски производится за счет регулирования ширины контакта между дополнительным дукторным (заправочным,



**Рис. 1.8.** Флексографическая печать камер-ракельного типа:

1 – прижимной вал (опорный цилиндр); 2 – подложка; 3 – формовный цилиндр; 4 – нанесенный материал; 5 – анилоксовый вал; 6 – ракельные ножи; 7 – камерная ванна; 8 – пробельный элемент; 9 – гибкая печатная форма; 10 – печатный элемент