



Elektroniczna Aparatura Medyczna 2019

Mateusz Moderhak

Informacje:

-
-
- https://www.youtube.com/watch?time_continue=72&v=cQ54GDm1eL0
- <https://www.youtube.com/watch?v=us5h2HNbCuo>
-

Termografia



Ciepło?

- Ciepło – jeden z dwóch, obok pracy, sposobów przekazywania energii wewnętrznej układowi termodynamicznemu. Jest to przekazywanie energii chaotycznego ruchu cząstek (atomów, cząsteczek, jonów)
- Wymiana ciepła – jeden ze sposobów (obok pracy) przekazywania energii pomiędzy układami termodynamicznymi

Wymiana ciepła:

Wymiana ciepła zachodzi na jeden z trzech sposobów:

- **przewodzenie ciepła** polega na przekazywaniu energii przez bezładny ruch cząsteczek i ich zderzenia,
- **konwekcja** (unoszenie ciepła) na skutek przemieszczania się masy płynu (cieczy lub gazu):
 - *naturalna (swobodna)* – samoczynny ruch płynu wskutek różnicy gęstości wynikającej z różnicy temperatury
 - *wymuszona* – ruch płynu wywołany jest czynnikami zewnętrznymi (pompa, wentylator itp.)
- **promieniowanie cieplne** polega na przenoszeniu energii przez promieniowanie elektromagnetyczne emitowane w wyniku cieplnego ruchu cząsteczek. Wymiana ciepła przez promieniowanie nie wymaga obecności ośrodka pomiędzy ciałami, między którymi ciepło jest wymieniane, czyli może zachodzić przez próżnię.



Promieniowanie cieplne?

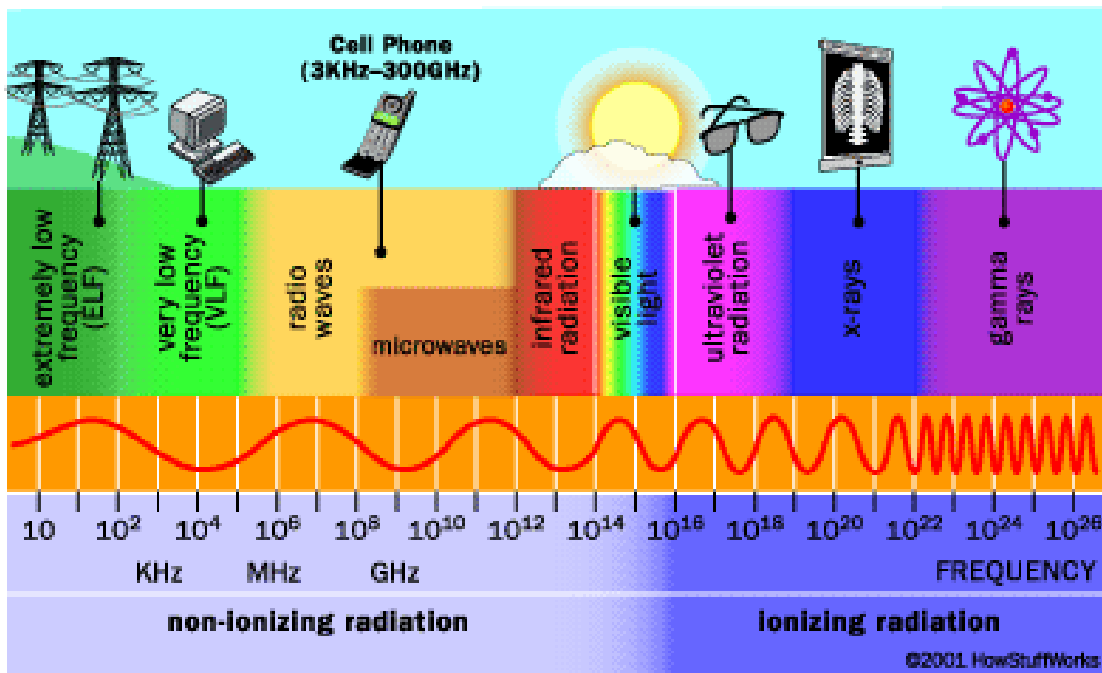
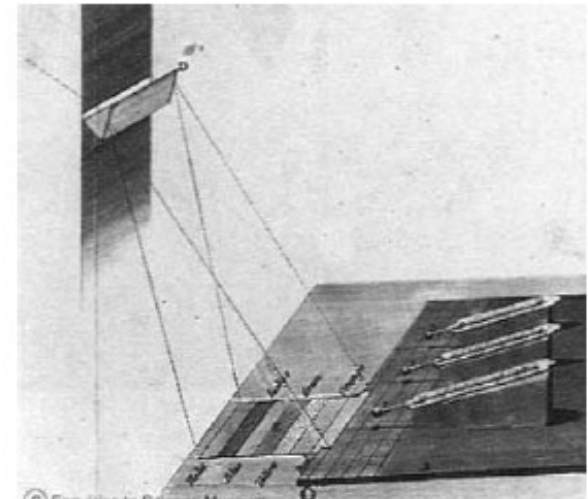


FIGURE 10. Portrait of William Herschel.



FIGURE 11. Herschel's experiment leading to discovery of infrared radiation: (a) thermometer placed in shadow near red side of color spectrum; (b) prism used by Herschel.

(a)



(b)



Prawa fizyki

- Prawo Plancka:

$$W_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}$$

- Prawo Stefana-Boltzmana:

$$W = e\sigma T^4$$

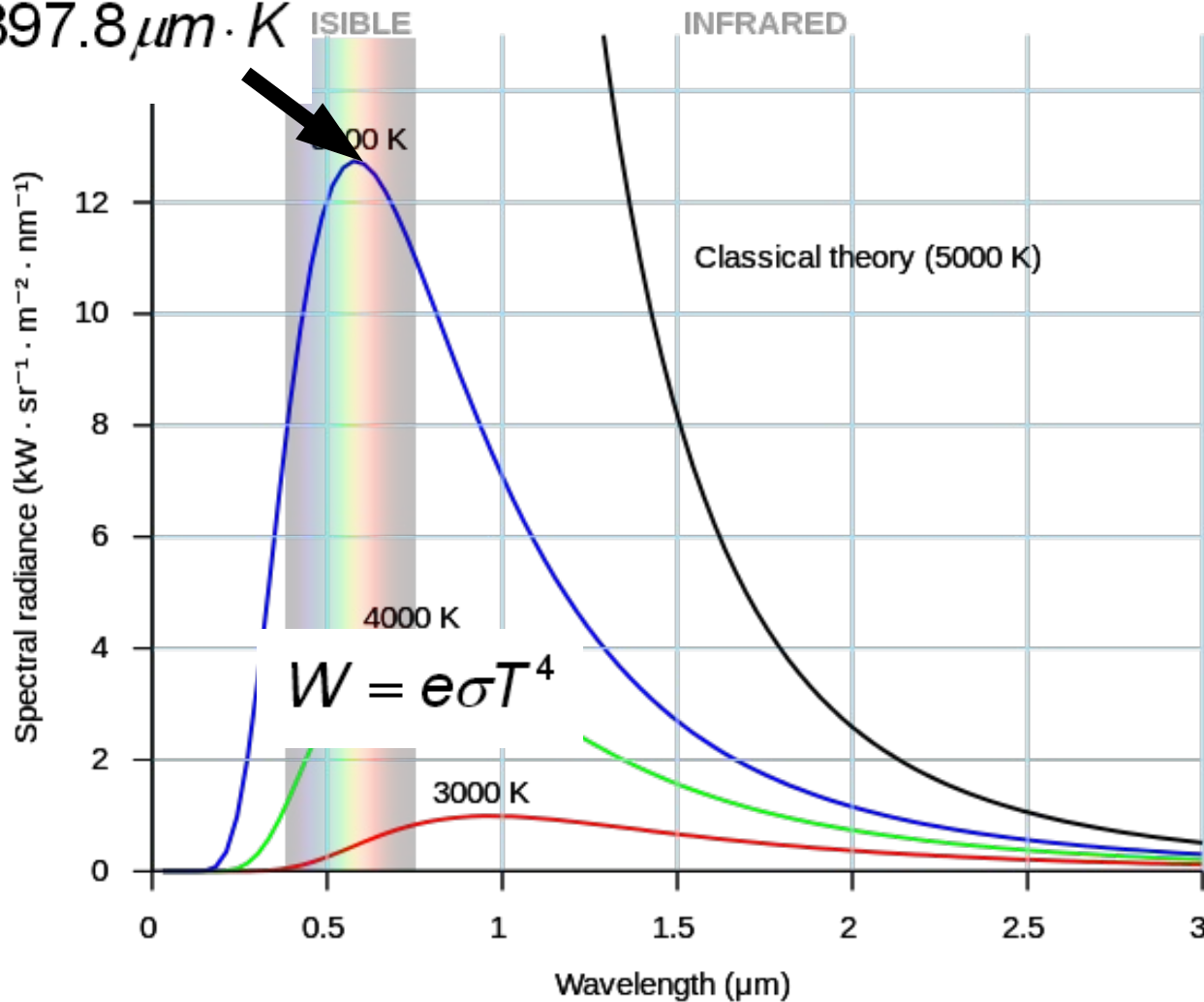
- Prawo Wiena:

$$\lambda_m T = 2897.8 \mu m \cdot K$$

Prawo Plancka

$$W_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}$$

$$\lambda_m T = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

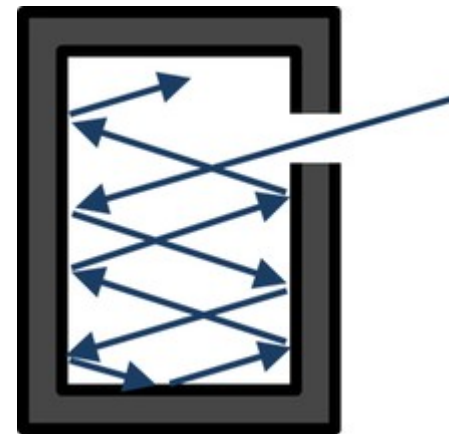




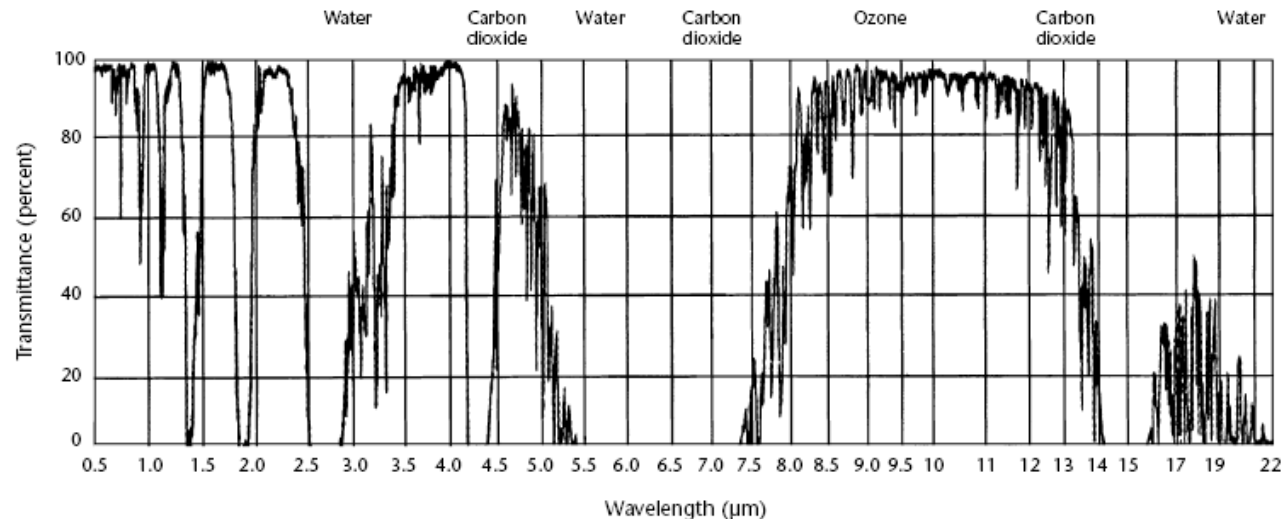
$$\lambda_m T = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Ciało doskonale czarne

Współczynnik emisyjności = 1



Termografia

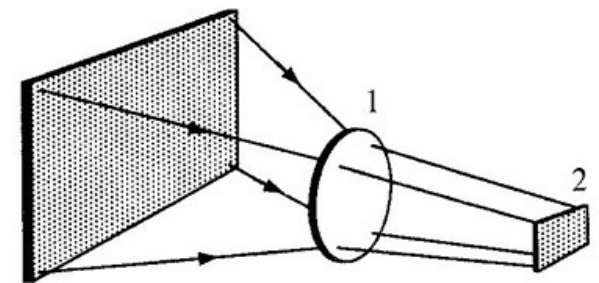


W termografii dysponujemy dwoma rodzajami kamer rejestrujących promieniowanie w dwóch różnych pasmach promieniowania podczerwonego. Są to kamery pracujące w średnim zakresie widma podczerwieni 3 μm – 5 μm (MWIR – Medium Wave InfraRed) oraz w paśmie dalekiej podczerwieni 8 μm – 12 μm (LWIR – Long Wave InfraRed). W przypadku pomiarów temperatury ciał żywych, których temperatura wewnętrzna nie przekracza 316 K (co odpowiada 42°C) uzasadnione wydaje się być użycie kamer dalekiej podczerwieni, ze względu na większą ilość promieniowania emitowanego przez ciało w tej temperaturze w paśmie LWIR – Prawo Plancka.

Detektory FPA - Focal Plane Array

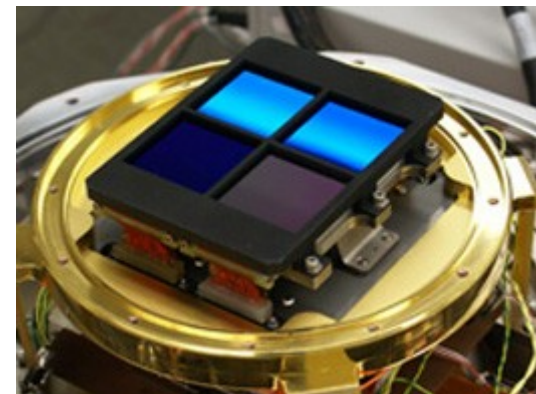
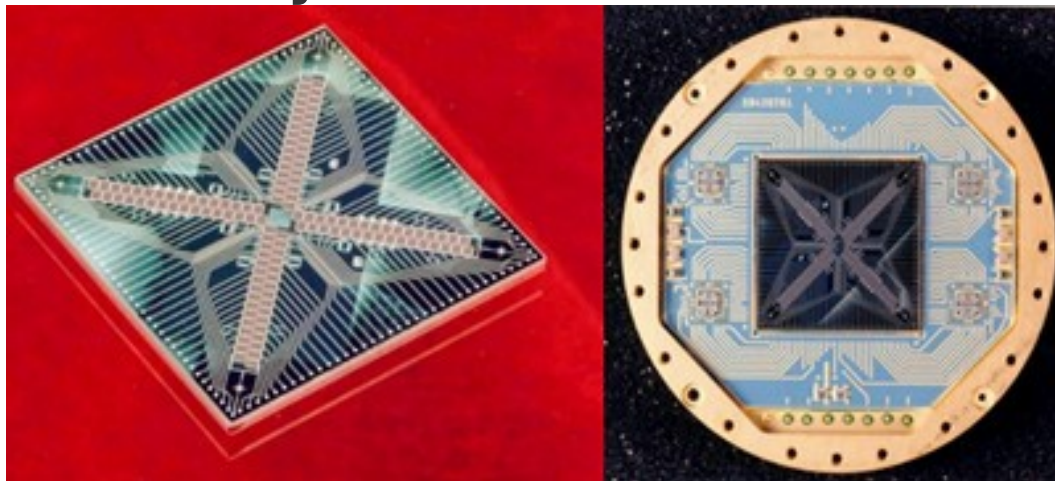
Detektory termiczne -

wykorzystują efekt ogrzewania się „piksela” w matrycy FPA, szeroki zakres widmowy. Niezbędna filtracja w układzie optycznym kamery dostosowująca do pasma docelowego.



Detektory fotonowe -


zasada



Detektory termiczne

Detektory bolometryczne – są to rezystory o bardzo małej pojemności cieplnej i dużym ujemnym współczynnikiem temperaturowym zmian rezystancji. Pod wpływem mierzonego promieniowania zmieniają swoje rezystancje. Bolometry metaliczne, wykonywane z cienkich folii lub z naparowanych warstw niklu, bizmutu lub antymonu, są stosowane do chwili obecnej. Ich cechą charakterystyczną jest to, że mogą pracować w temperaturze pokojowej. Budowane są, też detektory bolometryczne półprzewodnikowe, nadprzewodzące oraz ferroelektryczne.

Detektory termoelektryczne – są zbudowane na bazie termostosu (układ szeregowo połączonych termoelementów). Złącze pomiarowe jest połączone z elementem fotoczułym, na który pada promieniowanie podczerwone. Pod wpływem zaabsorbowanego promieniowania wzrasta temperatura powierzchni aktywnej od T do $T + \Delta T$, powodując nagrzanie złącza. Różnica temperatur złącza powoduje powstanie siły termoelektrycznej.



Piroelektryk – materiał mający zdolność generowania siły elektromotorycznej pod wpływem zmian temperatury.

W odróżnieniu od zjawiska termoelektrycznego, do wystąpienia efektu piroelektrycznego nie jest konieczny gradient temperatury, ale wystarczy ogrzanie całego kryształu. Efekty piroelektryczności są możliwe do dostrzeżenia tylko na kryształach, które są dobrymi izolatorami. Po ustaleniu się temperatury kryształ stopniowo rozładowuje się na skutek upływu ładunku.

Detektory termiczne

Detektory piroelektryczne – są zbudowane z półprzewodników, w których może wystąpić tzw. „zjawisko piroelektryczne”.

Cechą odróżniającą je od innych typów detektorów termicznych jest to, że są czułe na szybkości zmian temperatury, a nie na jej wzrost.

Dlatego w kamerach termowizyjnych należy zastosować specjalne przesłony wibrujące z częstotliwością 25(30) lub 50(60) Hz. Powodują one, że porównywany jest poziom promieniowania padającego na dwa sąsiednie detektory (piksele). Jeżeli występuje różnica natężenia promieniowania, wówczas generowany jest sygnał pozwalający na zobrazowanie występujących różnic. Jeżeli różnica nie występuje, wówczas brak jest także reakcji detektora. Ta cecha powoduje, że niekiedy wykorzystywane są one również jako czujniki (detektory) ruchu. Detektory te występują jako niechłodzone w kamerach obserwacyjnych.

Detektory fotonowe:

Detektory fotoprzewodzące – (zwane fotorezystorami) są to detektory z tzw. wewnętrzną emisją fotoelektryczną. Padające promieniowanie podczerwone powoduje zmianę rezystancji fotorezystora. Zmiany przewodnictwa są mierzone na kontaktach elektrycznych dołączonych do płytki detektora. Zwykle jest stosowana poprzeczna geometria fotorezystorów, gdy padające promieniowanie jest prostopadłe do kierunku prądu polaryzującego. Mierzony sygnał stanowi zmianę napięcia na rezystorze obciążenia włączonego w szereg z detektorem. W przypadku detektorów o dużej rezystancji preferowany jest obwód stało-napięciowy, a sygnał pomiarowy stanowi prąd w obwodzie detektora.

Detektory fotoemisyjne – są to detektory z tzw. zewnętrzną emisją fotowoltaiczną. Zjawisko fotoemisji polega na emisji elektronów z materiału na zewnątrz (z fotokatody do wolnej przestrzeni) w wyniku wybicia go przez padający foton. Foton jest absorbowany w materiale fotokatody osadzonym na podłożu. Często materiał podłoża jest przezroczysty dla padającego promieniowania

Detektory fotonowe:

Detektory na studniach kwantowych – (QWIP Quantum Well Infrared Photodetector – studniowe fotonowe detektory podczerwieni) opracowała Firma AT&T na początku lat 90. Strukturę stanowią cienkie warstwy AlGaAs oraz GaAs. W celu zapewnienia optymalnych parametrów pracy wymagają schłodzenia do temperatury – 203°C (70K) za pomocą chłodziarki Stirlinga zabudowanej w naczyniu Dewara, czyli wymagają nieco większego schłodzenia niż typowe detektory chłodzone: –196°C (77K). Obecnie są to najczulsze detektory o temperaturowej zdolności rozdzielczej 20÷40mK, dlatego stosowane są głównie do badań naukowych. Największa wykrywalność widmową mają. w paśmie długofalowym (LW) 8÷9μm o bardzo wąskiej szerokości, tj. 1μm. Ich cechą charakterystyczną jest stosunkowo wysoka jednorodność poszczególnych elementów (pikseli) matrycy.

Kamery:



Kamery:



Kamery:



INTRODUCING
THE NEXT GENERATION
FLIR ONE[®]

All Models
Now Available!

BUY NOW



Termografia w NDE

Pasywna

*Zdalna inspekcja elewacji,
budynków, transformatory,
układów scalonych, silników,
transformatorów, ochrona
granic, budynków, wojsko,
naprowadzanie rakiet...*

Alternatywny podział metod
aktywnych ze względu na metodę
pobudzania: vibrotermografia,
termografia optyczna, mikrofalowa,
mechaniczna,
elektromagnetyczna...

Aktywna:

- Impulsowa
- Impulsowo – fazowa
(Pulsed Phase Thermography)
- Lock-in
- Skokowe podgrzewanie
(Step Heating)
- Inne: parametryzacja, TSR

Termografia statyczna:

- Zastosowania termografii statycznej:
 - Inspekcja budynków
 - Inspekcja urządzeń
 - Ochrona granic
 - Broń: naprowadzana na cel termicznie



Termografia dynamiczna:

- „Prześwietlanie ciepłem”

Podstawowe stałe fizyczne

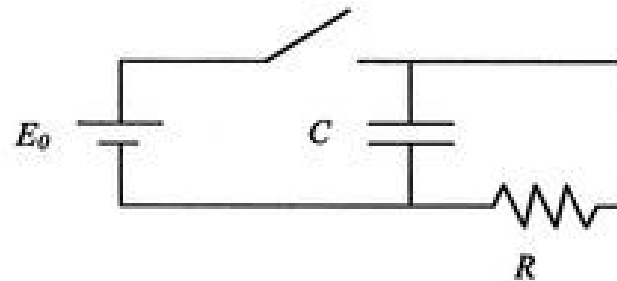
- k – przewodność cieplna [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
- ρ - gęstość [kg/m^3]
- C_p - ciepło właściwe [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
- α - dyfuzyjność cieplna [m^2/s]

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$$

zdolność ciała do przewodzenia zmagazynowanej energii cieplnej

- h - współczynnik wymiany ciepła [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
- Termiczna stała czasowa:

$$\tau = \frac{\rho \cdot C_p \cdot V}{h \cdot A_s}$$



Wymiana ciepła

- Przewodzenie:

$$Q_{cd} = -k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}$$

- Unoszenie:

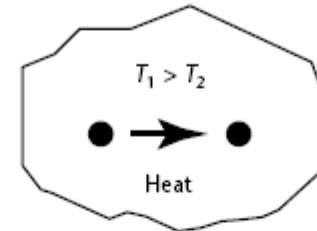
$$Q_{cv} = h_{cv}(T_s - T_f)$$

- Promieniowanie:

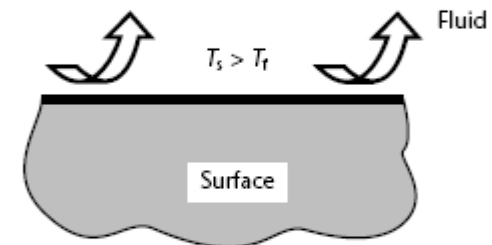
$$Q_{rd}'' = \sigma T_s^4$$

FIGURE 1. Heat transfer mechanisms: (a) conduction; (b) convection; (c) radiation.

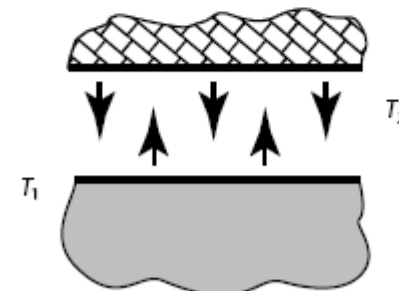
(a)



(b)



(c)



Legend

T = temperature

T_f = fluid temperature

T_s = surface temperature

Równanie Fouriera:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k \cdot \nabla T) + q_z$$

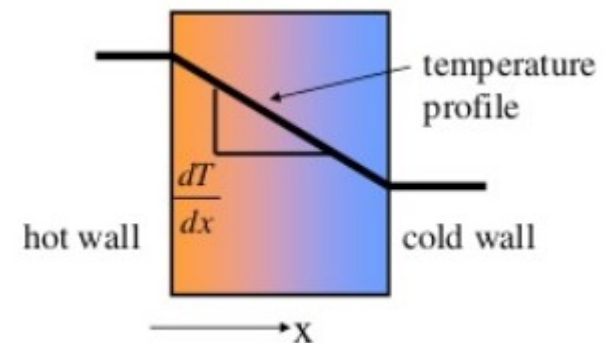
k – przewodność cieplna [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]

ρ – gęstość [kg/m^3]

c – ciepło właściwe [J/kg K]

q_z – wymiana ciepła z otoczeniem [W/m^3]

T – wartość temperatury [K]



Modelowanie matematyczne przepływu ciepła:

W celu weryfikacji procedur diagnostycznych opracowano dwuwymiarowy model badanej tkanki, bazując na zmodyfikowanym równaniu dyfuzji – równaniu Pennesa:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k \cdot \nabla T) + w_b \cdot c_b \cdot \rho_b (T_a - T) + q_m + q_z$$

k – przewodność cieplna tkanki [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]

ρ_b – gęstość krwi [kg/m^3]

c_b – ciepło właściwe krwi [J/kg K]

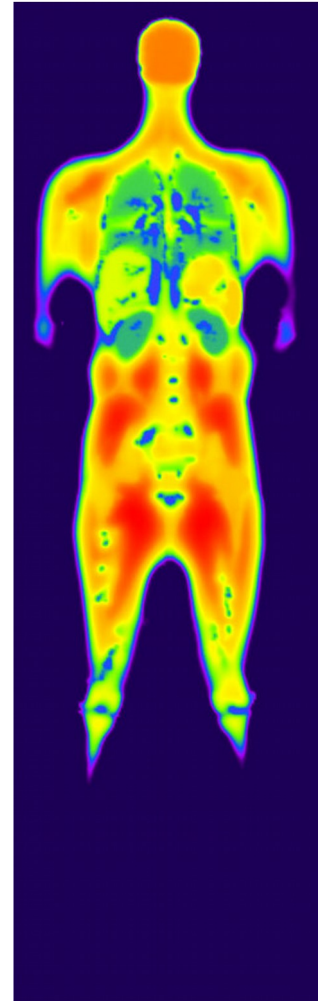
w_b – perfuzja krwi [ml/s/ml tkanki]

q_m – metabolizm tkanki [w/m^3]

q_z – wymiana ciepła z otoczeniem [w/m^3]

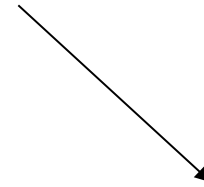
T_a – temperatura krwi tętniczej [K]

T – temperatura lokalna w tkance [K]



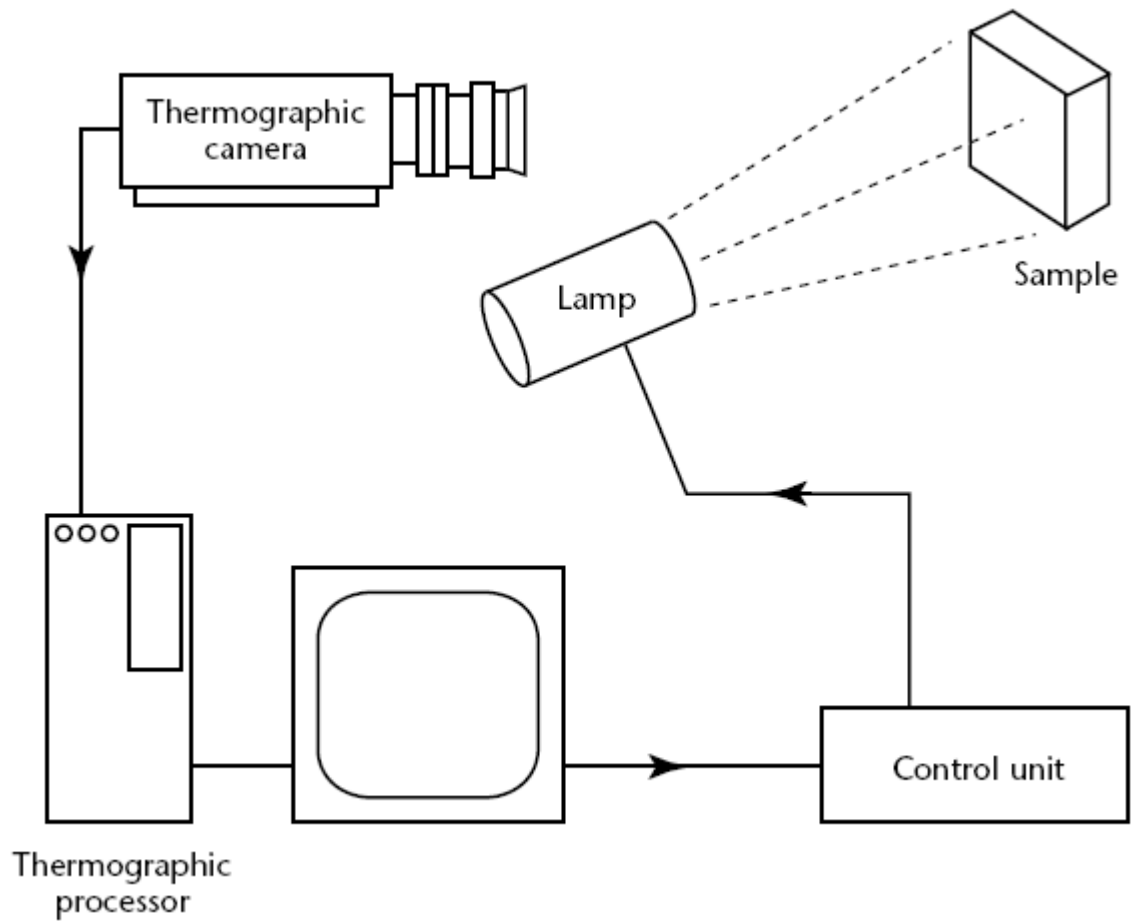
Non destructive testing:

Alternatywny podział metod aktywnych ze względu na metodę pobudzania: vibrotermografia, termografia optyczna, mikrofalowa, mechaniczna, elektromagnetyczna...

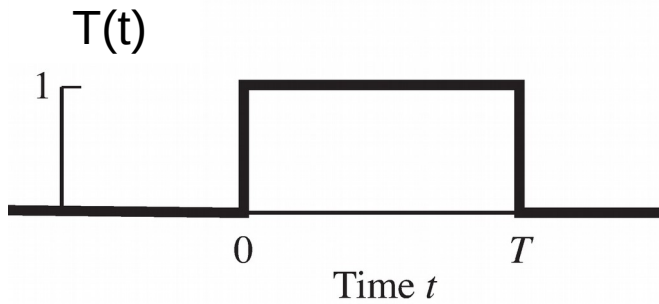


Aktywna:

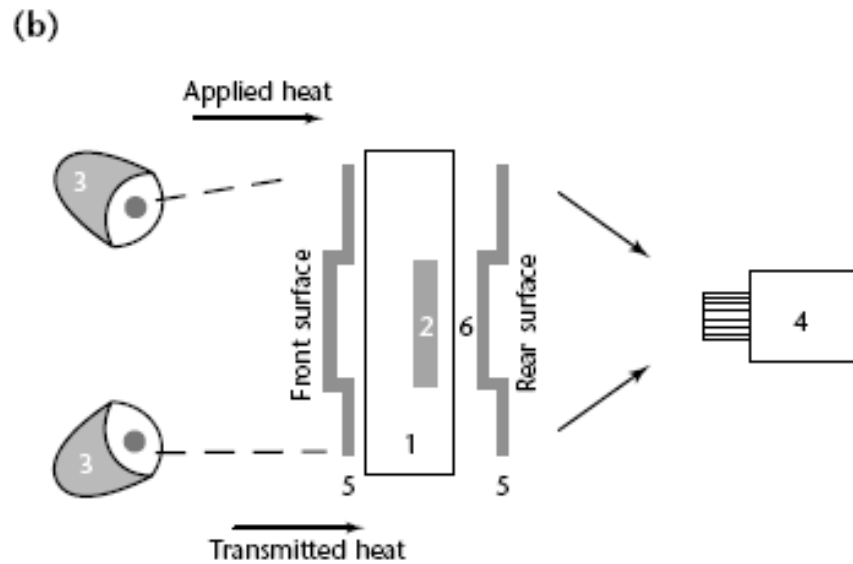
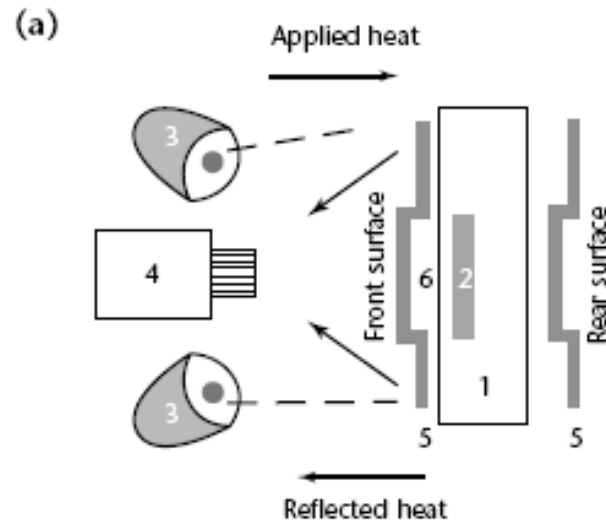
- Impulsowa
- Impulsowo – fazowa (Pulsed Phase Thermography)
- Lock-in
- Skokowe podgrzewanie (Step Heating)
- Inne: parametryzacja, TSR



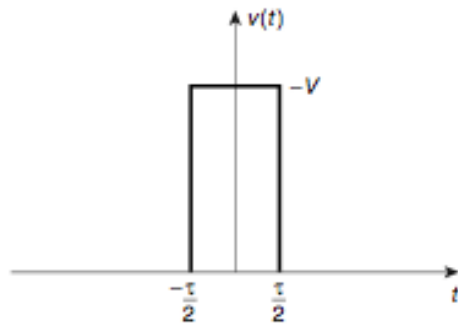
Termografia impulsowa



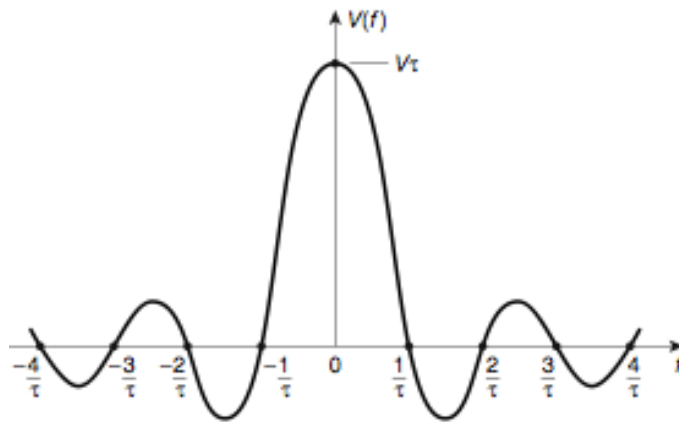
$$\mu = 2\sqrt{\alpha t}$$



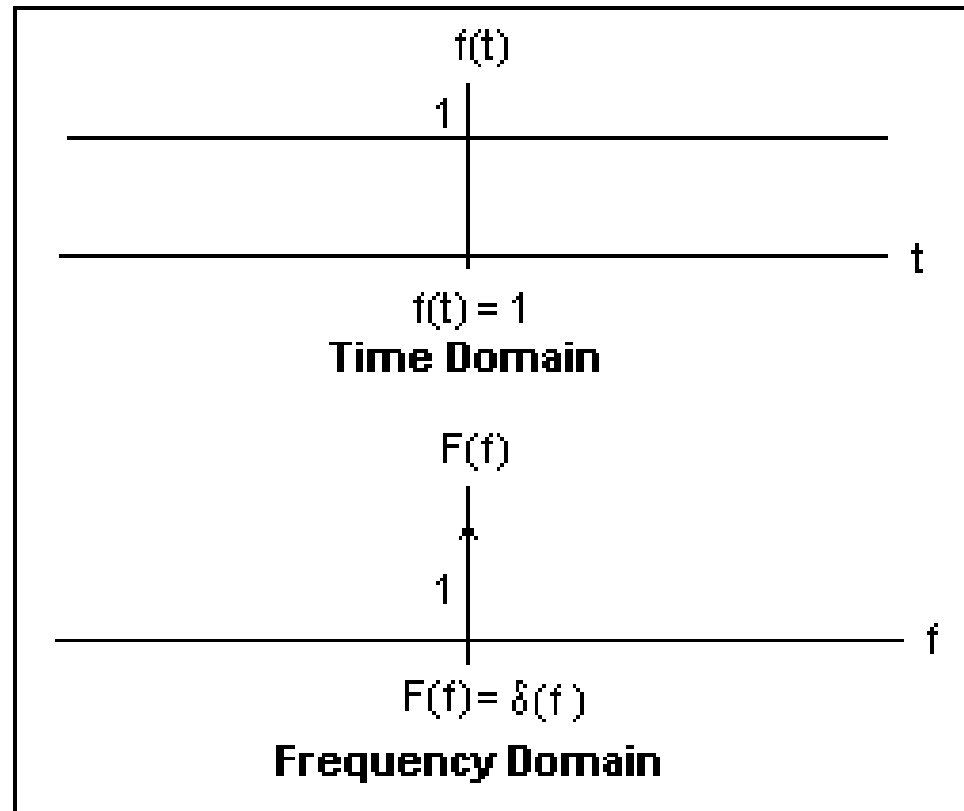
- Im „dłuższy” impuls tym głębiej dociera (przy założeniu tej samej energii)



(a) Rectangular Pulse

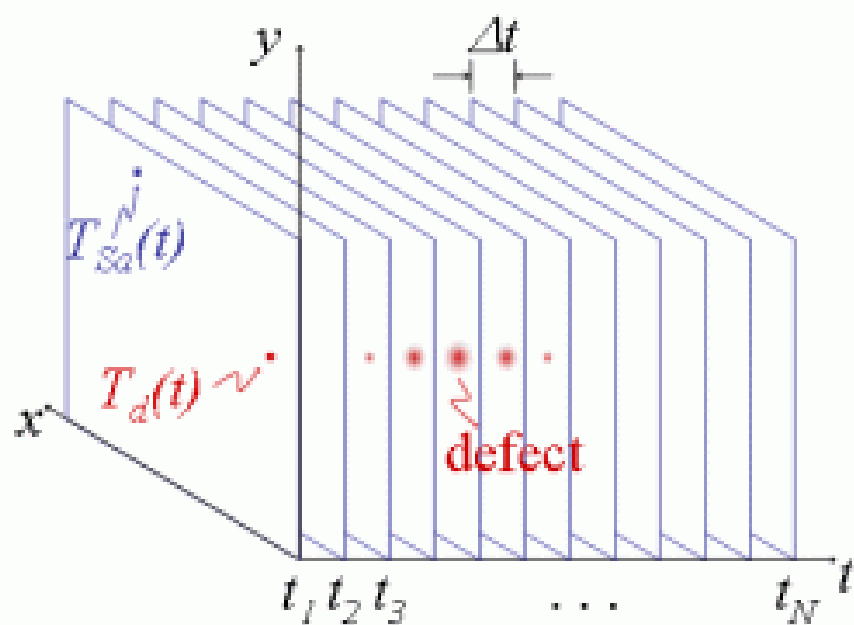


(b) Spectrum of Rectangular Pulse in (a)

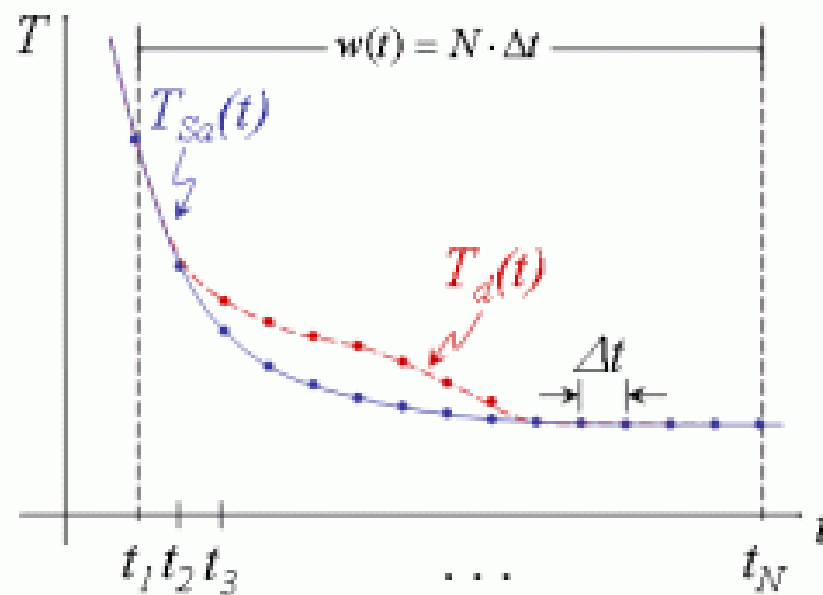


Termografia impulsowa

0.01s < Czas trwania pobudzenia < 60s ...
24h



(a)



(b)

FIGURE 8. Temperature evolutions on front and rear surfaces of 5 mm (0.20 in.) thick graphite epoxy specimen: (a) front surface excess temperature versus time; (b) rear surface excess temperature versus time; (c) front surface temperature and running contrast C^{run} versus time; (d) rear surface temperature and running contrast C^{run} versus time; heat transfer $Q = 100 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$; heat pulse duration $t_h = 0.01 \text{ s}$.

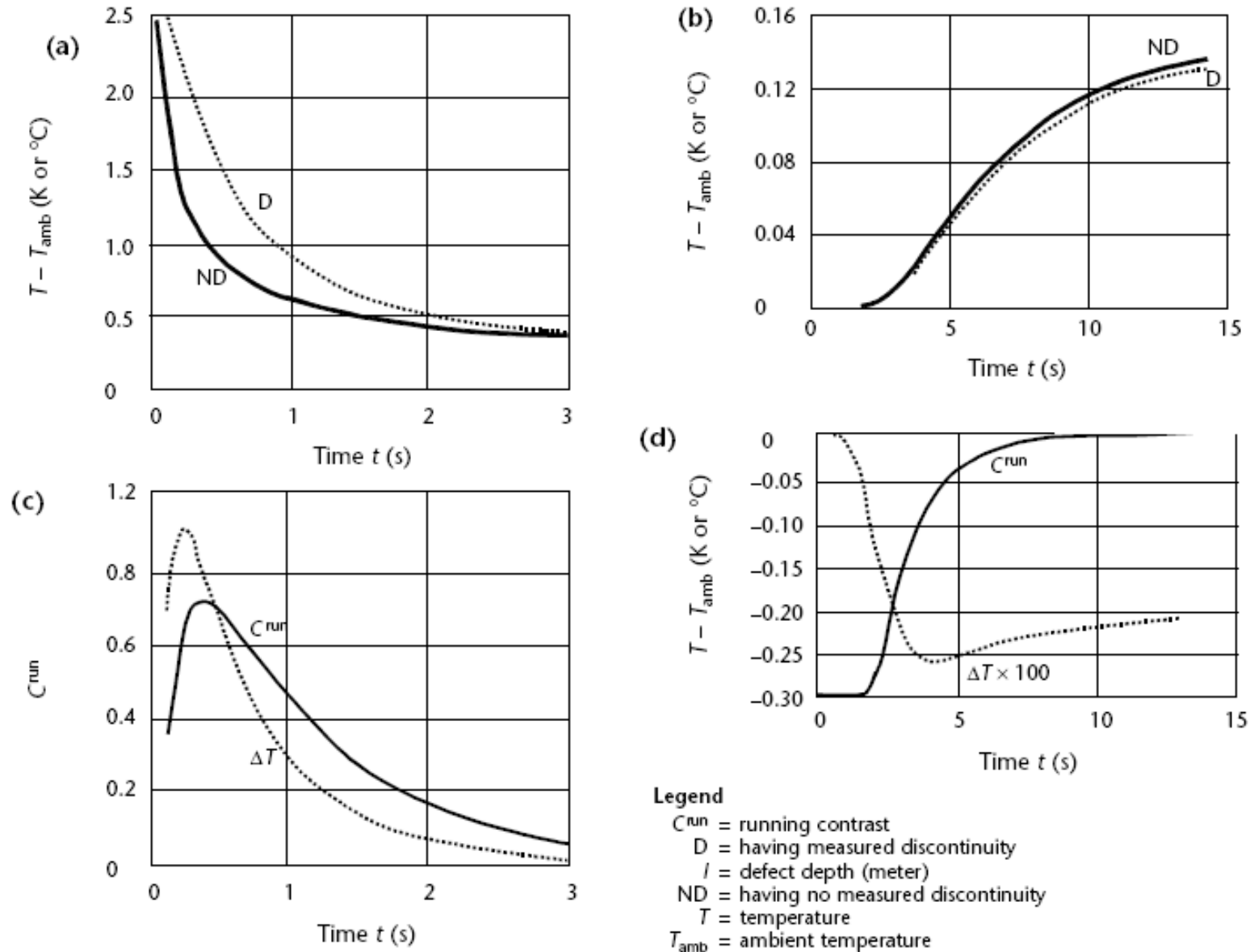
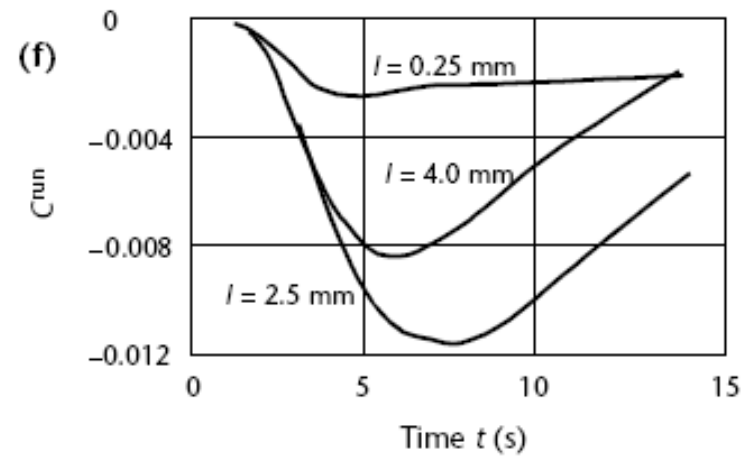
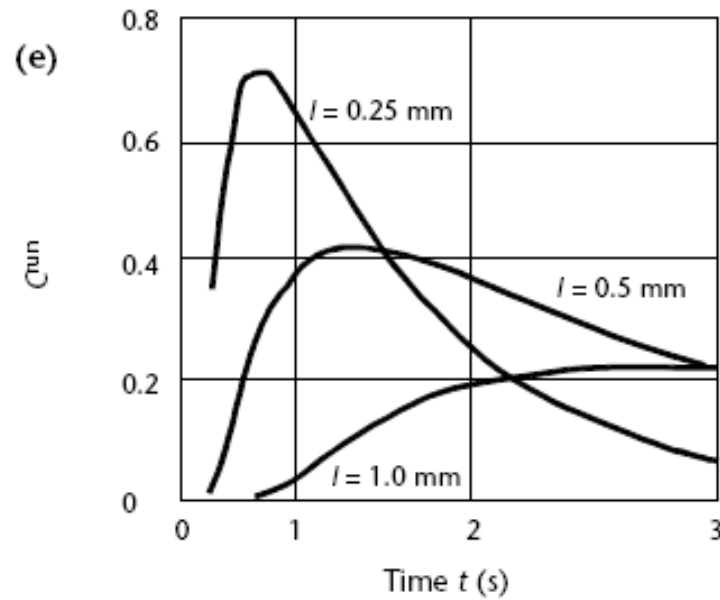


FIGURE 8. Temperature evolutions on front and rear surfaces of 5 mm (0.20 in.) thick graphite epoxy specimen: (a) front surface excess temperature versus time; (b) rear surface excess temperature versus time; (c) front surface temperature and running contrast C^{run} versus time; (d) rear surface temperature and running contrast C^{run} versus time; (e) front surface temperature for three discontinuity depths, versus time; (f) rear surface running contrast for three discontinuity depths, versus time. Parameters: discontinuity thickness $d = 0.1$ mm (0.004 in.); discontinuity depth $l = 0.25$ mm (0.01 in.); heat transfer $Q = 100$ kW·m⁻²; discontinuity radius $r_d = 5$ mm (0.2 in.); heat pulse duration $t_h = 0.01$ s.

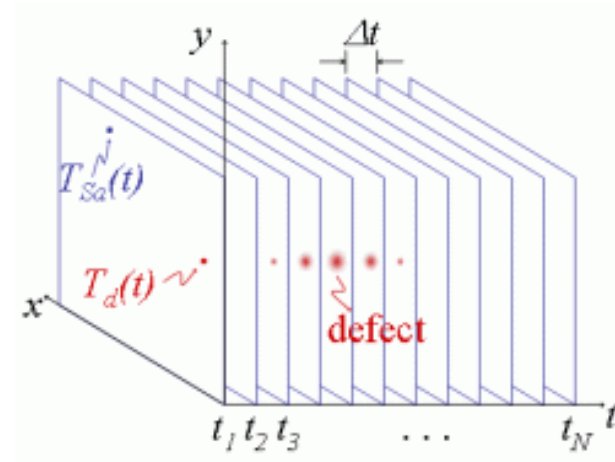
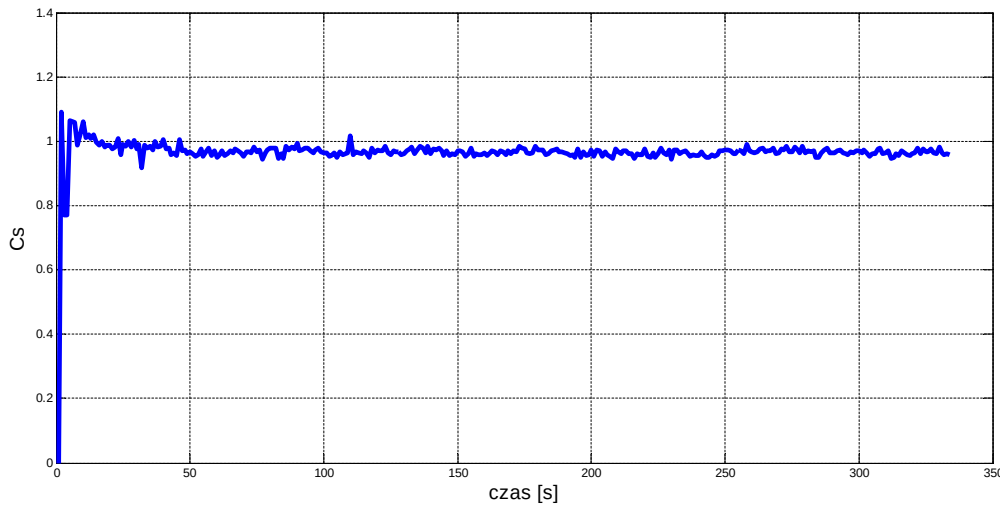
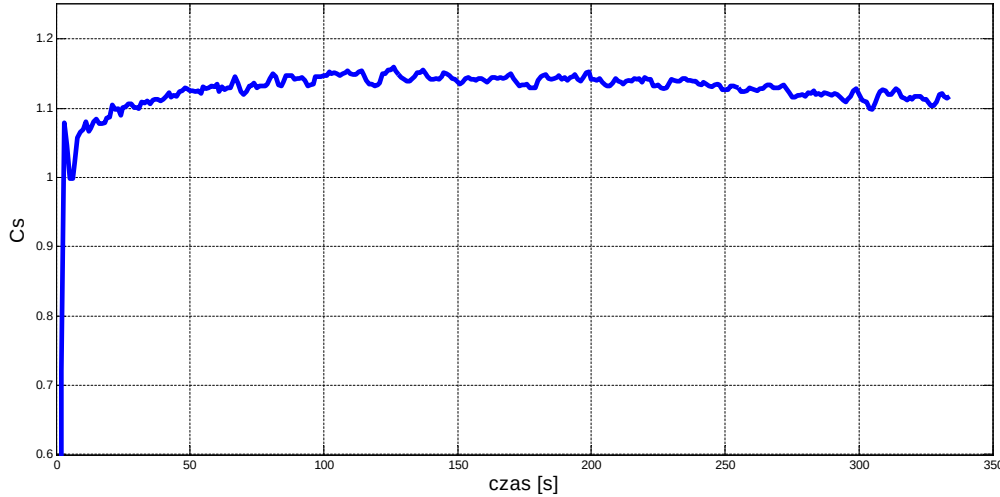


Legend

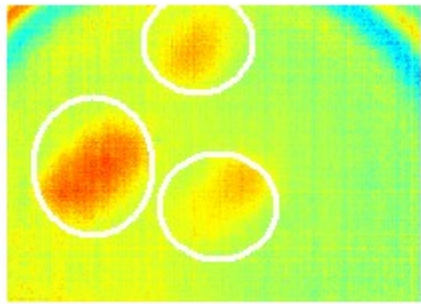
- C^{run} = running contrast
- D = having measured discontinuity
- l = defect depth (meter)
- ND = having no measured discontinuity
- T = temperature
- T_{amb} = ambient temperature

Kontrast termiczny

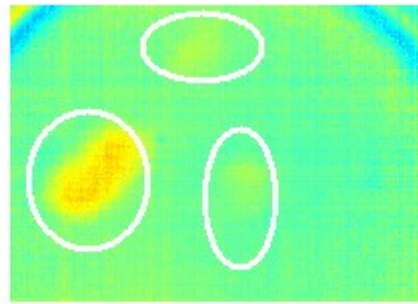
$$C_s(t) = \frac{T_{x,y}(t) - T_{x,y}(t=0)}{T_{\text{odniesienia}}(t) - T_{\text{odniesienia}}(t=0)}$$



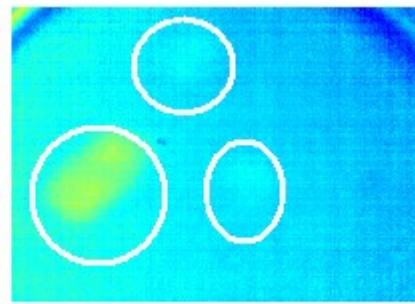
Termografia impulsowa



$t = 60\text{s}$



$t = 40\text{s}$



$t = 20\text{s}$



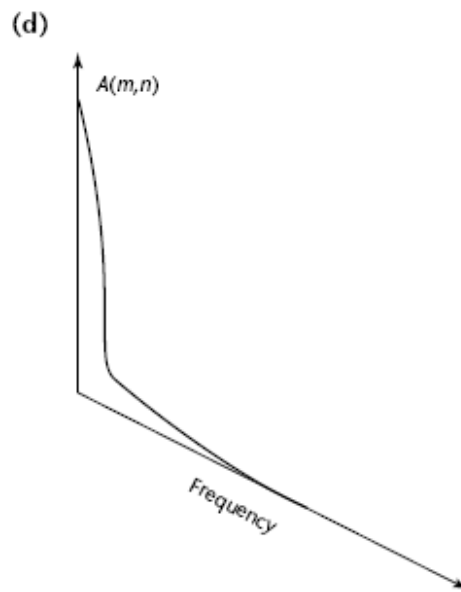
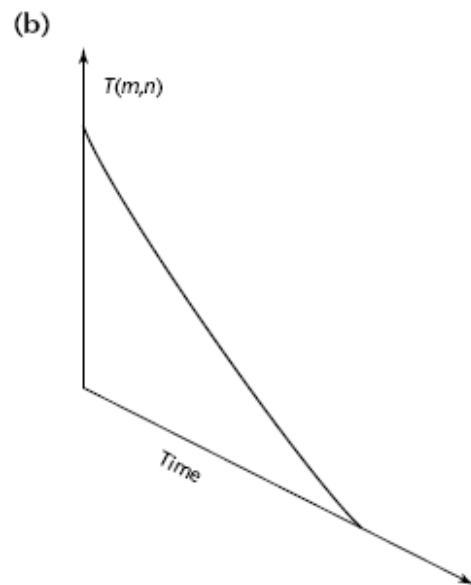
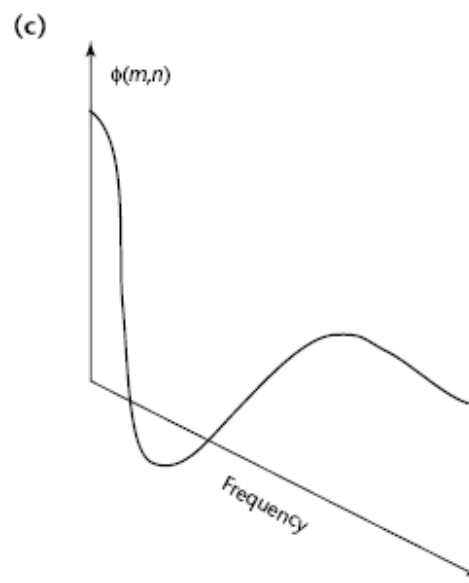
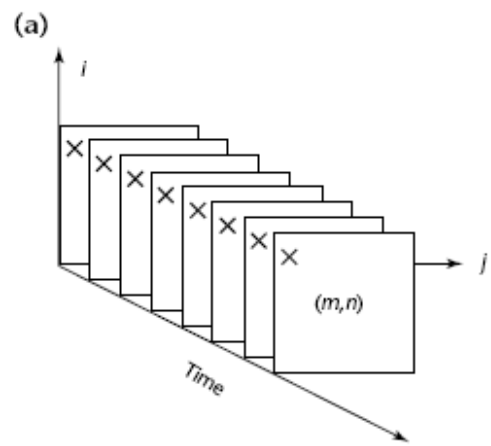
$t = 0$

Pulsed Phase Thermography

- Wykonuje się transformatę FFT przebiegu czasowego temperatury dla każdego piksela obrazu

$$I(f) = |I(f)| * \exp(j*faza)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}$$



Legend

- A = amplitude (relative scale)
- i, j = coordinates of display axes
- m, n = indices of pixel
- T = temperature
- ϕ = phase

FIGURE 6. Temporal evolution of temperature for different depth discontinuities.

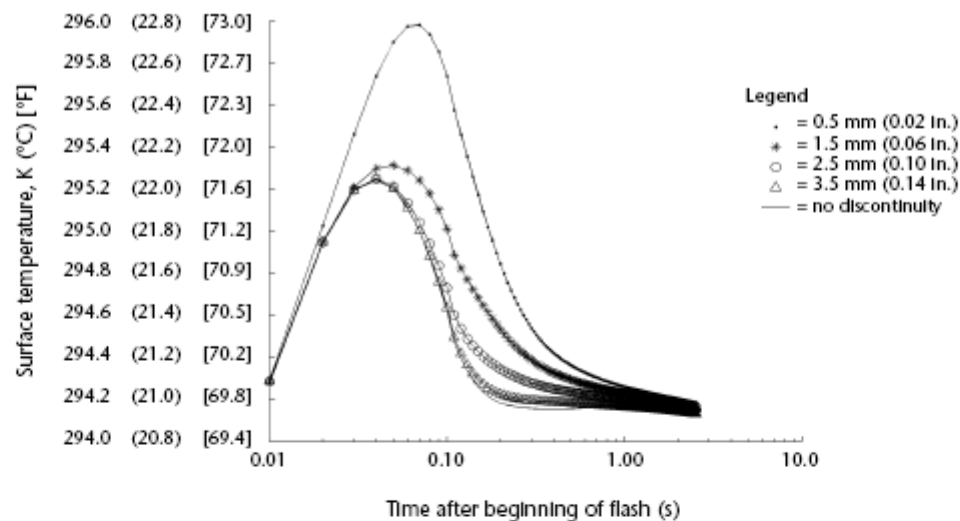


FIGURE 7. Phase evolution for different depth discontinuities.

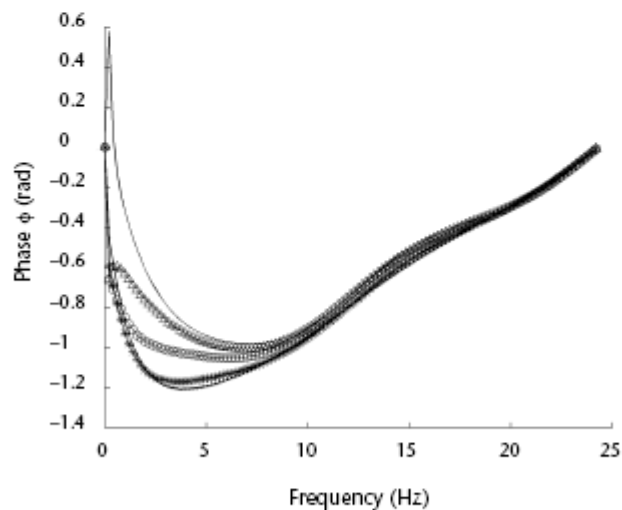


FIGURE 8. Amplitude evolution for different depth discontinuities.

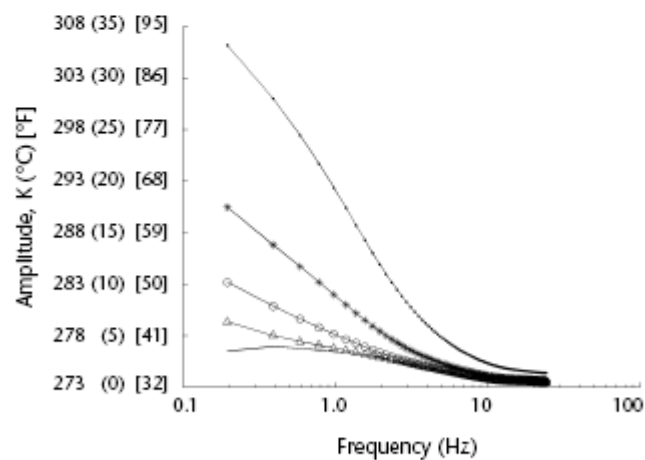
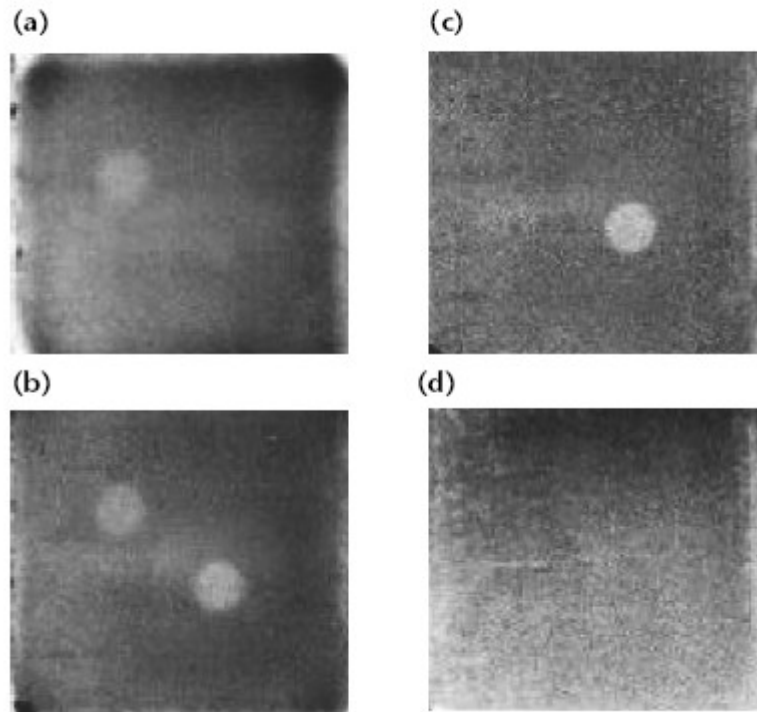
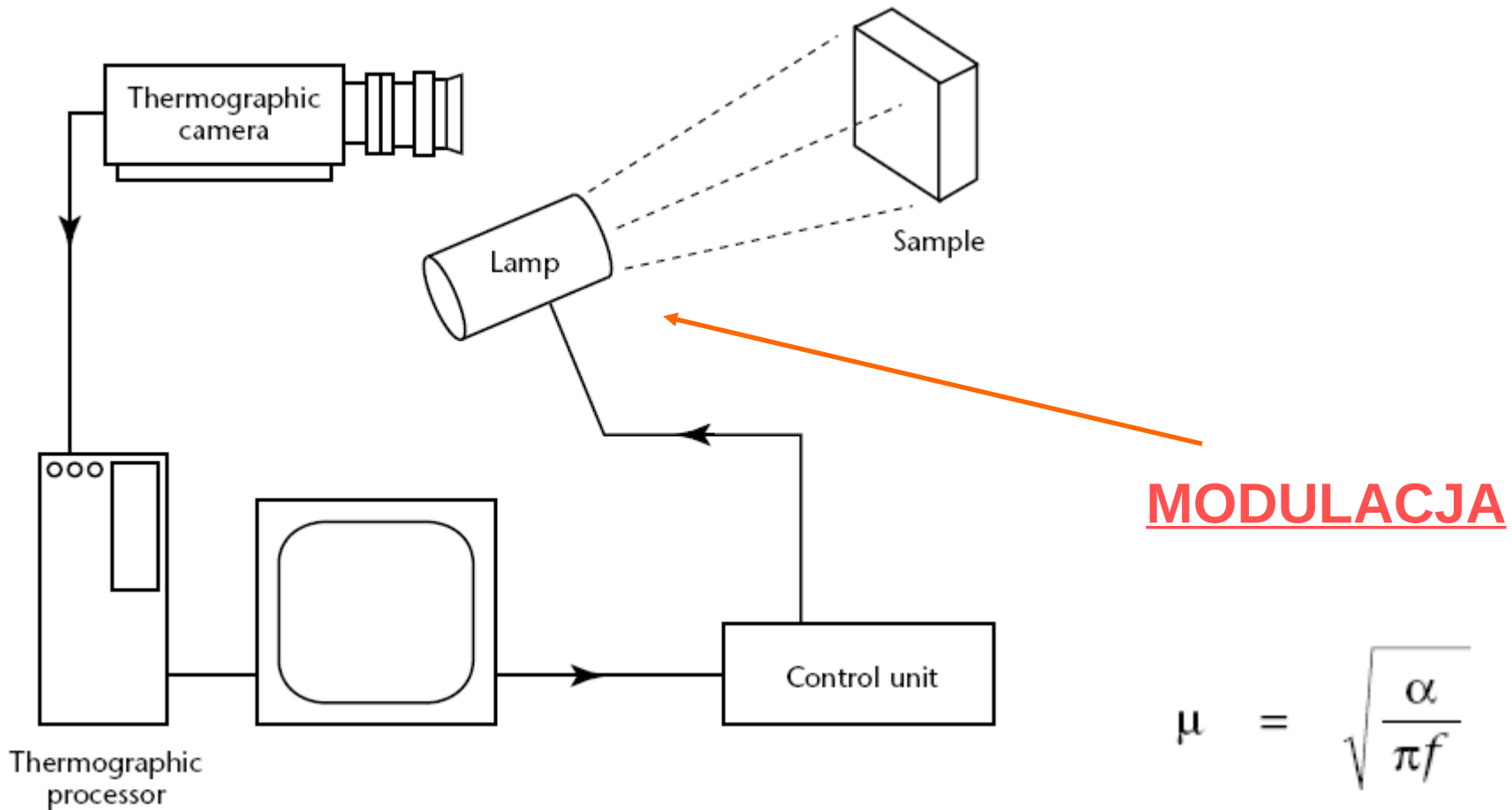



FIGURE 9. Phase obtained for different frequencies:
(a) 0.020 Hz; (b) 0.063 Hz; (c) 0.188 Hz; (d) 3.125 Hz.



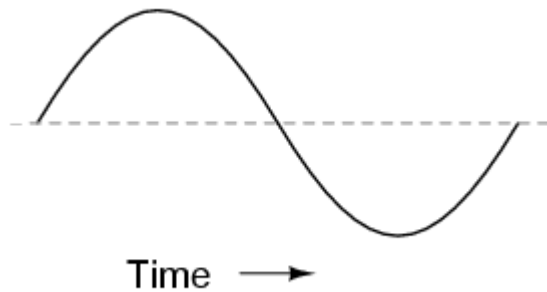
Lock-in Thermography





<https://www.youtube.com/watch?v=EEhYIHezzdo&t=120>

Lock-in Thermography

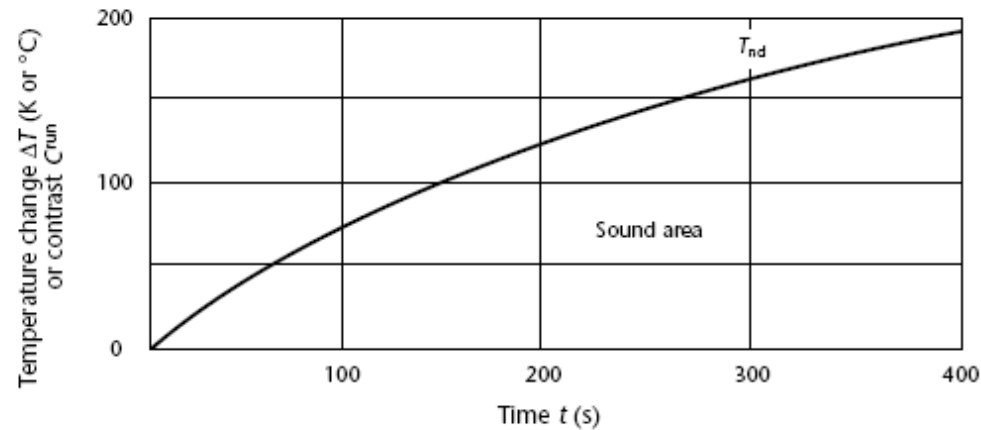


$$\varphi(x_1) = \arctan \left[\frac{S_1(x) - S_3(x)}{S_2(x) - S_4(x)} \right]$$

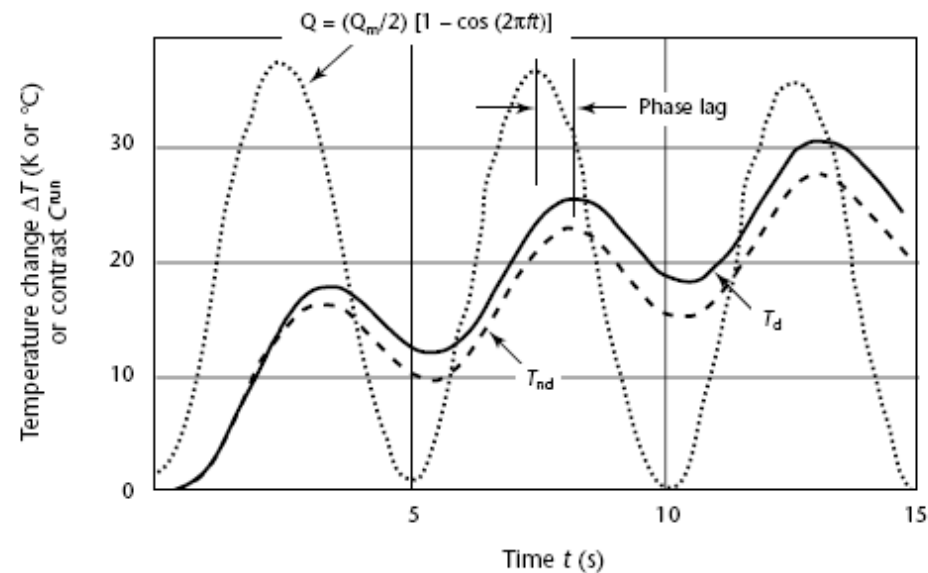
$$A(x_1) = \left\{ \left[S_1(x) + S_3(x) \right]^2 - \left[S_2(x) + S_4(x) \right]^2 \right\}^{1/2}$$

FIGURE 9. Temperature evolutions on front surface of 5 mm (0.20 in.) graphite epoxy specimen: (a) front surface temperature in sound area versus time (80 cycles); (b) front surface temperature in both sound and discontinuity areas versus time (three cycles); (c) front surface temperature signal and contrast versus time (three cycles). Parameters: air filled discontinuity thickness $d = 0.1$ mm (0.004 in.); stimulation frequency $f = 0.2$ Hz, close to optimal; air filled discontinuity at depth $l = 1.0$ mm (0.04 in.); heat transfer $Q = 10$ kW·m⁻²; discontinuity radius $r_d = 5$ mm (0.2 in.); modulated heating.

(a)



(b)



Legend

- C^{run} = running contrast
- T_d = temperature in area with measured discontinuity
- T_{nd} = temperature in area without measured discontinuity
- ΔT = temperature change

FIGURE 14. Painted polymer surface: remote determination of paint thickness with phase angle image of OLT: (a) thermal image; (b) measurements.^{44,45}

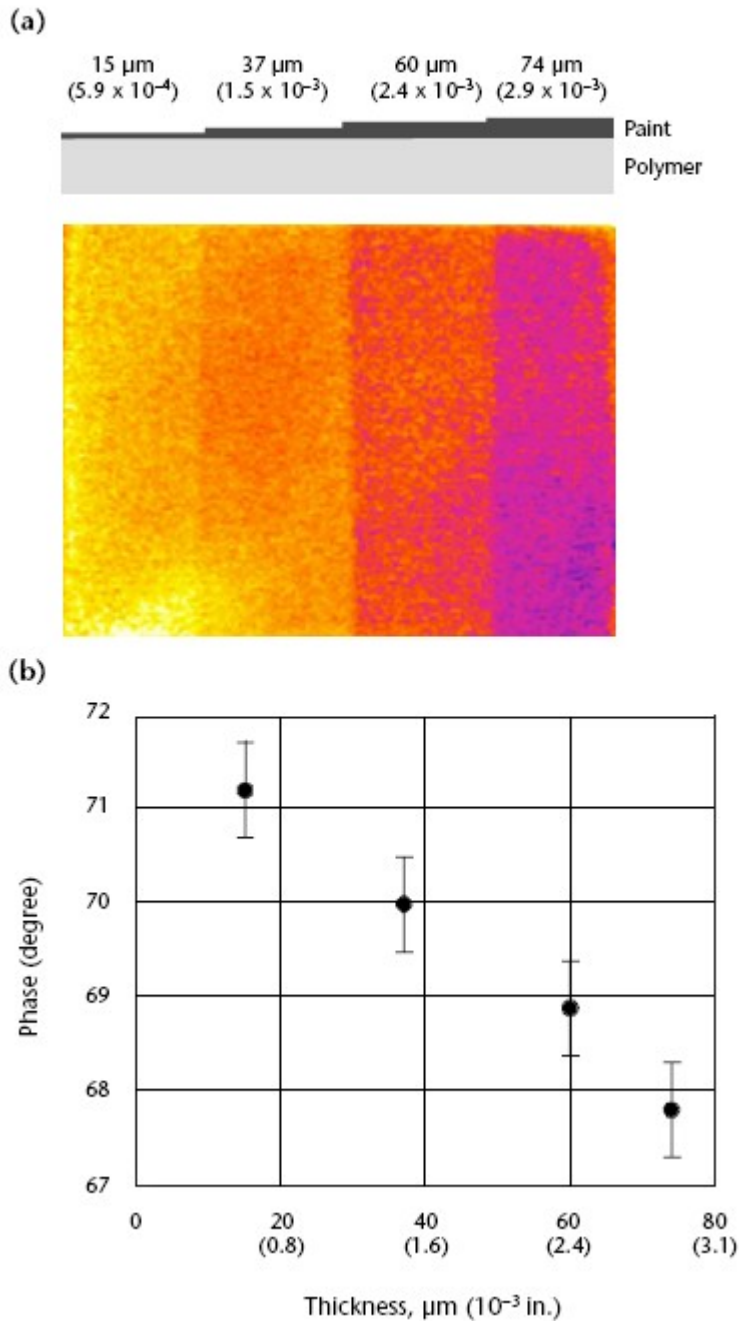


FIGURE 17. Lockin thermography of optically generated thermal waves to evaluate structural integrity: (a) photograph of graphite fiber reinforced plastic airplane with dashed lines in nose area; (b) phase angle image of subsurface features.⁵⁴

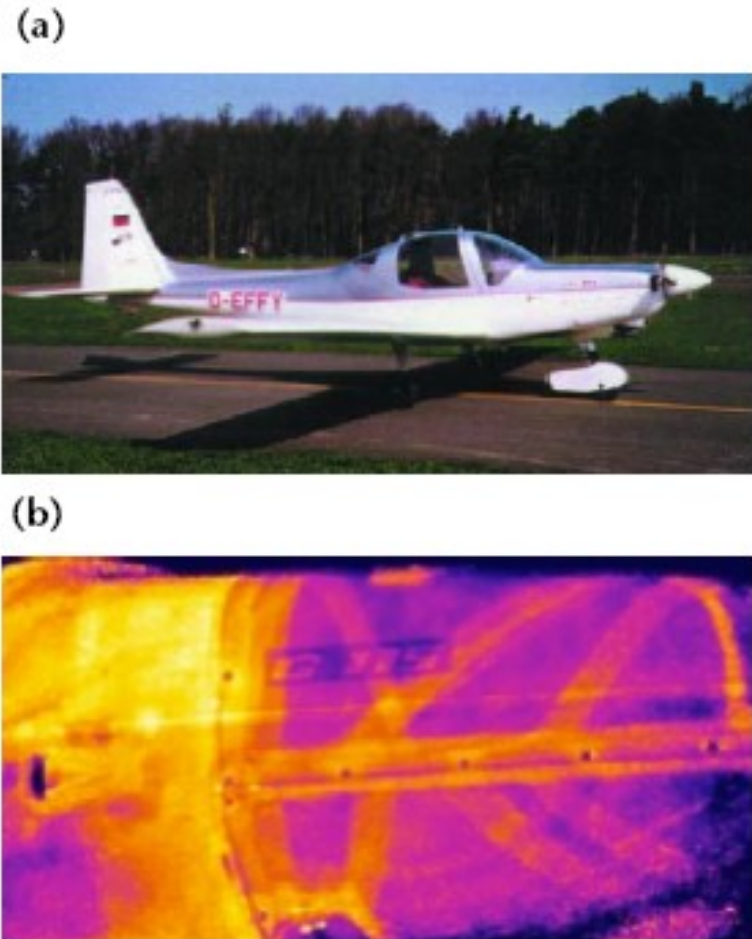
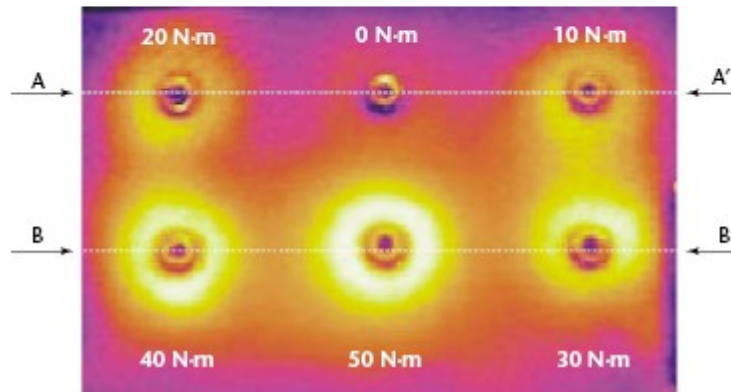
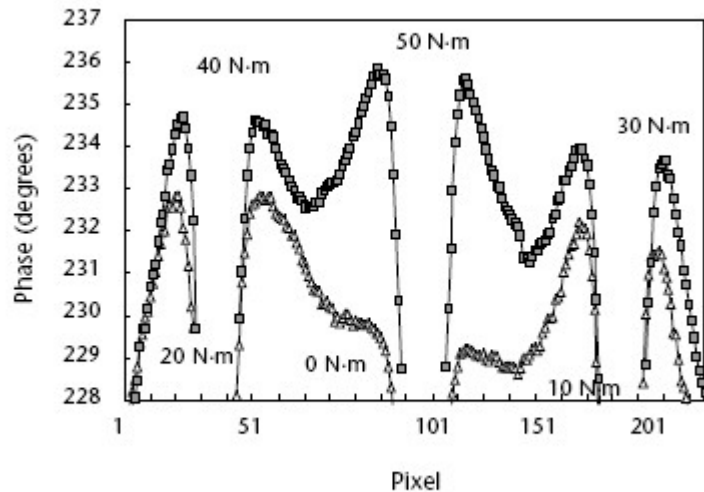


FIGURE 18. Remote lockin thermography of torque in array of screws using optically generated thermal waves: (a) phase image of 2 mm (0.08 in.) thick steel plates pressed together by screws fastened at different torque levels, with illumination intensity modulated at 0.06 Hz; (b) phase profiles taken along lines A-A and B-B; (c) phase dependent on applied torque level.⁵⁵

(a)



(b)



(c)

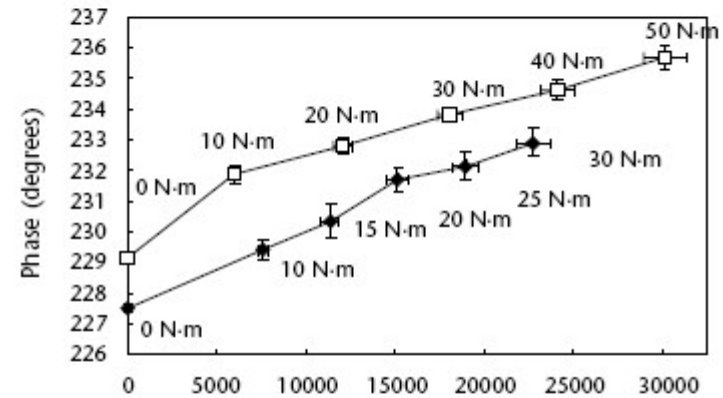
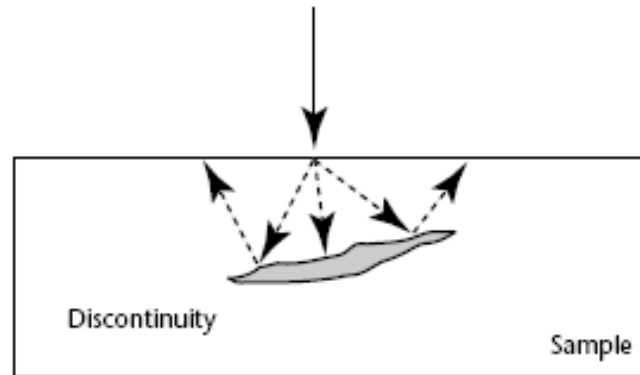
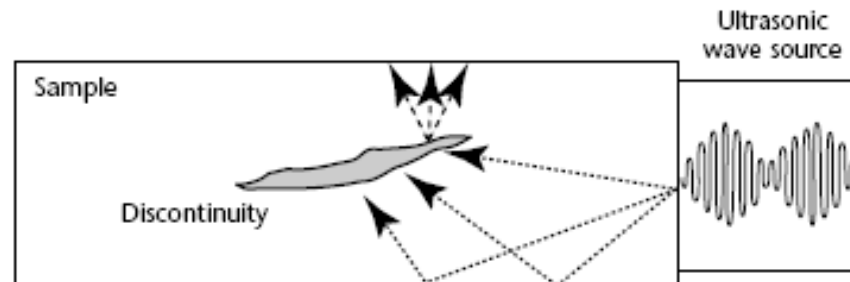


FIGURE 19. Comparison of two means of generating thermal waves for lockin thermography: (a) thermal wave generated optically on whole surface; (b) thermal waves generated selectively in discontinuity (with enhanced loss angle) by absorption of amplitude modulated ultrasound.

(a)



(b)



Legend

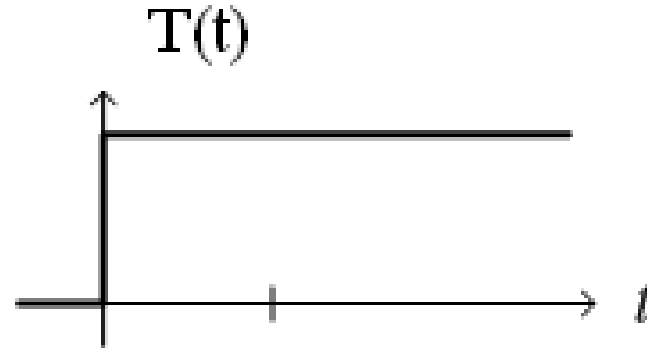
- = optical wave
- - - = elastic wave
- = thermal wave



<https://www.youtube.com/watch?v=I-xDbKOFVdI&t=240>

Skokowe ogrzewanie

$$\alpha = \frac{k}{c\rho}$$



Współczynnik niedopasowania termicznego:

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\kappa_1 c_1 \rho_1} - \sqrt{\kappa_0 c_0 \rho_0}}{\sqrt{\kappa_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{\kappa_0 c_0 \rho_0}}$$

FIGURE 6. Influence of substrate thermal properties on behavior of surface temperature (step function heating of thermally thick sample).

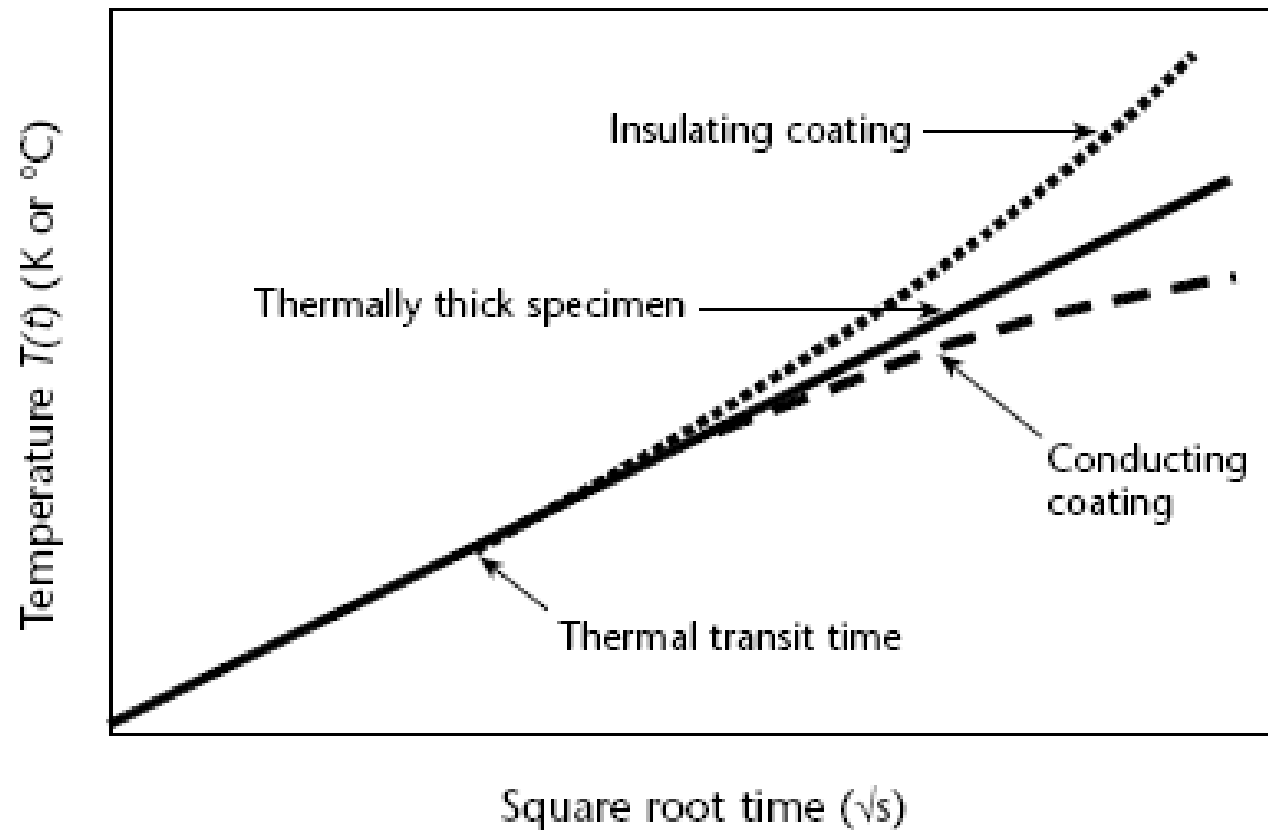
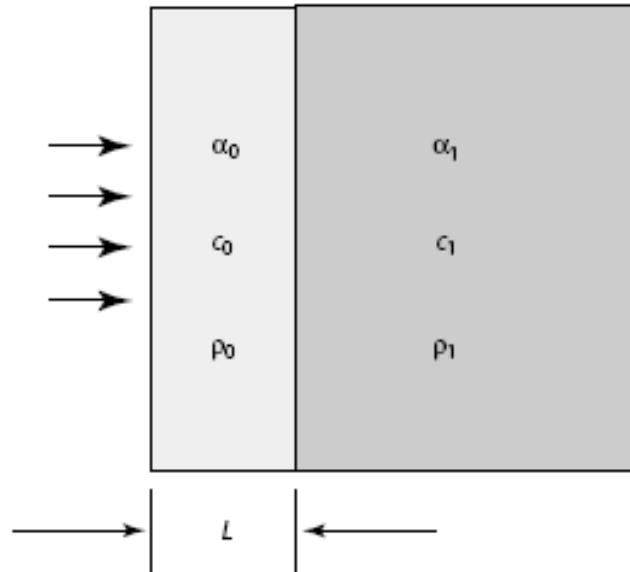


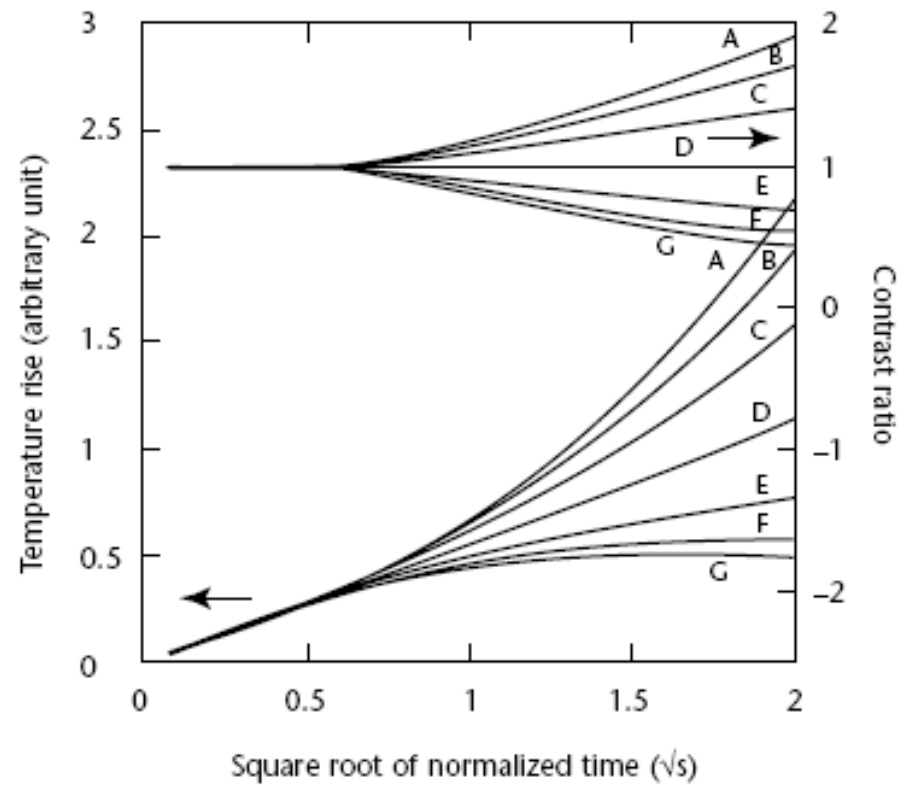
FIGURE 26. Schematic for photothermal experiment with two layers in one-dimensional geometry.



Legend

- c = specific heat
- L = surface layer thickness (m)
- α = thermal diffusivity
- ρ = density

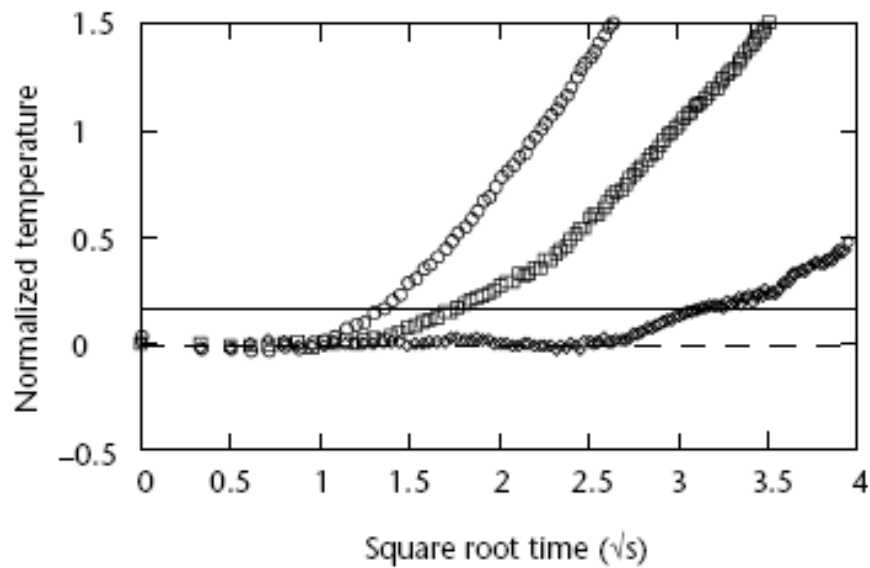
FIGURE 27. Temperature rise for step heating as function of square root of normalized time.



Legend

- A. -1.0 thermal mismatch factor.
- B. -0.8.
- C. -0.5.
- D. 0.0.
- E. 0.5.
- F. 0.8.
- G. 1.0.

FIGURE 29. Time dependence of normalized temperature at center of flat bottom hole in graphite epoxy composite panel plotted for three different depths of holes.



Legend

- = 0.8 mm (0.03 in.)
- = 1.4 mm (0.06 in.)
- ◇ = 2.8 mm (0.11 in.)

FIGURE 30. Transit time image of graphite epoxy composite sample using algorithm described in text.

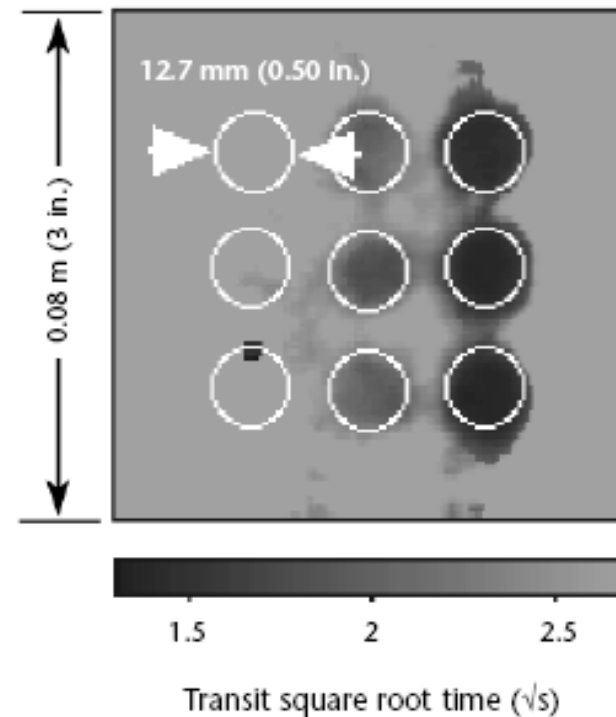


FIGURE 31. Normalized temperature image after 2 s heating pulse on fiber glass epoxy composite specimen with different backing materials.

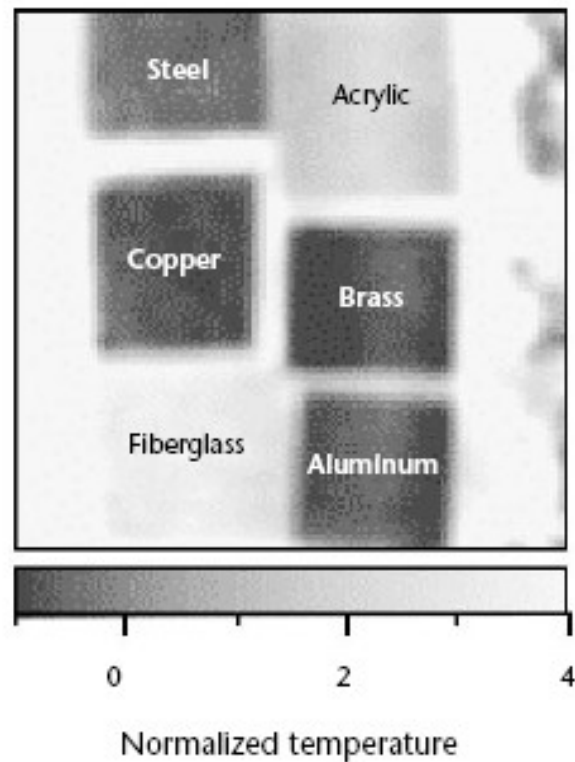
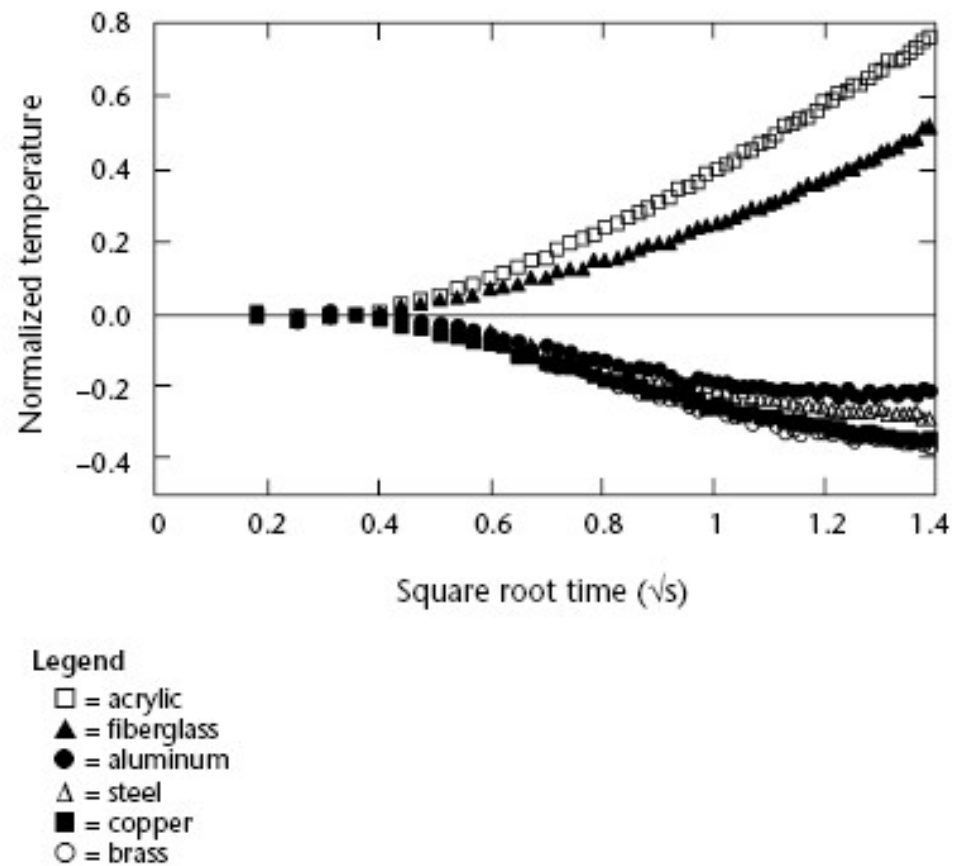


FIGURE 32. Normalized temperature plotted as function of square root time for pixel locations on six materials.





Dziękuję za uwagę