

# Экологические аспекты проблемы бессвинцовой пайки изделий микроэлектроники

**Маховик проблемы пайки бессвинцовыми припоями в мировой электронике уже запущен. Его невозможно остановить в отдельно взятой стране. Это связано с различными известными причинами, зачастую не имеющими принципиального отношения к улучшению экологической ситуации. Как заметил профессор А. Медведев, «Нам придется волей-неволей перейти на бессвинцовую технологию, несмотря на большие для нас издержки и капиталовложения» (Электронные компоненты, 2004, № 11). Исходя из данной ситуации, в РФ, как это уже сделано в некоторых странах, необходимо создать центр по исследованию бессвинцовой технологии с целью оказания помощи заинтересованным предприятиям. Авторы предлагают в журнале «Технологии в электронной промышленности» ввести раздел «Технология, организация производства и оборудование бессвинцовой пайки в микроэлектронике».**

*Нет ни одного государства в мире, бюджет которого не содержал бы строки затрат на обеспечение экологической безопасности. Мировая практика считает приемлемым выделение 3–5% бюджета страны (или региона, города) на решение экологических проблем.*

**Виктор Зенин**

zenvik@bk.ru

**Виктор Осенков  
Александр Рягузов**

**В** последние годы пайке бессвинцовыми припоями в производстве изделий микроэлектроники уделяют пристальное внимание специалисты, работающие в этой области. Это связано с призывом экологов запретить использование свинца в электронной аппаратуре. По их мнению, размещение на полигонах (свалках) отслуживших свой срок изделий, содержащих свинец в припое, ухудшает экологическую ситуацию.

Почему акцентируется внимание только на свинце? Разве другие ингредиенты, входящие в состав отходов производств всех уровней, не ухудшают экологию?

В связи с возникшей полемикой об ухудшении экологии, якобы вызванной свинецсодержащими изделиями радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), необходимо подробно проанализировать существующие в РФ законодательные акты по утилизации и размещению твердых бытовых отходов (ТБО), в том числе содержащие свинец. На наш взгляд, заслуживают внимания особенности функционирования полигонов для размещения ТБО.

## **Нормативные требования к размещению твердых бытовых и токсичных промышленных отходов**

Любая деятельность человека, исключая вредное воздействие на окружающую среду, обеспечивает экологическую безопасность.

Уже многие годы деятельность человека, связанная с загрязнением окружающей среды, регулируется нормативными документами.

Особенно строгое регулирование осуществляется по отношению к токсичным промышленным отходам [2]. Для этой цели сооружаются специальные полигоны по обезвреживанию, переработке и захоронению токсичных промышленных отходов в соответствии с требованиями СНиП 2.01.28-85 (Полигоны по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов. Основные положения по проектированию. Госстрой СССР, 1990).

Захоронение токсичных, химических и биологически опасных отходов на полигоне запрещено. Отходы этого типа должны собираться отдельно, обезвреживаться перед захоронением на полигоне или сжигаться.

В [3, прил. 2] приведены виды токсичных промышленных отходов, размещение которых на полигонах ТБО недопустимо. К их числу относятся отходы, содержащие следующие материалы: ртуть, шестивалентный хром, кобальт, цинк, медь, никель, кадмий, свинец, бром, соли тяжелых металлов, а также некоторые неорганические (серная кислота и др.) и органические (фенол и др.) вещества.

Наиболее близко к изделиям радиоэлектроники можно отнести группу под кодом 353 000 00 00 000 — лом и отходы цветных металлов, содержащие алюминий, свинец, медь, цинк, никель, олово, титан, хром.

В подгруппу под кодом 353 102 00 01 010 относят:

- лом и отходы, содержащие свинец;
- лом свинца несортированный;
- лом свинца в кусковой форме незагрязненный;



- отходы, содержащие свинец (в том числе пыль и/или опилки свинца), несорттированные;
- отходы, содержащие свинец в кусковой форме;
- опилки свинцовые незагрязненные;
- пыль (порошок) свинца незагрязненная;
- скрап свинцовый незагрязненный;
- стружка свинцовая незагрязненная;
- свинцовые пластины отработанных аккумуляторов;
- кабель медно-жильный оцинкованный, потерявший потребительские свойства.

Дальнейшее совершенствование нормативных документов в области обращения с отходами осуществляется согласно федеральному классификационному каталогу [1], с дополнением [4].

### Токсикологическая оценка металлов, входящих в состав припоев и покрытий для бессвинцовой пайки

К наиболее токсичным металлам относятся ртуть, кадмий, свинец, мышьяк. Они не являются ни жизненно необходимыми, ни благотворными, но даже в малых дозах приводят к нарушению нормальных метаболических\* функций организма. Объединенная комиссия ВОЗ по пищевому кодексу (Codex Alimentarius) включила ртуть, кадмий, свинец, мышьяк, медь, стронций, цинк и железо в число компонентов, содержание которых контролируется при международной торговле продуктами питания. Медико-биологическими требованиями СанПиН 2.3.2.560-96 определены критерии «опасности» следующих металлов: свинец, кадмий, ртуть, медь, цинк, олово, железо.

Анализ припоев и паяемых покрытий в производстве изделий радиоэлектроники показал, что в их состав входят в основном следующие металлы: Bi, In, Cd, Co, Cu, Ni, Sn, Ag, Sb, P, Zn. Свойства данных металлов с точки зрения безопасности жизнедеятельности подробно рассмотрены в энциклопедических словарях [5, 6].

### Экологическая оценка припоев ПОС40 (40Sn/60Pb) и бессвинцового 95,5Sn/4Ag/0,5Cu

Свинец представляет собой яд, накапливающийся на протяжении многих лет в тканях организма. Согласно данным австралийских служб по охране здоровья рабочих, 30% попадающего на человека свинца адсорбируется кожными покровами, а 70% оседает в легких. Внешними симптомами отравления являются головные боли и боли в суставах, однако оно вызывает и скрытые, более серьезные последствия в виде поражений почек и нервной системы, бесплодия и врожденных пороков.

Предельно допустимые концентрации (ПДК) для свинца и его неорганических соединений приняты: для атмосферного воздуха (ПДК<sub>а.в.</sub>) — 0,003 мг/м<sup>3</sup>, для рабочей зоны

\* Метаболизм — совокупность химических реакций, протекающих в живых клетках и обеспечивающих организм веществами и энергией для его жизнедеятельности

Таблица 1. Токсикологические свойства металлов

<b>Висмут</b>	Предельно-допустимая концентрация в рабочей зоне (ПДК <sub>р.з.</sub> ) для Bi и его неорганических соединений — 0,5 мг/м <sup>3</sup> . Его органические производные действуют на почки и в меньшей степени — на печень. Так как висмут и его соединения не вызывают отравлений при работе с ними, его рассматривают как наименее токсичный тяжелый металл, используемый в промышленности в настоящее время.
<b>Индий и его соединения</b>	Растворимые соединения индия влияют на центральную нервную систему (ЦНС), белковый обмен. Хронические отравления: боли в суставах и костях, разрушение зубов, нервные и желудочно-кишечные расстройства, сердечные боли, общая слабость. ПДК <sub>р.з.</sub> для индия оксида — 4 мг/м <sup>3</sup> . Защита: респираторы от пыли.
<b>Кадмий</b>	По своим химическим и физическим свойствам кадмий имеет большое сходство с цинком и вместе с ним встречается в природе. Вдыхание соединений кадмия при концентрации его в воздухе выше 1 мг/м <sup>3</sup> в течение 8 ч (а также при более высоких концентрациях и в течение более короткого промежутка времени) может привести к химической пневмонии, а в тяжелых случаях вызывает отек легких. Потребление напитков, содержащих примесь кадмия в концентрациях, превышающих 15 мг/л, ведет к появлению симптомов пищевого отравления. Источником загрязнения пищи могут быть посуда с глазурью, содержащей кадмий, а также кадмиевые припои. Полагают, что возможным следствием длительного воздействия кадмия при концентрациях в воздухе, превосходящих 0,1 мг/м <sup>3</sup> , является эмфизема легких. Вызванная кадмием эмфизема легких может снижать трудоспособность, быть причиной инвалидности и сокращать продолжительность жизни. При длительном воздействии низких концентраций в первую очередь поражаются почки. Следует подчеркнуть, что поражение почек, вызванное кадмием, носит необратимый характер, и состояние может ухудшаться, даже если воздействие кадмия прекращается. Важнейшие источники отравления кадмием — питание и курение. ПДК <sub>р.з.</sub> для кадмия и его неорганических соединений: 0,05 мг/м <sup>3</sup> — максимальная разовая, 0,01 мг/м <sup>3</sup> — среднесменная.
<b>Кобальт и его соединения</b>	Влияют на сердечно-сосудистую систему, расширяют сосуды, избирательно поражают сердечную мышцу, активизируют ряд ферментов, регулируют тканевое дыхание. ПДК <sub>р.з.</sub> для кобальта и его неорганических соединений: 0,05 мг/м <sup>3</sup> — максимально разовая, 0,01 мг/м <sup>3</sup> — среднесменная. Необходима защита органов дыхания от аэрозолей, спецодежда, защищающая от пыли.
<b>Медь</b>	Чистая медь безопасна при попадании в желудок. Она жизненно необходима, с пищей человек ежедневно получает до 5 мг меди в виде ее соединений, из которых усваивается около 5%. Для водорослей, грибов, бактерий медь является сильным ядом, так как она в кислой среде образует следовые количества ионов меди. ПДК <sub>р.з.</sub> — 1 мг/м <sup>3</sup> (максимально разовая).
<b>Никель и его соединения</b>	Тетракарбонил никеля выделяется при курении сигарет (2,9 мг на сигарету), раздражает глубокие дыхательные пути (ПДК <sub>р.з.</sub> — 0,0005 мг/м <sup>3</sup> ). Соединения никеля могут вызывать аллергию (например, слювы никеля в ювелирных украшениях). ПДК <sub>р.з.</sub> (в пересчете на никель) для оксидов и сульфидов — 0,5 мг/м <sup>3</sup> ; для солей в виде гидроаэрозоля — 0,005 мг/м <sup>3</sup> .
<b>Олово и его соединения</b>	Металлическое олово практически нетоксично. Токсичны неорганические соединения (ПДК — 2 мг/м <sup>3</sup> ) и очень ядовиты большинство органических соединений (ПДК — около 0,1 мг/м <sup>3</sup> в пересчете на олово) и SnH <sub>4</sub> (судорожный яд). В относительно больших количествах неорганических соединений олово содержится в консервированных продуктах (ПДК для продуктов питания — 250 мг/кг); в сельскохозяйственных продуктах от 0,05 до 2 мг/кг.
<b>Серебро и его соединения</b>	Серебро (металл) нетоксично, однако при многолетней работе с серебром и его солями серебро отлагается в соединительной ткани и, накапливаясь, придает им своеобразную серо-зеленую окраску (аргирия). У работающих с пылью AgBr и Ag <sub>2</sub> S — жалобы на кашель, першение в горле. ПДК <sub>р.з.</sub> для серебра — 1 мг/м <sup>3</sup> , для неорганических соединений серебра — 0,5 мг/м <sup>3</sup> . Защита: респираторы, спецодежда из бумажной ткани. Пожарная опасность: сереброорганические соединения при комнатной температуре взрываются. Серебро не горит.
<b>Сурьма</b>	При действии паров SbCl <sub>2</sub> раздражение слизистых оболочек глаз, помутнение роговицы; попадание сурьмы в желудок вызывает металлический вкус во рту, слезотечение, рвоту, боли в животе; сурьмяная пыль при длительном вдыхании может вызывать заболевание легких; при плавке сурьмы ее пыль вызывает раздражение кожи, покраснение и появление гнойников. ПДК для пыли сурьмы металлической: 0,5 мг/м <sup>3</sup> — максимальная разовая и 0,2 мг/м <sup>3</sup> — среднесменная. Защита: респираторы, очки, спецодежда из плотной ткани.
<b>Фосфор</b>	Существует в трех аллотропических модификациях: белый (или желтый), красный и черный. Острая интоксикация белым фосфором является очень тяжелым заболеванием, которое может возникнуть при попадании этого вещества внутрь организма человека. Фосфор самопроизвольно загорается на воздухе, что приводит к пожарам и взрывам. Кусочки белого фосфора вызывают тяжелые ожоги при попадании на кожу. В связи с опасностью самовозгорания белого фосфора на воздухе его необходимо постоянно хранить под водой. Нужно обеспечить соответствующую местную и общую вентиляцию на рабочих местах, где имеется даже небольшое количество фосфора. Предотвращение системной интоксикации (и повреждения костей) у людей, имеющих дело с белым фосфором при его производстве или использовании, осуществляют предотвращением или снижением уровня воздействия паров, которые выделяет белый фосфор. ПДК <sub>р.з.</sub> — 0,03 мг/м <sup>3</sup> . Защита: противогаз. Т самовоспл. 44 °С. Склонен к тепловому самовозгоранию. Средства тушения: вода, пена, порошок ПФ. Красный фосфор вызывает тяжелые заболевания кожи. Т самовоспл. 305 °С; предел воспламенения (ПВ) — 14 г/м <sup>3</sup> . Примесь 5% (масс.) желтого фосфора повышает Т самовоспл. красного фосфора до 360 °С; красный фосфор, содержащий 5% желтого фосфора, самовоспламеняется на воздухе. Средства тушения: вода со смачивателями, пена, порошок ПВ.
<b>Цинк</b>	Жизненно необходимый элемент для людей, животных и растений. Дневная норма поступления в организм 10–15 мг. Цинк нетоксичен. Вредно вдыхать соединения цинка. Так, оксид цинка вызывает повышение температуры, боли в суставах и мышцах, озноб, кашель. Хромат цинка — канцероген. ПДК <sub>р.з.</sub> для цинка, (мг/л): 0,1 (Япония); 5 (Россия) и 2 (ФРГ). ПДК <sub>р.з.</sub> для оксида цинка — 0,5 мг/м <sup>3</sup> . Т самовоспл.: аэрозоля 310 °С, аэрозоль 600 °С. Склонен к химическому самовозгоранию в мелкораздробленном и влажном состоянии. Средства тушения: порошок ПГС-М, объемное тушение.

(ПДК<sub>р.з.</sub>) — 0,01 мг/м<sup>3</sup>, для питьевой воды (ПДК<sub>п.в.</sub>) — 0,03 мг/л [1, 2].

Максимально допустимые разовые концентрации загрязняющих веществ (ЗВ): для оксида олова (в пересчете на олово) ПДК<sub>р.з.</sub> — 2 мг/м<sup>3</sup>, ПДК<sub>а.в.</sub> — 0,02 мг/м<sup>3</sup>; для меди ПДК<sub>р.з.</sub> — 1 мг/м<sup>3</sup>, ПДК<sub>а.в.</sub> — 0,002 мг/м<sup>3</sup>; для серебра ПДК<sub>р.з.</sub> — 1 г/м<sup>3</sup>, ПДК<sub>а.в.</sub> — не регламентируется [7].

Сравним параметры выделений и выбросов на рабочем месте на участке пайки ИЭТ электропаяльником с применением припоев

ПОС40 (олово 40%, остальное — свинец) и припоя 95,5Sn/4Ag/0,5Cu.

При пайке электропаяльником 20–60 Вт припоем ПОС40 выделяются: свинец и его соединения — 0,005 мг/с; оксид олова — 0,0033 мг/с.

При пайке в тех же условиях припоем 95,5Sn/4Ag/0,5Cu выделяется оксид олова — 0,012 мг/с. Выделениями ЗВ — серебра и меди — пренебрегаем в виду их малости.

Предположим, что процесс пайки осуществляется в помещении объемом 10 м<sup>3</sup> на одно рабочее место под местной вытяжкой

Таблица 2. Концентрации ЗВ и ИЗА при пайке различными припоями

Припой	Загрязняющие вещества	Рабочая зона		Источники загрязнения атмосферы	
		мг/м <sup>3</sup>	доля ПДК	мг/м <sup>3</sup>	доля ПДК
ПОС40	Свинец и его соединения	0,36	36	0,0059	5,90
	Олова оксид	0,24	0,12	0,0039	0,20
95,5Sn/4Ag/0,5Cu	Олова оксид	0,86	0,43	0,0143	0,71

с параметрами источника загрязнения атмосферы (ИЗА) и общеобменной вентиляции: диаметр трубы — 0,4 м; линейная скорость потока воздуха в трубе — 3 м/с; объемная скорость потока воздуха в трубе — 0,38 м<sup>3</sup>/с; эффективность местного отсоса — 0,9; эффективность общеобменной вентиляции — 0,5.

Санитарно-гигиеническая оценка использования припоев ПОС40 и 95,5Sn/4Ag/0,5Cu проведена для рабочей зоны (РЗ), где остаются 10% ЗВ, которые могут накапливаться в помещении в течение смены.

Концентрация ЗВ в рабочей зоне ( $Q_{p.z.}$ ) определяется как произведение максимально-разовых выделений ЗВ ( $q$ ), коэффициента «чистого» времени работы паяльником (0,5), доли ЗВ, выделяемой в помещение (0,1), эффективности общеобменной вентиляции (0,5), времени выделений (1 смена, 8 часов, 28 800 с), отнесенное к объему помещения (10 м<sup>3</sup>):

$$Q_{p.z.} = q \times 0,5 \times 0,1 \times 0,5 \times 28\,800/10, \text{ мг/м}^3.$$

Экологическая оценка применения тех же припоев проведена на ИЗА ( $Q_{a.v.}$ ), на котором выбрасывается 90% ЗВ, и определяется как произведение максимально-разовых выделений ЗВ ( $q$ ), коэффициента «чистого» времени работы паяльником (0,5), доли ЗВ, выбрасываемых в атмосферный воздух (0,9), отнесенное к объемной скорости потока воздуха в трубе (0,38 м<sup>3</sup>/с):

$$Q_{a.v.} = q \times 0,5 \times 0,9 / 0,38, \text{ мг/м}^3.$$

Результаты расчета приведены в таблице 2.

Таким образом, сравнительный анализ применения припоев ПОС40 и 95,5Sn/4Ag/0,5Cu показал экологическую безопасность использования в производстве бессвинцовых припоев. При применении припоя, содержащего свинец, при тех же условиях организации рабочего места на участке пайки не удастся достичь допустимых уровней ПДК ЗВ как в рабочей зоне, так и на выбросе ИЗА.

### Заключение

1. Утилизация узлов радиоэлектронной аппаратуры должна производиться на специализированных предприятиях. Поэтому вопросы попадания в почву и подземные воды свинца из аппаратуры, содержащей данный металл, являются дискуссионными и требуют дополнительных всесторонних исследований специалистов различного профиля совместно с экологами.

Результаты анализа концентрации загрязняющих веществ в почве в районе полигона ТБО и в населенном пункте (на расстоянии 1,5 км от полигона) показывают, что содер-

жание тяжелых металлов и микроэлементов не превышает нормы ПДК (по данным исследований сотрудников ЗАО НПФ «Овен»). В то же время следует отметить повышенную концентрацию цинка, кадмия, железа (общ.), свинца и хрома в самом населенном пункте по сравнению с полигоном ТБО.

2. Превышение ПДК свинца в окружающей среде связано, в первую очередь, с выбросом предприятий, выплавляющих свинец и производящих свинцовые припои, а также с выхлопными газами бензиновых автомобилей.

Отравление растений тяжелыми металлами происходит за счет выпадения токсичных металлов из атмосферы на поверхность листьев. По этому признаку лидирующее положение занимают кадмий и свинец.

3. При использовании свинцовых припоев источником загрязнения атмосферы свинцом является операция пайки в производстве изделий микроэлектроники (дискретные полупроводниковые изделия, печатные платы и т. д.). Уменьшить концентрацию свинца в рабочей зоне и выбросы в атмосферу при пайке свинцовыми припоями возможно за счет установления специальных фильтров очистки.

### Литература

1. Федеральный классификационный каталог отходов. Утвержден приказом Министерства природных ресурсов РФ № 786 от 02.12.2002.
2. Сборник нормативных документов по переработке, обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов. В 2 томах. Изд-во «Промэкознание». М., 1991.
3. Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления. СанПиН 2.1.7.1322-03. Минздрав РФ. М., 2003.
4. Дополнение к федеральному классификационному каталогу отходов. Утверждено приказом МПР РФ № 663 от 14.08.2003.
5. Карамзинов Ф. В., Русак О. Н., Гребенников С. Ф., Осенков В. Н. Безопасность жизнедеятельности: Словарь-справочник / Под общей редакцией С. Ф. Гребенникова. СПб.: Изд-во «Лань», 2001.
6. Безопасность деятельности: Энциклопедический словарь / Под ред. засл. деят. науки и техники РФ, д-ра техн. наук, проф. О. Н. Русака. СПб: Информационно-издательское агентство «ЛИК», 2003.
7. Методика проведения инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для автотранспортных предприятий (расчетным методом). Утверждена зам. министра транспорта РФ 28.10.1998.