

# Plug & Play:

## применение силовых модулей с предварительно нанесенной термопастой

**О применении теплопроводящих материалов написано много статей и руководств по эксплуатации [1–4], однако эта проблема продолжает привлекать внимание специалистов, работающих в сфере производства электронной техники. Большой интерес вызывает появление новых технологий и материалов с изменяемым фазовым состоянием (PCM), а также возможность их нанесения предприятием — изготовителем модулей.**

**Стефан Хопфе  
(Stefan Hopfe)**

**Арендт Винтрих  
(Arendt Wintrich)**

**Перевод и комментарии:  
Андрей Колпаков**

Andrey.Kolpakov@semikron.com

**К**омпания SEMIKRON предлагает в качестве опции поставку силовых модулей разных типов с предварительно нанесенными теплопроводящими материалами (Thermal Interface Material, TIM). Нанесение термопасты на базовую плату производится с помощью трафаретной печати. Для транспортировки компонентов, подготовленных таким образом, разработана специальная упаковка.

В качестве TIM используются материалы на силиконовой и несиликоновой основе. Самыми перспективными считаются новейшие пасты с улучшенными тепловыми характеристиками: PCM (Phase Change Material) HALA P8 (без силикона) для стандартных модулей с базовой платой и HPTP (High Performance Thermal Paste) на силиконовой основе для «безбазовых» модулей прижимного типа.

Данная опция обеспечивает следующие преимущества:

- Оптимальный отвод тепла, снижение теплового сопротивления благодаря равномерному распределению слоя TIM.
- Упрощение и ускорение процесса монтажа модуля.
- Снижение стоимости и ускорение процесса производства за счет исключения важного и сложного технологического этапа.
- Повышение экологичности производства.
- Снижение риска повреждения DBC-подложки.
- Обеспечение долговременной стабильности тепловых характеристик благодаря использованию проверенных и хорошо зарекомендовавших себя TIM.

### Основные особенности PCM

Теплопроводящие структуры с изменяемым фазовым состоянием (PCM) отличаются высокой теплопроводностью и простотой применения. При комнатной температуре такой материал находится в твердом состоянии, его переход в жидкую фазу происходит при нагреве. Это позволяет безопасно транспортировать силовые модули с нанесенным слоем PCM, который размягчается и заполняет зазор между базовой платой и радиатором в процессе

естественного нагрева (при эксплуатации или испытаниях).

Материал PCM HALA TPC-Z-PC-P8 наносится на базовую плату модуля с помощью металлического трафарета, при этом используется такая же технология, что и для термопасты Wacker P12. Разницу можно почувствовать, прикоснувшись к образовавшемуся слою: PCM при комнатной температуре по консистенции напоминает свечной воск.

От обычных термопаст с силиконовым носителем и металл-оксидным наполнителем PCM отличается более высокой теплопроводностью (примерно в три раза), его применение позволяет снизить тепловое сопротивление «корпус–радиатор»  $R_{th(c-s)}$  до 30%, «кристалл–радиатор»  $R_{th(f-s)}$  — до 15%. При нормальной температуре PCM представляет собой твердую субстанцию, поэтому риск его загрязнения или повреждения при транспортировке гораздо ниже. Однако, в свою очередь, это обуславливает более жесткие требования по последовательности и моменту затяжки крепежных винтов при монтаже модулей, поскольку возрастает риск повреждения керамической DBC-подложки.

### Особенности технологии

Нанесение термопасты в условиях завода-изготовителя производится в чистой среде, на автоматизированной линии методом шелкографии (SPC) или трафаретной печати. Количество TIM на поверхности модуля, как правило, указывается в документации под заголовком «typical thickness» (типовая толщина) или «typical weight» (типовой вес). Первое значение относится к случаю, когда модуль установлен на радиатор в соответствии с инструкцией по монтажу и термопаста равномерно распределена по его базовой поверхности. Если в спецификации указан вес, то это, как правило, бывает при использовании шаблона с неравномерным расположением отверстий. В таком случае невозможно определить необходимое количество TIM по толщине слоя, поскольку расчетное результирующее значение тол-

щины будет непостоянно в пределах всей базовой поверхности.

Тепловые сопротивления «кристалл-радиатор»  $R_{th(j-s)}$  для «безбазовых» и «корпус-радиатор»  $R_{th(c-s)}$  для обычных модулей с базовой платой, указанные в спецификациях SEMIKRON, действительны при использовании стандартной термопасты Wacker P12 (теплопроводность  $\lambda = 0,81 \text{ K/(Вт}\cdot\text{м)}$ ). Если применяется материал с изменяемым фазовым состоянием (PCM, теплопроводность  $\lambda = 3,4 \text{ K/(Вт}\cdot\text{м)}$ ) или высокопроизводительная термопаста НРТП (теплопроводность  $\lambda = 2,5 \text{ K/(Вт}\cdot\text{м)}$ ), то величина  $R_{th(c-s)}/R_{th(j-s)}$  будет снижаться. Поэтому в новых спецификациях SEMIKRON указывается два значения  $R_{th}$ .

Кроме того, у «безбазовых» модулей, таких как MiniSKiP, SKiM или SEMiTOP, номинальный ток  $I_C$  рассчитывается на основании теплового сопротивления  $R_{th(j-s)}$ . Соответственно в документации SEMIKRON будут приводиться два значения  $I_C$ : для стандартной пасты Wacker P12 и для высокопроизводительной НРТП.

Отметим, что теплопроводность  $\lambda$  здесь указана только для того, чтобы продемонстрировать разницу между различными вариантами ТИМ, и это не единственная причина снижения теплового сопротивления. Применение материала с более высокой теплопроводностью может даже привести к повышению  $R_{th}$ , если невозможно обеспечить минимальную толщину слоя или тепловая связь между ТИМ и поверхностью металла недостаточно хорошая (высокое контактное сопротивление).

### Характеристики ТИМ

#### PCM

HALA P8 (TPC-Z-PC-P8/Henkel Loctite PSX-Re) представляет собой компаунд, имеющий тестообразную структуру перед использованием. Применяется с помощью шелкографии или трафаретной печати. Нанесение сопровождается процессом нагрева, гарантирующим 100% испарение растворителя. При комнатной температуре паста PCM напоминает свечной воск, ее вязкость снижается при нагреве свыше +45 °С. При этой температуре материал начинает плавиться и «растекаться» под действием давления между радиатором и базовой платой, в результате чего зазор равномерно заполняется.

Характеристики:

- алюминиевые частицы в качестве теплопроводящего наполнителя;
- воск в качестве носителя;
- растворитель для обеспечения технологичности.

Материал PCM будет предлагаться только для модулей с базовой платой.

#### Термопаста

Нанесение с помощью шелкографии или трафаретной печати. Дополнительный нагрев не требуется.

Доступные виды ТИМ:

- Wacker P12: оксид цинка в силиконовом носителе;
- Electrolube НТС: оксид цинка в парафиновом носителе;

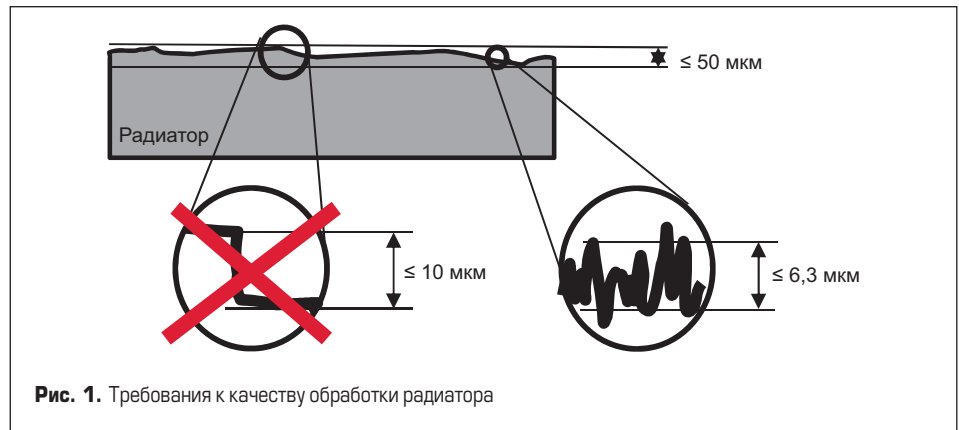


Рис. 1. Требования к качеству обработки радиатора

- НРТП (High Performance Thermal Paste): оксид цинка в силиконовом носителе. Характеристики:
  - металл-оксидные частицы в качестве теплопроводящего наполнителя;
  - силикон или парафин в качестве носителя;
  - без растворителей.
- Термопасты будут предлагаться только для «безбазовых» модулей.

### Технологические допуски

Процесс трафаретной печати имеет технологические допуски, количество и толщина слоя ТИМ может варьироваться в определенных пределах. Величины допусков по толщине и весу (min./max. Thickness, min./max. Weight) указываются в спецификациях. Благодаря использованию автоматизированной трафаретной печати возможны небольшие ошибки позиционирования, не имеющие влияния на процесс монтажа или тепловые характеристики. Кроме того, в процессе печати иногда возникают незначительные дефекты сотовой структуры пасты, максимально допустимое отклонение размеров ячеек составляет 5%. Также допускается небольшая подповерхностная миграция теплопроводящего материала между ячейками, что выявляется при оптическом контроле, но не влияет на тепловые свойства модуля и процесс его монтажа. Подробности см. в разделе «Допустимые и недопустимые дефекты структуры термопасты».

### Качество обработки радиатора

Чтобы добиться хорошего теплового контакта между модулем и радиатором, а также для получения оптимальных условий охлаждения

поверхность теплоотвода должна соответствовать требованиям инструкций по монтажу, доступных на сайте SEMIKRON для каждого семейства модулей (рис. 1). Рекомендуется фрезерование поверхности с применением твердосплавного инструмента, это обеспечивает наилучший результат и позволяет получить шероховатость порядка ~1–3 мкм. Основные требования:

- Радиатор должен быть очищен от грязи, пыли и обезжирен.
- Отклонение от плоскости не должно превышать 50 мкм на расстоянии 100 мм (DIN EN ISO 1101).
- Шероховатость Rz не должна превышать 6,3 мкм (DIN EN ISO 4287).
- На поверхности не должно быть «ступенек» с перепадом более 10 мкм.

### Квалификационные испытания

Теплопроводящие материалы проходят различные виды квалификационных испытаний для количественной оценки максимального срока годности при хранении и транспортировке модулей в блистерной упаковке и подтверждения надежности работы теплопроводящего слоя при эксплуатации модулей. ТИМ тестируются по стандарту IEC 60068-2-XX для определенных условий окружающей среды (например, высокая и низкая температура хранения в соответствии с IEC 60721-3-1) для минимального срока годности 12 мес., а также в соответствии с IEC 60749-49 при испытаниях на термоциклирование.

Виды квалификационных испытаний модулей с предварительно нанесенной пастой, а также условия хранения приведены в таблицах 1, 2 и 3.

Таблица 1. Типовые квалификационные испытания срока годности модулей с предварительно нанесенной термопастой внутри блистерной упаковки

Вид испытаний	Материалы		Стандарт
	P12 и НТС	P8 и НРТП	
Хранение при высокой температуре	+	+	IEC 60068-2-2 Bb
Хранение при низкой температуре	+	+	IEC 60068-2-1 Ab
Хранение при высокой температуре и влажности	+	-	IEC 60068-2-67
Климатические изменения	-	+	IEC 60068-2-38
Критерий годности	Величина $R_{th}$ после теста в пределах спецификации, монтаж в соответствии с инструкцией		-
Срок годности	18 мес. в блистере при температуре -25...+60 °C и 10-95% RH	12 мес. в блистере (класс 1K2) при температуре +5...+40 °C и 10-85% RH	IEC 60721-3-1

**Таблица 2.** Типовые квалификационные испытания для оценки надежности (модуль установлен на радиатор)

Вид испытаний	Материалы		Стандарт
	P12 и НТС	P8 и НРТП	
Хранение при высокой температуре	+	+	IEC 60068-2-2 Bb
Хранение при низкой температуре	+	+	IEC 60068-2-1 Ab
Хранение при высокой температуре и влажности	+	+	IEC 60068-2-67
Климатические изменения	+	+	IEC 60068-2-38
Активное термоциклирование	+	+	IEC 60749-34
Пассивное термоциклирование	+	+	IEC 60068-2-14 Na
Критерий годности	Измерение $R_{th}$ перед и после теста на хранение и термоциклирование. Критерий: величина $R_{th}$ в пределах спецификации, при термоциклировании окончание срока службы (EOL) соответствует $R_{th} + 20\%$		-

**Таблица 3.** Условия хранения материалов TIM

Материал	P12 и НТС	НРТП	P8
Условия хранения	18 мес. в блистере при температуре -25...+60 °C и 10-95% RH	12 мес. в блистере (класс 1K2) при температуре +5...+40 °C и 10-85% RH	
Макс. температура хранения и транспортировки*, °C	+55		
Макс. рабочая Температура $T_{op}^{**}$ , °C	+125		+110

**Примечание:** \* — Ограничено упаковкой. \*\* — В собранном состоянии. Для «безбазовых модулей»  $T_{op}$  измеряется на радиаторе, для обычных модулей — на базовой плате.

Модули с предварительно нанесенной термопастой рекомендуется хранить при комнатной температуре, в некоторых случаях требуется кондиционирование помещения склада.

**Особенности процесса производства**

**PCM**

Материал с изменяемым фазовым состоянием (PCM) HALA P8 на модулях с базовой платой имеет твердую структуру при транспортировке, паста начинает плавиться только при нагреве модуля в процессе тестирования или эксплуатации.

Загрязнения (пыль или любые частицы) могут быть легко удалены с поверхности модуля с PCM (в твердом состоянии), например с помощью кисти.

Повреждение структуры PCM при случайном прикосновении или установке модуля на радиатор невозможно.

**Термопаста**

TIM, наносимый на «безбазовые» модули, имеет пастообразное состояние. При их транс-

портировке и монтаже необходимо быть очень осторожным, чтобы не повредить TIM-слой. Основным преимуществом термопасты при использовании с «безбазовыми» модулями, по сравнению с PCM, является меньший риск повреждения DBC-подложки при сборке. Благодаря низкой вязкости TIM легко распределяется в зазоре во время монтажа, следовательно, уменьшается механическая нагрузка на подложку.

При монтаже модулей следует соблюдать осторожность: случайное прикосновение может разрушить структуру слоя TIM. Загрязнения (частицы) удаляются с поверхности модуля, например с помощью пинцета.

Чтобы избежать загрязнения поверхности модуля с нанесенной термопастой пылью и посторонними частицами, блистерная упаковка должна вскрываться перед установкой модуля в соответствии с инструкцией, приведенной далее. Количество модулей разных типов в упаковке указано в таблице 4.

Перед установкой модуля следует убедиться, что на радиаторе отсутствуют за-

**Таблица 4.** Количество модулей разных типов с TIM в блистерной упаковке

Тип модуля	Кол-во в блистерной упаковке, шт.
MiniSKiiP 0	66
MiniSKiiP 1	40
MiniSKiiP 2	24
MiniSKiiP 3	16
MiniSKiiP 8 AxB	16
MiniSKiiP 8 AC	12
SKiM63	4
SKiM93	4
SKiM4	4
SEMiTOP 2	56
SEMiTOP 3	35
SEMiTOP 4	20
SEMiTOP E1	28
SEMiTOP E2	20
SEMiX 3p	6
SEMiX 1	8
SEMiX 3	6
SEMiX 13	4
SEMiX 5	4
SEMiTRANS 3	6
SEMiTRANS 10	2

грязнения в виде любых инородных частиц или пыли. Для очистки поверхности рекомендуется использовать безворсовую салфетку, смоченную в изопропиловом спирте. Таким же образом можно удалять остатки термопасты или PCM с контактных поверхностей при замене модуля.

**Вскрытие блистерной упаковки, применение модулей с нанесенной термопастой**

- Вскрытие упаковки следует производить в чистом и свободном от пыли помещении.
- Блистер должен оставаться закрытым на время остановки производства, чтобы избежать загрязнения.
- Поверхность модуля с нанесенной пастой должна быть свободной от любых загрязнений, не допускается повреждение сотовой структуры TIM.
- Крупные посторонние частицы (видные невооруженным глазом) следует удалить с помощью пинцета.

Перед сборкой необходимо провести оптический контроль всех деталей. В случае обнаружения загрязнений или любых повреждений структуры TIM следует обратиться к технической документации и проверить, насколько это допустимо (подробности см. далее).

При выемке модулей из блистерной упаковки и их дальнейшем использовании нужно соблюдать все правила по защите электронных компонентов от статического электричества (IEC 61340-5). Перенос и монтаж модулей следует производить только в специальных ESD-перчатках.

Для удаления модулей MiniSKiiP из блистерной упаковки рекомендуется повернуть упаковку таким образом, чтобы были видны пружинные контакты (верхняя сторона модулей, рис. 2 и 3). Упаковку модулей



**Рис. 2.** Модули MiniSKiiP и SKiM 63/93 перед вскрытием блистерной упаковки

SKiM63/93 (рис. 2 и 3) перед вскрытием надо повернуть так, чтобы была видна изолирующая подложка с нанесенной термопастой.

**PCM**

Материал с изменяемым фазовым состоянием будет наноситься только на модули с базовой платой. Вид сотовой структуры слоя ТИМ зависит от технологического изгиба базовой платы (рис. 4). Это обеспечивает необходимый прямой контакт «металл-металл» базы и радиатора после установки модуля. Теплопроводящий материал должен заполнять только воздушные пустоты, возникающие из-за неидеальности поверхностей модуля и радиатора. Таким образом, решаются две основные задачи:

- оптимизация теплового сопротивления  $R_{th(j-s)}$ ;
- исключение необходимости повторной затяжки крепежных винтов после распределения пасты PCM в зазоре.

Для каждого семейства модулей (SEMITRANS, SEMiX) на сайте www.semikron.com доступна инструкция по монтажу (Mounting Instruction). В ней определены моменты затяжки крепежных винтов, действительные как для обычных термопаст, так и для PCM.

После монтажа модуля на радиатор и его нагрева свыше +45 °С (при тестировании или эксплуатации) PCM начинает размягчаться и заполнять воздушные полости в зазоре.

Результаты:

- установка модуля в соответствии с инструкцией по монтажу;
- равномерное распределение теплопроводящего материала в зазоре;
- отсутствие необходимости в повторной затяжке крепежных винтов.

Ниже показан типовой вид базовой платы с нанесенной пастой PCM HALA P8:

рис. 5 — перед монтажом;

рис. 6–8 — после монтажа и термоциклирования.

**Порядок действий:**

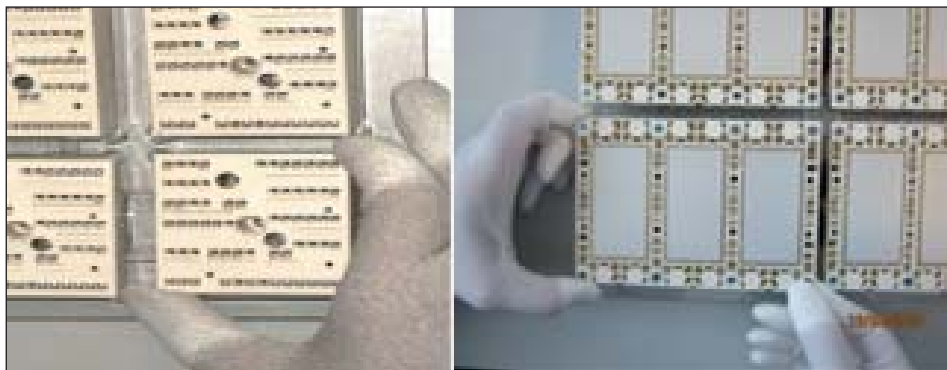
- Модуль устанавливается на радиатор в соответствии с инструкцией по монтажу.
- Сборка подвергается воздействию трех термоциклов +20/+90 °С:

**Вариант 1:**

Установить радиатор с модулем, например, на нагреваемую пластину и быстро увеличить температуру до +90 °С. При достижении этого значения сборка снима-



**Рис. 5.** Типовой вид базовой платы с нанесенной пастой PCM перед монтажом



**Рис. 3.** Изъятие модулей MiniSKiIP и SKiM 63/93 из упаковки



**Рис. 4.** Сотовая структура PCM в соответствии с технологическим изгибом базовой платы

ется с пластины и охлаждается до ~20 °С. Процедура повторяется минимум два раза.

**Вариант 2:**

Нагрузить модуль 50–80% от номинального тока до нагрева базовой платы до +90 °С. Затем охладить ее до ~+20 °С.

В обоих случаях PCM будет плавиться и равномерно заполнять зазор между базой и радиатором.

**Оценка качества заполнения зазора:**

- Демонтировать модуль и аккуратно снять его с теплоотвода. Для модулей с базовой платой не обязательно, чтобы ТИМ распространялся по всей поверхности базы. Только в центральной части модуля сотовая струк-

тура должна исчезнуть, что говорит о хорошем распределении термопасты (рис. 6).

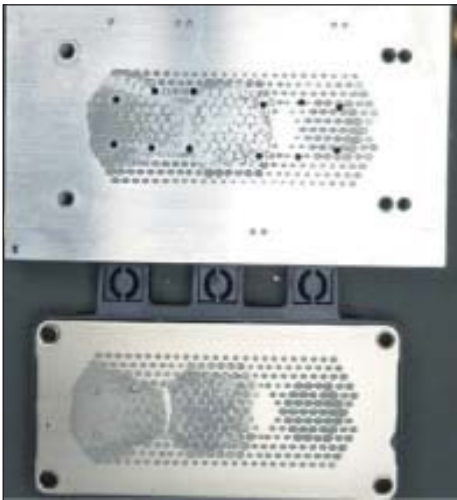
- Особенно важно убедиться в том, что термопаста отсутствует вокруг монтажных отверстий и на краях модуля, что подтверждает наличие контакта «металл-металл». При этом обеспечивается оптимальное тепловое сопротивление и не требуется повторная затяжка крепежных винтов.
- На рис. 7 показан неоптимальный вид слоя термопасты после демонтажа модуля: ТИМ не полностью распределен по поверхности после трех термоциклов. Важно, что наибольший изгиб базовой платы под чипами



**Рис. 6.** След термопасты на демонтированном модуле и радиаторе после трех термоциклов +20/+85 °С (оптимальный вариант)



**Рис. 7.** След термопасты на демонтированном модуле и радиаторе после трех термоциклов +20/+85 °С (не оптимально, но допустимо)



**Рис. 8.** След термопасты на демонтированном модуле и радиаторе после трех термоциклов +20/+85 °С (недопустимо)

заполнен термопастой, и ячейки сотовой структуры соприкоснулись с поверхностью радиатора. Дальнейший нагрев и термоциклирование в процессе работы модуля обеспечат необходимое распределение РСМ в зазоре.

- На рис. 8 показан неприемлемый отпечаток пасты после демонтажа модуля. Несмотря на воздействие трех термоциклов, ТИМ не заполнил изгиб базы в достаточной степени. Видна большая часть ячеек сотовой структуры.

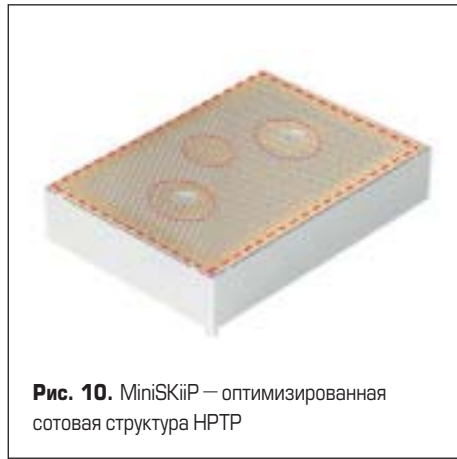
**Термопаста**

Термопаста будет наноситься только на модули без базовой платы. Для стандартных материалов ТИМ (Wacker P12, Electrolube НТС) используется регулярная сотовая структура (рис. 9). Целью является равномерное распределение слоя ТИМ в зазоре между DBC-подложкой и радиатором при отсутствии воздушных зазоров.

Модуль должен быть установлен в соответствии с инструкцией по монтажу. После сборки термопаста равномерно распределяется в зазоре и заполняет пустоты, возникающие из-за неидеальности поверхности подложки и радиатора.



**Рис. 9.** MiniSKiiP — регулярная сотовая структура — стандартный вариант ТИМ



**Рис. 10.** MiniSKiiP — оптимизированная сотовая структура НРТР

Усовершенствованная паста НРТР имеет большую вязкость, чем Wacker P12 и Electrolube НТС. Для снижения механической нагрузки при монтаже модуля в зоне крепления уменьшена плотность сотовой структуры ТИМ (рис. 10).

**Результаты:**

- Модуль устанавливается на радиатор в соответствии с инструкцией по монтажу.
- Оптимизация сотовой структуры ТИМ позволяет использовать одинаковую технологию монтажа независимо от типа термопасты.

Ниже показан типовой вид подложки «безбазового» модуля с нанесенной термопастой рис. 11 — перед монтажом; рис. 12–14 — после монтажа и термоциклирования.



**Рис. 11.** Типовой вид подложки «безбазового» модуля с нанесенной термопастой перед монтажом

**Порядок действий:**

- Модуль устанавливается на радиатор в соответствии с инструкцией по монтажу.
- Сборка подвергается воздействию трех термоциклов +20/+90 °С:

**Вариант 1:**

Установить радиатор с модулем, например, на нагреваемую пластину и быстро увеличить температуру до +90 °С. При достижении этого значения сборка снимается с пластины и охлаждается до ~20 °С. Процедура повторяется минимум два раза.

**Вариант 2:**

Нагрузить модуль 50–80% от номинального тока до нагрева базовой платы до +90 °С. Затем охладить ее до ~+20 °С.

В обоих случаях ТИМ будет равномерно заполнять зазор между базой и радиатором.

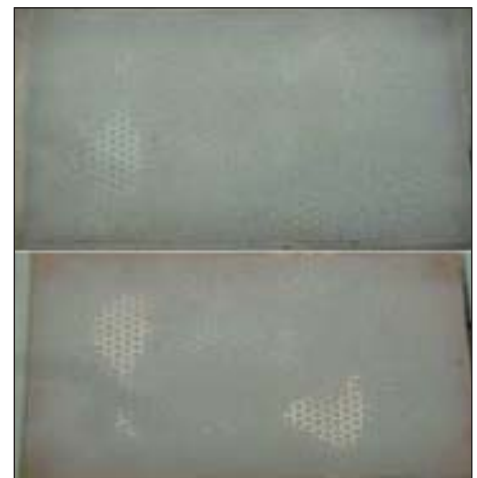
**Оценка качества заполнения зазора:**

- Демонтировать модуль: удалить крепежные винты и подождать 24 ч, пока модуль может быть легко снят без риска разделения DBC-подложки и корпуса. Абсолютно необходимо, чтобы основная часть поверхности подложки (кроме краев с углублениями) и охлаждаемая зона были покрыты ТИМ. Все ячейки сотовой структуры должны касаться поверхности радиатора, еще лучше, если они полностью исчезают.
- Оптимальный отпечаток термопасты приведен на рис. 12: ячейки сотовой структуры, ТИМ распределен равномерно, без воздушных пустот. Любые заметные воздушные зазоры увеличивают тепловое сопротивление и приводят к дополнительному нагреву чипа во время работы.

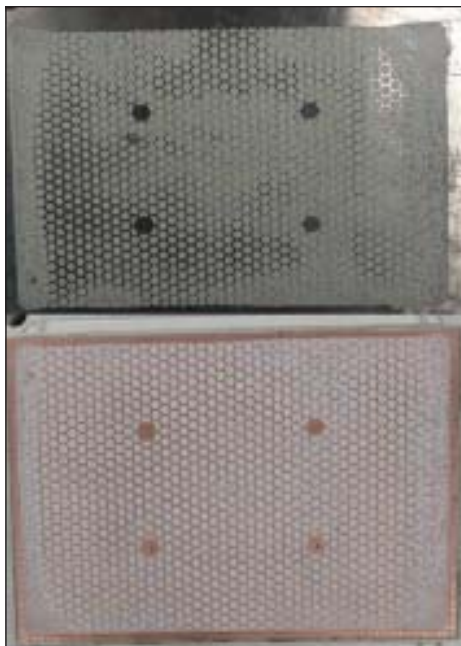


**Рис. 12.** След термопасты на демонтированном модуле и радиаторе после трех термоциклов +20/+85 °С (оптимально)

- На рис. 13 показан приемлемый, но не оптимальный вид отпечатка. В некоторых зонах ячейки сотовой структуры все еще сохранились, но видно, что они уже коснулись теплоотвода. Можно предположить, что в течение следующих 10 термоциклов воздушные пустоты полностью исчезнут.



**Рис. 13.** След термопасты на демонтированном модуле и радиаторе после трех термоциклов +20/+85 °С (не оптимально, но допустимо)



**Рис. 14.** След термопасты на демонтированном модуле и радиаторе после трех термоциклов +20/+85 °С (недопустимо)

- Неприемлемый вид отпечатка термопасты виден на рис. 14. Большие участки сотовой структуры не имеют контакта с радиатором, и, скорее всего, никакое воздействие термоциклов не устранит воздушные зазоры.

Если после описанных выше процедур отпечаток термопасты демонстрирует недостаточный тепловой контакт модуля и радиатора (рис. 8 и 14), в первую очередь это может быть связано с плохим качеством поверхности тепловода (рис. 1). Основным критерием правильности выполнения всех требований является соответствие теплового сопротивления «кристалл–радиатор»  $R_{th(j-s)}$  величине, указанной в технической документации.

### Начало эксплуатации

#### PCM

После установки модуля на радиатор, согласно инструкции по монтажу, можно начинать его эксплуатацию без каких-либо ограничений.

Тепловое сопротивление  $R_{th(j-s)}$  модуля сразу после монтажа будет выше номинального значения, соответствующего равномерному распределению PCM в зазоре. Процесс плавления



**Рис. 16.** Положение этикетки на транспортной упаковке



**Рис. 15.** Типовое изменение теплового сопротивления в процессе релаксации

начинается при нагреве +45 °С, после чего величина  $R_{th(j-s)}$  падает очень быстро, поэтому перегрев кристаллов не может превысить расчетных значений, соответствующих нормальной эксплуатации при номинальной нагрузке.

Тем не менее, благодаря эффектам релаксации и распределения, тепловое сопротивление будет немного уменьшаться в ходе начальной фазы нагрева/охлаждения. Окончательное значение  $R_{th(j-s)}$  обычно достигается после первых 50–100 термоциклов.

Таким образом, для нормальной эксплуатации модулей с предварительно нанесенным материалом PCM не требуется никаких специальных мер (определенный профиль нагрузки или термотренировка). Исключением может быть случай, когда силовой модуль подвергается воздействию высокой перегрузки в момент первого пуска.

#### Термопаста

После установки модуля с базовой платой на радиатор, согласно инструкции по монтажу, можно начинать его эксплуатацию без каких-либо ограничений. Теплопроводящая паста равномерно распределяется в зазоре сразу после монтажа. Начальная величина теплового сопротивления  $R_{th(j-s)}$  примерно на 15–20% выше номинального значения.

Благодаря «эффекту установления» тепловое сопротивление улучшается по экспоненциальному закону с течением времени.

Окончательное, стационарное значение  $R_{th(j-s)}$  достигается спустя несколько дней эксплуатации (рис. 15). «Насосные» тепловые эффекты, индуцированные, например, воздействием термоциклов, ускоряют процесс установления.

После установки модуля рекомендуется выполнить один из шагов, предложенных ниже:

1. Выждать один-два дня перед применением модуля при полной нагрузке.
2. Подвергнуть модуль воздействию трех термоциклов с перепадом температуры радиатора +20...+90 °С.
3. Подвергнуть модуль воздействию трех термоциклов с перепадом температуры радиатора +20...+90 °С и ограничению максимального тока на уровне 70–80% от номинального значения, что позволяет обеспечить максимальную нагрузочную способность.

#### Примечание:

Справочное значение  $R_{th(j-s)}$  измеряется после воздействия трех термоциклов (+20...+90 °С). Это соответствует времени релаксации два-пять дней.

### Правила маркировки и упаковки

На транспортной упаковке не указано, поставляются ли модули с предварительно нанесенной термопастой, или без нее. Этикетка дает информацию только о типе модуля, количестве и номере заказа (рис. 16 и 17).



**Рис. 17.** Информация на этикетке 1. Логотип SEMIKRON. 2. Название модуля. 3. Dat. Cd (Дата-код), шесть цифр в формате YYWWL (YY – год, WW – неделя, L – номер партии). 4. Номер подтверждения отгрузки (Order Confirmation). 5. Menge (QTY): количество модулей в упаковке (входит в QR-код). 6. Id.-Nr.: каталожный номер SEMIKRON (входит в QR-код), QR-код (штрих-код) выполняется по стандарту EEC 200 в формате 19/9

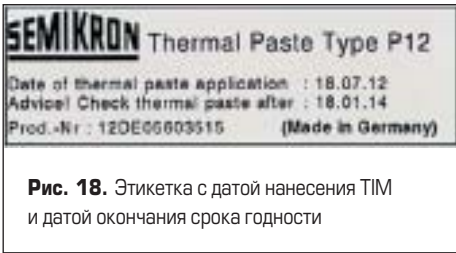


Рис. 18. Этикетка с датой нанесения ТИМ и датой окончания срока годности



Рис. 19. Предупреждение о нанесенной термопасте и вскрытии упаковки только перед установкой модулей



Рис. 20. Положение этикетки на блистерной упаковке

**Маркировка блистерной упаковки**

При поставке модулей с «предварительно нанесенным теплопроводящим материалом» на блистерную упаковку (рис. 20) наклеиваются две этикетки: в первой дается информация о дате нанесения термопасты и сроке годности (рис. 18), вторая предупреждает о недопустимости раннего вскрытия блистера (рис. 19).

**Допустимые и недопустимые дефекты структуры термопасты**

Процесс нанесения термопасты контролируется в автоматизированном режиме,

что обеспечивает стабильное и воспроизводимое качество трафаретной печати. Несмотря на все меры предосторожности, возможны некоторые нарушения сотовой структуры или ее загрязнение. Оценка их допустимости производится с помощью таблиц 5 и 6.

**Заключение**

Процесс применения термопасты является ответственной технологической операцией, от которой во многом зависит надежность работы силового ключа, поэтому многие производители в качестве опции предлагают поставку модулей с предварительно нанесенным теплопроводящим материалом. Такая возможность существенно упрощает

процесс монтажа и обеспечивает его высокую повторяемость, что позволяет заказчику исключить сложные и ответственные производственные этапы.

Модули с нанесенной пастой проходят дополнительные испытания, подтверждающие надежность при транспортировании и хранении. При нанесении ТИМ в заводских условиях используются очень жесткие технологические нормы, исключающие появление воздушных пустот (минимальный предел) и отсутствие зон контакта «металл–металл» (максимальный предел). Соблюдение столь точных допусков может быть достигнуто только при полностью автоматизированном контроле с использованием новейших оптических измерительных средств. Подобные системы способны контролировать качество сотовой структуры ТИМ даже при поступательном и вращательном изменении положения модуля. Для их работы используется принцип высокоскоростного 3D-распознавания образов, позволяющий фиксировать мельчайшие отклонения размеров или наличие перемычек между сотами.

**Литература**

1. S. Hopfe, A. Wintrich. Thermal Interface Materials». SEMİKRON Technical Explanation. 2016-12-21.
2. Freyberg M. Application of thermal paste for power modules without base plate. SEMİKRON International. 1999.
3. А. Колпаков. Возвращаемся к термопасте // Силовая электроника. 2015. № 2.
4. А. Колпаков. Теплопроводящая паста — это важно! // Компоненты и технологии. 2010. № 6.

Таблица 5. Допустимые отклонения при шелкографии или трафаретной печати

Описание дефекта	Вид дефекта	Допустимость дефекта
незначительные дефекты структуры печати (небольшие пустоты)		Допустимо
деформированные края ячеек		Допустимо
небольшая подповерхностная миграция		Допустимо
точечные вмятины на ячейках		Допустимо

Таблица 6. Дефекты, возникающие при изъятии из упаковки или при сборке

Описание дефекта	Вид дефекта	Допустимость дефекта
«смазывание» небольшого числа ячеек		Допустимо
Загрязнения с частицами, например, волос или волокон (removable with tweezers), могут удаляться пинцетом		Недопустимо
		Недопустимо
«смазывание» целых областей или большого числа ячеек (The application of a new TIM layer is recommended); рекомендуется нанесение нового слоя ТИМ		Недопустимо