

# ***Montaż w elektronice i mikrosystemach***

***Andrzej DZIEDZIC, bud. M-11 (ul. Długa 61), p. 116  
e-mail: [andrzej.dziedzic@pwr.edu.pl](mailto:andrzej.dziedzic@pwr.edu.pl)***

**+**

***Krzysztof STOJEK, bud M-6 bis (ul. Długa 61), p. 41  
e-mail: [krzysztof.stojek@pwr.edu.pl](mailto:krzysztof.stojek@pwr.edu.pl)***

## ***Program kursu***

- 1. Wprowadzenie – cele montażu elektronicznego***
- 2. Poziomy i technologie montażu***
- 3. Podłoża. Płytki obwodów drukowanych***
- 4. Projektowanie obwodów drukowanych***
- 5. Podzespoły bierne do montażu powierzchniowego i przewlekanego***
- 6. Podzespoły czynne i ich obudowy do montażu powierzchniowego i przewlekanego***
- 7. Montaż drutowy***
- 8. Montaż flip chip***
- 9. Podstawy procesu lutowania, stopy i pasty lutownicze***
- 10. Technologie lutowania***

## ***Program kursu (cd.)***

***11. Wady połączeń lutowanych***

***12. Kleje i montaż klejami***

***13. Połączenia i złącza***

***14. Narażenia środowiskowe; problemy odprowadzania ciepła***

## **14. Narażenia środowiskowe; problemy odprowadzania ciepła (13)**

**Urządzenia elektroniczne mają zdolność to przetwarzania energii pobranej ze źródła na energię użyteczną  $P_U$  oraz energię cieplną  $P_T$ . Energia cieplna jest konsekwencją przepływu prądu elektrycznego  $I$  przez rezystancje danego podzespołu  $R$ , a wydzielana ilość ciepła  $Q$  [J] dla prądu stałego wynosi:**

$$Q = U I t = I^2 R t.$$

**Im energia cieplna (straty) jest mniejsza, tym sprawność energetyczna urządzenia jest większa:**

$$\eta_{UE} = \frac{P_U}{P_E} 100\% = \left( 1 - \frac{P_T}{P_E} \right) 100\%$$

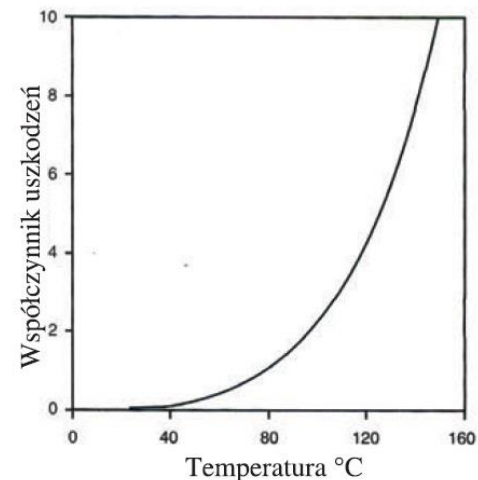
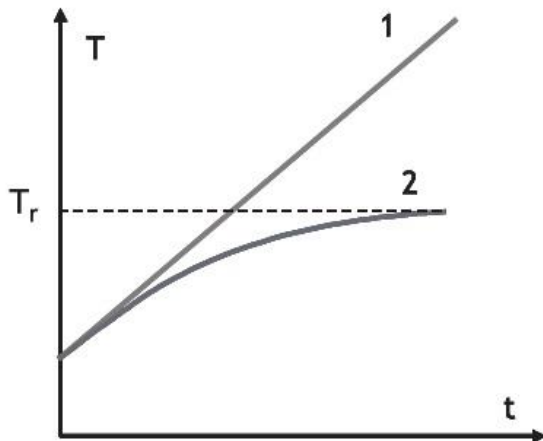
**Zwykle energia cieplna w formie strat nie przekracza kilkudziesięciu procent, a dotyczy większości elementów – głównie rezystorów, ale także innych pasywnych (kondensatory i cewki) i aktywnych elementów (procesory, LEDy).**

**Temperatura układu po jego uruchomieniu wzrasta właśnie w skutek wydzielania ciepła (strat). Podnoszenie temperatury układów następuje aż do momentu ustabilizowania w wyniku oddawania ciepła do otoczenia.**

# 14. Narażenia środowiskowe; problemy odprowadzania ciepła (14)

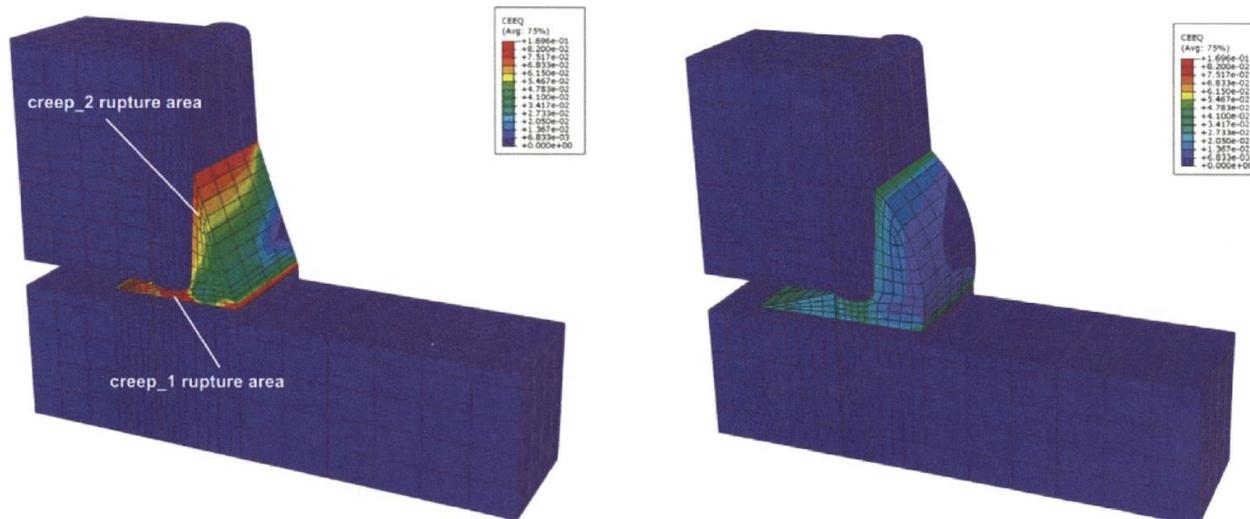
W układzie pominięcia/eliminacji mechanizmów oddawania ciepła temperatura elementów dąży do nieskończoności, natomiast dzięki mechanizmom **promieniowania (radiacji)**, **unoszenia (konwekcji)** czy **przewodnictwa cieplnego (kondukcja)** możliwe jest oddawanie ciepła do otoczenia, co prowadzi do ograniczenia wzrostu temperatury układów.

Trendy miniaturyzacji (zwiększenie upakowania – wzrost liczby elementów aktywnych na jednostkę powierzchni) oraz coraz szybsza praca urządzeń (taktowanie procesorów w częstotliwościach sięgających gigaherców) powodują powstawanie zapotrzebowania na coraz bardziej rozmaite rozwiązania technologiczne pozwalające na obniżenie temperatury podzespołów ponieważ zbyt wysoka temperatura elementów może powodować ich uszkodzenia, a także uszkodzenia połączeń.



# 14. Narażenia środowiskowe; problemy odprowadzania ciepła (15)

O ile w montażu elektronicznym w praktyce możliwe jest stosowanie materiałów niwelujących w pewnym stopniu możliwość powstawania uszkodzeń (underfill/moulding), o tyle w fazie projektowania możliwe jest wykonywanie analiz polegających na wykonaniu symulacji numerycznych naprężeń cieplnych. Jedną z najczęściej stosowanych metod i zwykle w pełni wystarczająca jest **metoda elementów skończonych** (Finite Element Method, FEM). Na obrazach poniżej przedstawiono połączenie lutowane pomiędzy elementem, a PCB. W przypadku mniejszej ilości spoiwa widoczne są obszary o dużych wartościach naprężeń. Mimo, że oprogramowanie może być dosyć drogim narzędziem, to tańsze z punktu widzenia konstruktora może okazać się niż przeprowadzania dużej ilości testów statystycznych, co wiąże się z kosztami wytworzenia takich układów.

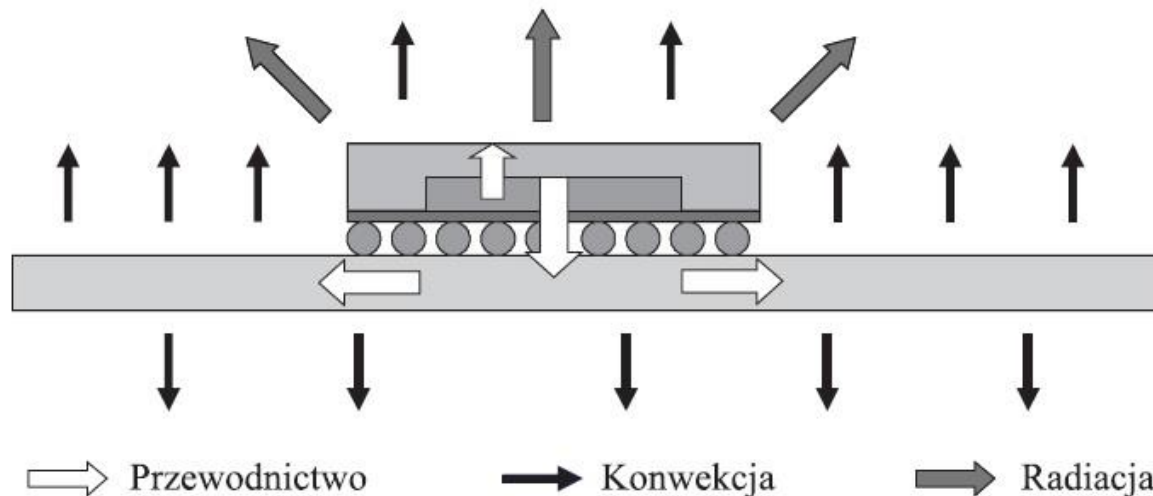


# 14. Narażenia środowiskowe; problemy odprowadzania ciepła (16)

Jak wspomiano już we wcześniejszych wykładach, w fizyce rozróżniane są trzy **PODSTAWOWE** mechanizmy transportu ciepła:

- przewodzenie (**kondukcja**)
- unoszenie (**konwekcja**)
- promieniowanie (**radiacja**).

Możliwe jest dostosowanie wpływu każdego z tych mechanizmów do zadanego poziomu obniżania temperatury układów/urządzeń, a stopień ich wpływu może zależeć od stosowanych technik. Problemy odprowadzania ciepła dotyczą wszystkich poziomów montażu, a celem jest dążenie do minimalizacji temperatur układów.



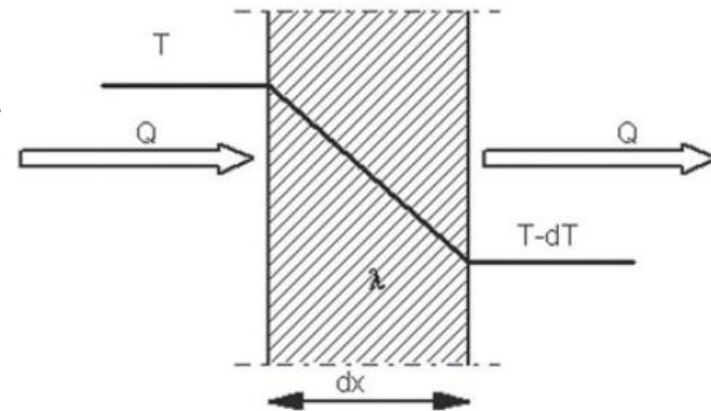
## 14. Narażenia środowiskowe; problemy odprowadzania ciepła (17)

**Przewodzenie cieplne (kondukcja)** – mechanizm transportu energii cieplnej polegający na przenoszeniu energii w warunkach gradientu temperatur. Jest związane z transportem poprzez swobodne elektrony (**efekt elektronowy** – zwykle dotyczy metali) lub poprzez drgania sieci krystalicznej (**efekt fononowy** – zwykle dla niemetalu). Możliwe jest współzachodzenie obu mechanizmów, a ilość energii transportowanej jest ich sumą.

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_f$$

**Prawo Fouriera** – prawo fizyczne mówiące, że dla jednokierunkowego przepływu ciepła w warunkach ustalonych strumień ciepła  $Q$  [W] jest proporcjonalny do współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  [W/m·K] i powierzchni przekroju  $A$  na pewnej drodze  $x$  w czasie  $T$ . W równaniu występuje też znak minus w wyniku gradientu odwrotnego do przepływu ciepła, a strumień cieplny musi posiadać wartość dodatnią:

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dx}$$





## 14. Narażenia środowiskowe; problemy odprowadzania ciepła (18)

**Unoszenie (konwekcja)** – mechanizm transportu energii cieplnej zachodzący w ośrodkach płynnych (ciecze + gazy) na drodze mikroskopowego przemieszczania się cząstek ośrodka, które przekazują ciepło między sobą, a także przemieszczają się. Ilość ciepła  $Q$  transportowanego na drodze konwekcji z powierzchni  $A$  jest proporcjonalna do różnicy temperatur tej powierzchni  $T_s$ , a ośrodkiem  $T_a$ . Równanie uwzględnia też współczynnik konwekcyjnego przekazywania ciepła  $h$ , a strumień ciepła (ilość  $dQ$  przekazana w czasie  $dt$ ) wyrażany jest wzorem:

$$\frac{dQ}{dt} = hA(T_s - T_a)$$

Współczynnik przekazywania ciepła  $h$  jest zależny od wielu czynników i jest określany dla konkretnego medium, materiału i stanu powierzchni.

Rozróżnić możemy dwa podstawowe rodzaje konwekcji:

- **Swobodna** – ruch płynu wywołany różnicami gęstości, a więc ciśnienia w wyniku różnic temperatury, np. kubek z gorącym napojem.
- **Wymuszona** – ruch płynu wywołany czynnikami zewnętrznymi, np. wentylatory.

## 14. Narażenia środowiskowe; problemy odprowadzania ciepła (19)

**Promieniowanie (radiacja)** – mechanizm transportu energii cieplnej polegający na emisji fal elektromagnetycznych. Nie wymaga ośrodka – w elektronice są montowane tzw. radiatory, podstawowy mechanizm obniżania temperatury układów w warunkach obniżonego ciśnienia np. satelity w kosmosie, gdzie nie ma gazów, które mogą przekazywać ciepło na drodze konwekcji). Emisja promieniowania skutkuje obniżeniem temperatury podzespołu. Ciała posiadające zdolność do takiej emisji promieniowania posiadają też zdolność do absorpcji promieniowania emitowanego przez otaczające elementy – następuje pewna wymiana promieniowania. Zatem obniżanie temperatury podzespołu jest możliwe jedynie na tej drodze jeżeli jego temperatura jest wyższa niż obiektów otaczających. Energia cieplna emitowana z powierzchni  $A$  opisywana jest wzorem:

$$\frac{dQ}{dt} = \sigma A (\varepsilon_1 T_1^4 - \varepsilon_2 T_2^4),$$

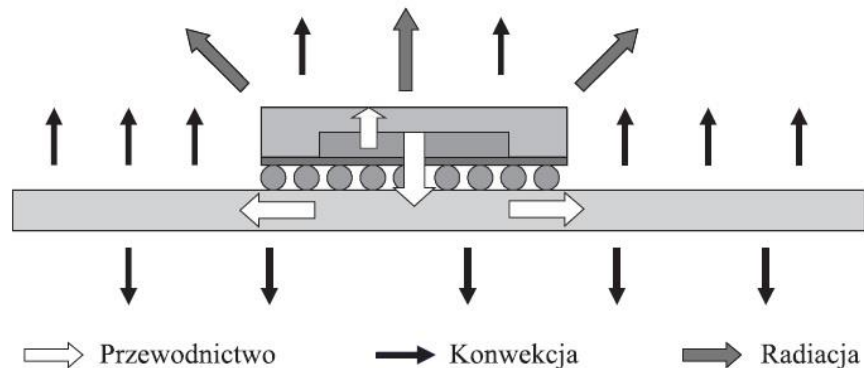
gdzie:  $\sigma$  – stała Stefana–Boltzmann (stała promieniowania ciała doskonale czarnego) i wynosi  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ,  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$  - współczynniki emisyjności (w zakresie od 0 do 1),  $T_1$  i  $T_2$  – temperatury powierzchni w kelwinach [K] ciała odpowiednio emitującego i ciała absorbującego.

## 14. Narażenia środowiskowe; problemy odprowadzania ciepła (20)

*Stosowanie chłodzenia może być zatem celowym działaniem mającym na celu obniżenie temperatury aparatury elektronicznej, a sprowadza się do transferu ciepła od jego źródła do odbiornika. Docelowo transport ciepła w elektronice dotyczy odprowadzenia ciepła do otoczenia. W układzie na poniższym rysunku efektywność odprowadzania ciepła będzie mała ze względu na:*

- *Przewodnictwo ograniczone przez małą powierzchnię kontaktów*
- *Radiacja przy niskich temperaturach jest znikoma*
- *Konwekcja jest również ograniczona przez małą powierzchnię.*

*Konieczne może być odpowiednie projektowanie drogi transportu ciepła.*



## 14. Narażenia środowiskowe; problemy odprowadzania ciepła (21)

*W elektronice znane jest zjawisko podobieństwa transportu ciepła w odniesieniu do właściwości elektrycznych elementów, tj. prawa Ohma. Jeżeli:*

- *odpowiednikiem natężenia prądu elektrycznego  $I$  jest strumień ciepła  $Q$ ,*
- *odpowiednikiem spadku napięcia  $\Delta U$  jest różnica temperatur  $\Delta T$ ,*

*to*

- *odpowiednikiem rezystancji elektrycznej  $R$  jest rezystancja cieplna  $\Theta_\lambda$ .*

*Zatem dla odpowiedników wartości elektrycznych do termicznych otrzymujemy:*

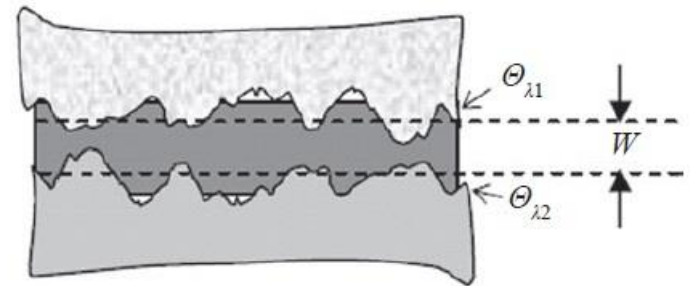
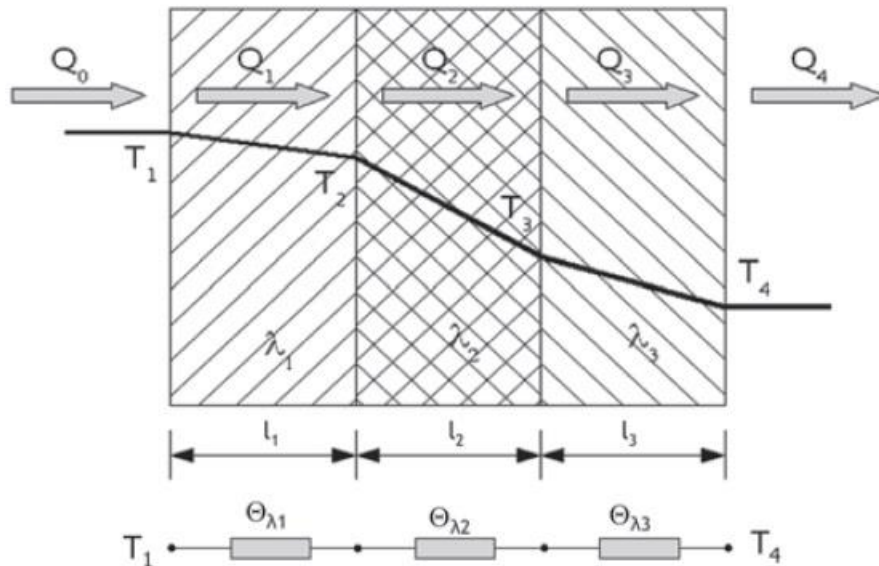
$$I = \frac{\Delta U}{R} \rightarrow Q = \frac{\Delta T}{\Theta_\lambda}$$

*Natomiast w konsekwencji obowiązywania prawa Fouriera możemy wyznaczyć rezystancję cieplną  $\Theta_\lambda$ :*

$$Q = \frac{\Delta T}{\Theta_\lambda} = \lambda A \frac{\Delta T}{l} \rightarrow \Theta_\lambda = \frac{l}{\lambda A}$$

## 14. Narażenia środowiskowe; problemy odprowadzania ciepła (22)

W typowych układach elektronicznych ciepło zwykle transportowane jest przez wiele warstw różnych materiałów, co naturalnie możemy odnieść do szeregu rezystancji elektrycznych w typowych układach. W takiej sytuacji możemy zauważyć, że w objętości (grubości) każdej warstwy nastąpi pewien spadek temperatury, ale także na ich styku – na granicy warstw kontaktu. Możliwe jest zatem stosowanie materiałów (dobrze przewodzących ciepło) wypełniających szczeliny na granicy powierzchni łączonych celem zwiększenia powierzchni kontaktu.



## 14. **Narażenia środowiskowe; problemy odprowadzania ciepła (23)**

**Materiały wspomagające transport ciepła na granicy łączonych powierzchni nazywane są materiałami złączy cieplnych (**Thermal Interface Materials, TIM**). Muszą mieć dwie podstawowe cechy:**

- **Składać się z materiałów o wysokich współczynnikach przewodności cieplnych**
- **Dostosowywać swój kształt do kształtu powierzchni łączonych.**

**Stosowanymi technikami, które muszą być dobrymi przewodnikami ciepła oraz tworzyć wytrzymałe mechanicznie połączenie są zwykle **lutowanie i klejenie**. Natomiast materiały, które wymagają innego sposobu łączenia to:**

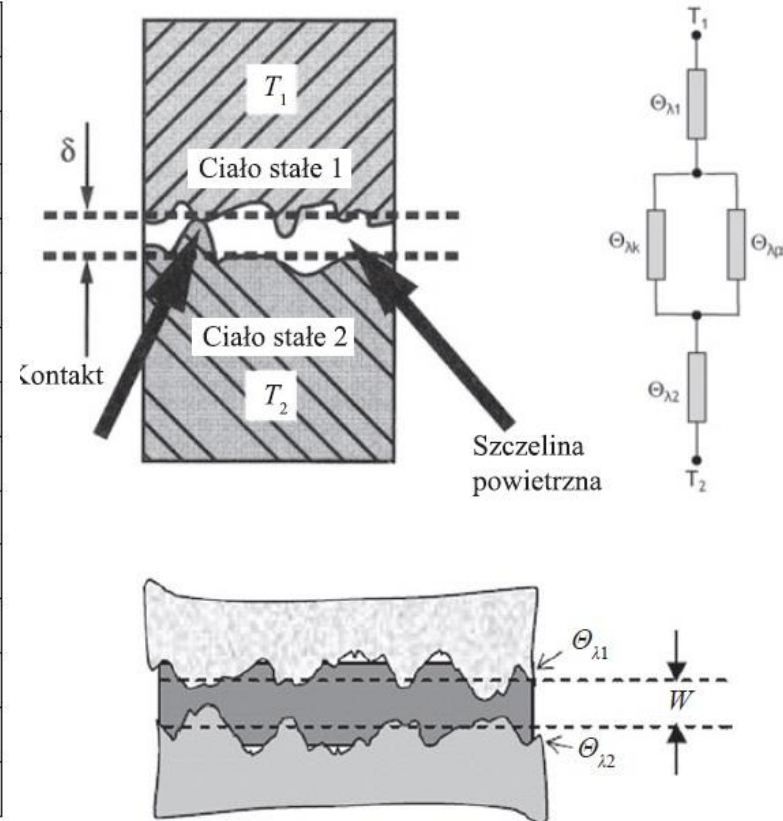
- **Pasty cieplnie przewodzące** (zawiesina cząstek metali w matrycy organicznej – duża lepkość)
- **Materiały żelowe**
- **Stopy metali** - tworzące połączenie w wyższych temperaturach
- **Taśmy i folie** – połączenie formowane pod wpływem dużego nacisku powodujące odkształcenie plastyczne



# 14. Narażenia środowiskowe; problemy odprowadzania ciepła (24)

**Stosowanie różnych materiałów może usprawnić transport ciepła właśnie poprzez różne wartości przewodności cieplnej  $\lambda$  oraz dokładne wypełnienie przestrzeni między łączonymi powierzchniami.**

Material	$\lambda$ [W/(m·K)]	$\lambda/\lambda$ powietrza
Powietrze	0,024	1
Żywica epoksydowa	0,23	9,6
Kompozyt przewodzący na bazie żywicy	0,35	14,6
Poliimid	0,33	13,8
FR4	0,30	12,5
Woda	0,59	24,6
Pasta przewodząca termicznie	1,10	46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,0	916
Aluminium	150	6250
Krzem	120	5000
Miedź	300	12500
Złoto	401	16708
Srebro	429	17875
Diament syntetyczny	2000	83330



# 14. Narażenia środowiskowe; problemy odprowadzania ciepła (25)

Możliwe jest zatem projektowanie drogi przepływu ciepła poprzez zastosowanie każdego z omawianych mechanizmów transportu ciepła – stosowanie materiałów TIM (przewodnictwo cieplne), radiatorów (promieniowanie + konwekcja swobodna), a także wentylatorów (konwekcja wymuszona), a ich stosowanie zależy od warunków pracy urządzenia.

