

УДК 621.791.312.8

КУРЫНДИН Е.А., студент гр. ТБ-21М (НИУ «МИЭТ»)
Научный руководитель ЧЕЧЕРНИКОВ И.М. к.т.н., доцент,
(НИУ «МИЭТ»)
г. Москва

БЕРЕЖЛИВОЕ ПРОИЗВОДСТВО В ЭЛЕКТРОНИКЕ: МИНИМИЗАЦИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ ОТ АЭРОЗОЛЕЙ ПРИПОЯ

Современное бережливое производство в радиоэлектронной промышленности включает не только оптимизацию материальных потоков и снижение потерь, но и системную работу по улучшению условий труда. Одним из скрытых, но значимых факторов риска являются аэрозоли припоя, образующиеся при селективной пайке печатных плат. Мелкодисперсные частицы на основе свинца и олова способны длительно сохраняться в воздухе рабочей зоны, проникать в органы дыхания и вызывать профессиональные заболевания (интоксикацию, пневмокониозы). Традиционные системы местной вытяжки не всегда учитывают специфику локальных мини-волн и полидисперсный состав аэрозоля, что снижает их эффективность.

В данной работе на примере установки селективной пайки AST SEL-31D (рис. 1) показано, как инструменты бережливого производства (в первую очередь – концепция 5S в части организации рабочего пространства и стандартизации) могут быть дополнены инженерными решениями, направленными на минимизацию выделений аэрозоля припоя в воздух рабочей зоны. Основная цель – снижение профессионального риска операторов путём внедрения наилучших доступных технологий локализации вредных веществ [1].

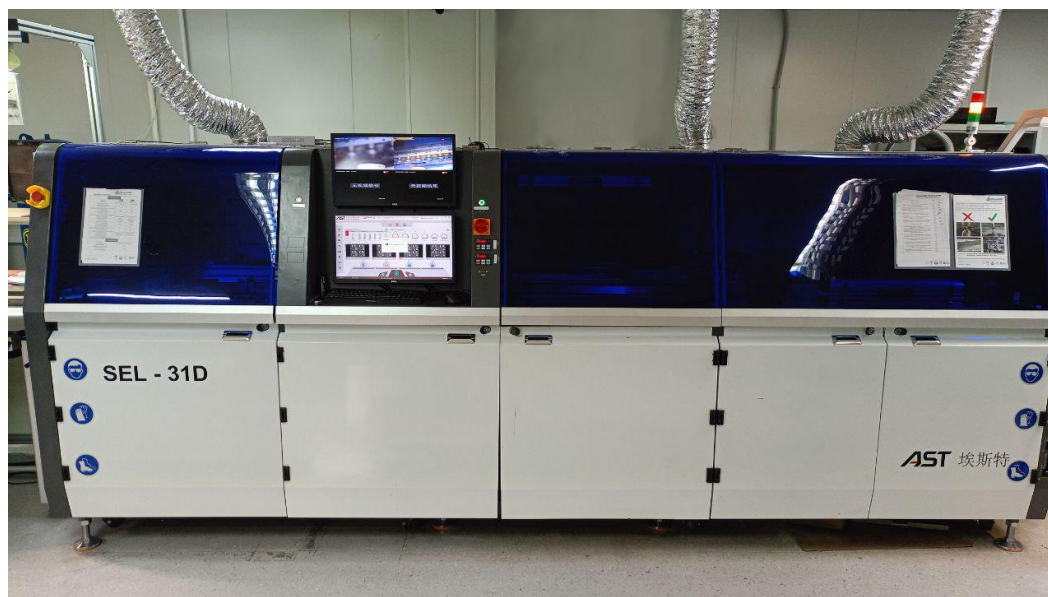


Рисунок 1. Установка селективной пайки AST SEL-31D (общий вид)

Селективная пайка реализуется путём локальной подачи мини-волны расплавленного припоя при температуре 260°C к контактным площадкам печатной платы. В процессе образуется многокомпонентный газоаэрозольный выброс, включающий твёрдые частицы припойного шлака (оксиды олова, свинца), продукты термодеструкции флюса и летучие органические соединения. Наибольшую опасность представляют частицы размером менее 10 мкм, которые практически не оседают под действием силы тяжести. Теоретический расчёт скоростей витания по формуле Стокса (с поправкой Каннинггема) показал, что для частиц диаметром 1 мкм скорость оседания составляет около 0,03 мм/с, для 10 мкм – 3 мм/с, тогда как частицы 50 мкм оседают со скоростью 75 мм/с. Таким образом, мелкая фракция способна длительно находиться во взвешенном состоянии и переноситься воздушными потоками в зону дыхания оператора.

Для оценки фактической концентрации аэрозоля в рабочей зоне проведены натурные измерения в двух точках (рис. 1) с помощью следующих средств измерения: аспиратор НП-3М, фильтры АФА-ВП-20, весы ХР2U с точностью 0,1 мкг.



Рисунок 2. Точки отбора проб, где точка 1 – рабочее место оператора у входного конвейера, точка 2 – положение лица оператора внутри камеры при наладке и чистке сопел.

Подготовка к отбору проб и сам отбор проводились в соответствии с ГОСТ Р 70378.1-2022 [2].

Комплект используемого оборудования для отбора проб удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 70230-2022 [3].

Результаты эксперимента (табл. 1) показали, что средняя концентрация припойного шлака в воздухе рабочей зоны с учетом погрешности используемых СИ составляет $0,1317 \pm 0,0165$ мг/м³.

Таблица 1. Масса и концентрация припойного шлака в воздухе рабочей зоны

Номер филь-тра	Масса шлака, мг10 ⁻⁵	Концентра-ция С, мг/м ³	Абсолютная погрешность Δx , мг/м ³	Относитель-ная погреш-ность δ_x , %	Положение фильтра
1	107	0,1158	-0,0159	12,1	Точка отбора 1
2	114	0,1234	-0,0083	6,3	
3	106	0,1147	-0,017	12,9	
4	111	0,1201	-0,0116	8,8	
5	109	0,1180	-0,0137	10,4	
6	115	0,1245	-0,0072	5,5	
7	108	0,1169	-0,0148	11,2	
8	112	0,1121	-0,0105	8,0	
9	104	0,1126	-0,0191	14,5	
10	115	0,1266	-0,0051	3,9	
11	128	0,1411	0,0094	7,1	Точка отбора 2
12	135	0,1488	0,0171	13,0	
13	127	0,1400	0,0083	6,3	
14	133	0,1466	0,0149	11,3	
15	130	0,1433	0,0116	8,8	
16	136	0,1499	0,0182	13,8	
17	125	0,1378	0,0061	4,6	
18	132	0,1455	0,0138	10,5	
19	134	0,1477	0,016	12,2	
20	127	0,1400	0,0125	6,3	
Среднее значение концентрации $\overline{C_{\text{эксп}}}$, мг/м ³				0,1317	
Средняя арифметическая погрешность измерений $\overline{C_{\text{эксп}}}$, мг/м ³				0,0125	
Приборная погрешность для среднего значения $\Delta C_{\text{приб}}$, мг/м ³				0,0109	
Общая абсолютная погрешность среднего $\Delta C_{\text{общ}}$, мг/м ³				0,0165	
Относительная погрешность общего среднего δ , %				12,5	

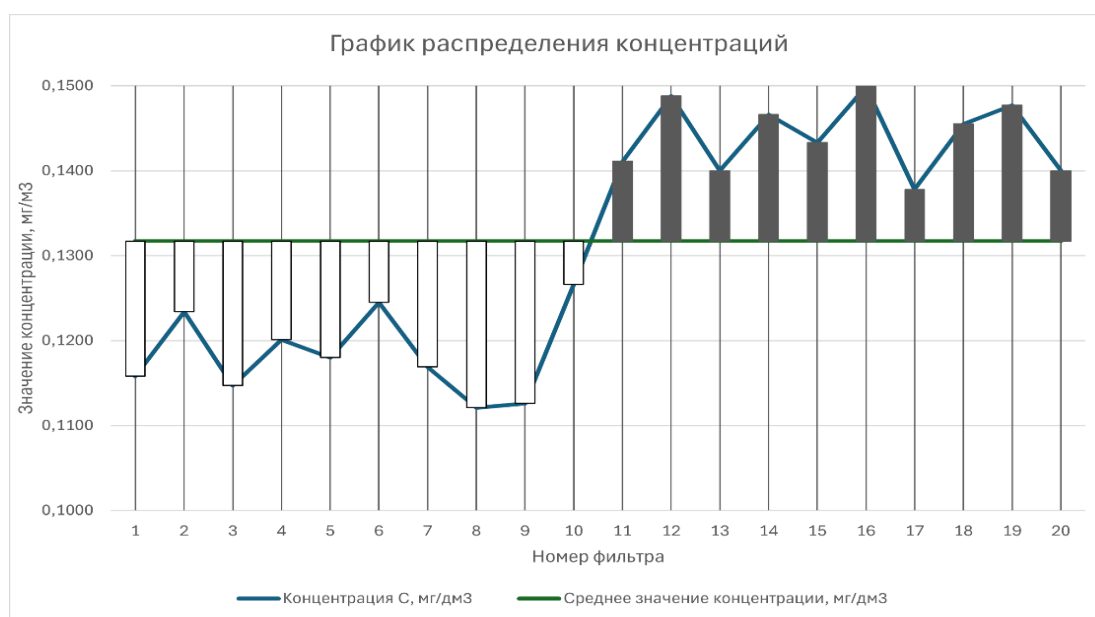


Рисунок 3. График распределения концентраций по 20 измерениям

Дополнительно массовая эмиссия припойного шлака оценена двумя расчётными методами. Используя расчетную инструкцию (методику), где представлены удельные показатели образования вредных веществ, для селективной пайки волной получена концентрация $0,120 \text{ мг/м}^3$; по балансу припоя (разница между добавленным в ванны припоем и припоем, ушедшим на заполнение монтажных отверстий изделий, за три месяца эксплуатации) – $0,116 \text{ мг/м}^3$. Сходимость трёх независимых методов (экспериментальный – $0,132 \text{ мг/м}^3$, расчётный – $0,120 \text{ мг/м}^3$ и балансовый – $0,116 \text{ мг/м}^3$) не превышает 13%, что подтверждает достоверность полученных параметров источника. Стоит также отметить, что все полученные значения превышают ПДК_{сс.рс} более, чем в 2 раза [4, 5].

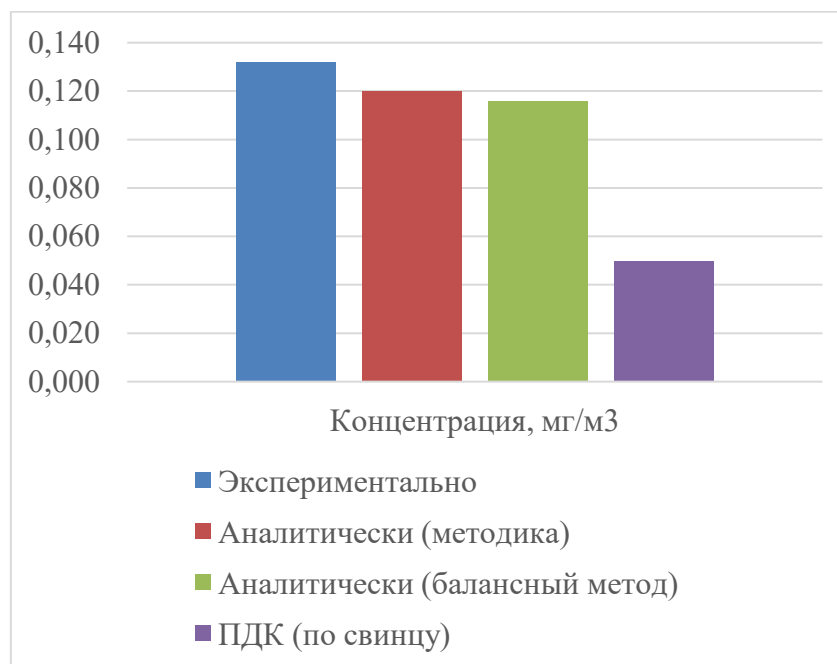


Рисунок 4. Значения концентраций, найденные различными методами

Штатная вытяжная система представляет собой рукава, подсоединенные от общеобменной вентиляции непосредственно к вытяжным отверстиям в установке селективной пайки, производительность которой в рассматриваемом участке вентиляционной сети составляет $375 \text{ м}^3/\text{ч}$. Анализ эффективности текущей вытяжной системы показал, что для частиц размером менее 10 мкм улавливание затруднено из-за быстрого падения скорости всасывания с расстоянием. На удалении $0,3 \text{ м}$ от вытяжного отверстия скорость воздуха снижается до $0,2 \text{ м/с}$, чего, несмотря на восходящий конвекционный поток от расплава припоя, недостаточно для улавливания мелких частиц.

В рамках бережливого производства и концепции 5S предлагается не только оптимизировать организацию рабочего места оператора, но и внедрить техническое решение – модернизацию текущей вытяжной системы. На основе аэродинамических характеристик частиц, а именно - преобладании мелких фракций и малых скоростей витания, обоснована необходимость установки бортового отсоса непосредственно под конвейером, по 2 шт. на каждый тигель (модуль пайки).

Исходя из характеристик применяемых мобильных вытяжных устройств с фильтрами тонкой очистки класса HEPA H13 предполагаемый расход воздуха на каждом из отсосов составит $350 \text{ м}^3/\text{ч}$, что увеличит общий воздухообмен в 3,73 раза.

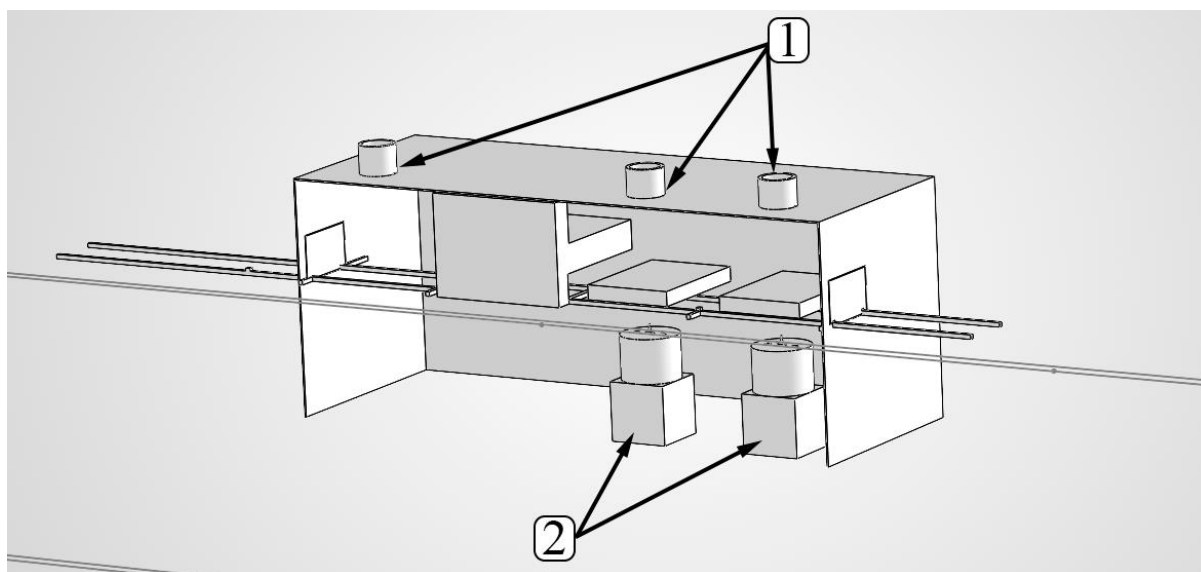


Рисунок 5. Модель УСП без вытяжной системы, где
1 – штатные вытяжные отверстия, 2 – тигли (модули пайки)

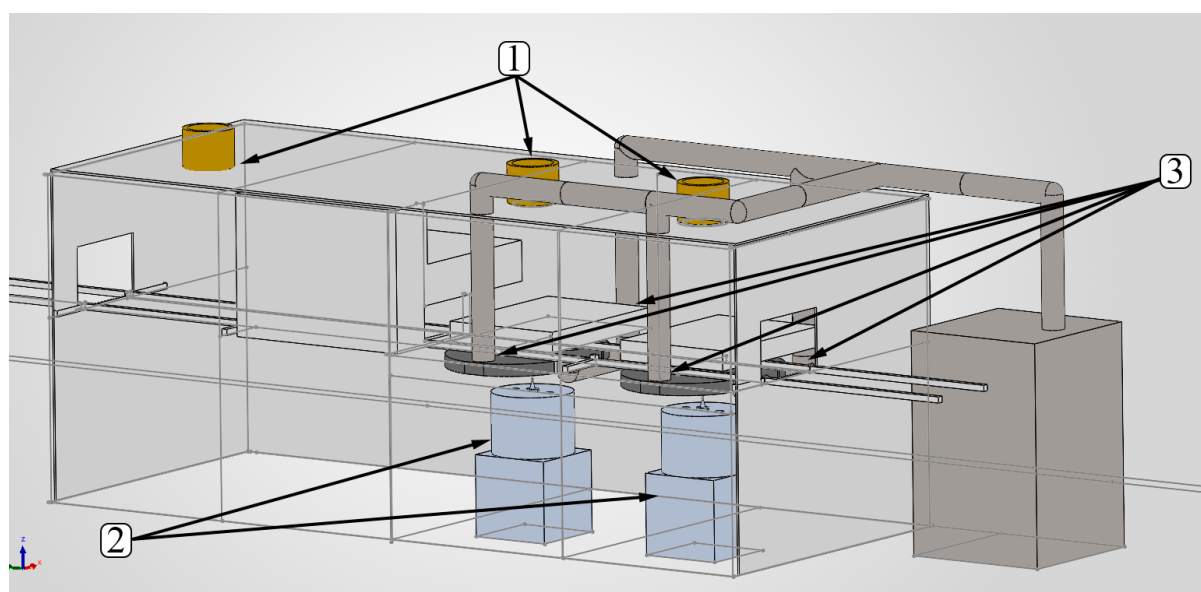


Рисунок 6. Модель УСП с добавленными бортовыми отсосами, где
1 – штатные вытяжные отверстия, 2 – тигли (модули пайки),
3 – бортовые отсосы, подсоединенные к механическому фильтру

Прогнозная оценка эффективности на основе расчёта воздухообмена показывает, что при расположении всасывающих отверстий непосредственно под конвейером, на расстоянии 100-200 мм от тиглей и увеличении суммарного расхода воздуха до $1775 \text{ м}^3/\text{ч}$ ожидается снижение концентрации припойного шлака в воздухе рабочей зоны оператора до $0,0245 \text{ мг}/\text{м}^3$. Это уменьшает ингаляционную нагрузку свинца в 5,38 раз, а само значение становится в 2,5 раза меньше

ПДК. Для полного соответствия нормативу рекомендуется дополнительное использование респираторов класса FFP2/FFP3 взамен текущих FFP1 при работах внутри камеры [5].

Внедрение предложенных мер в рамках lean-производства позволяет:

- снизить профессиональный риск заболеваний операторов;
- уменьшить загрязнение внутренних поверхностей оборудования (сокращение затрат на ручную очистку);
- стандартизировать подход к организации воздухообмена на участках селективной пайки.

Таким образом, в работе на примере установки селективной пайки AST SEL-31D показано, что сочетание lean-методологий 5S с инженерными решениями на основе экспериментально подтверждённых параметров позволяет значительно снизить концентрацию аэрозоля припоя. Предложенная конструкция бортового отсоса и режимные параметры обеспечивают прогнозируемое снижение профессионального риска на 438%. Разработанные рекомендации могут быть использованы при модернизации существующих и проектировании новых участков селективной пайки в радиоэлектронной промышленности.

Список литературы:

1. ГОСТ Р 56906-2016. Бережливое производство. Организация рабочего пространства (5S).
2. ГОСТ Р 70378.1-2022. Воздух рабочей зоны. Оценка характеристик пробоотборников, применяемых для определения содержания частиц аэрозоля.
3. ГОСТ Р 70230-2022. Качество воздуха. Методика определения массовой концентрации взвешенных частиц PM_{2.5}, PM₁₀ в воздухе рабочей зоны на основе анализа фракционного состава пыли.
4. Расчетная инструкция (методика). Удельные показатели образования вредных веществ, выделяющихся в атмосферу от основных видов технологического оборудования для предприятий радиоэлектронного комплекса.
5. ГН 2.2.5.691-98. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны: гигиенические нормативы.