

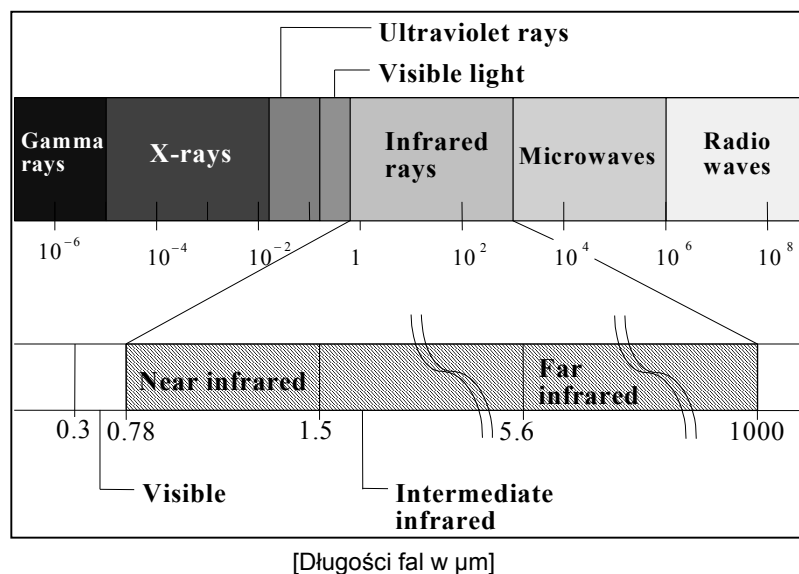
7. Podstawy termografii

Wszystkie materiały, których temperatura jest wyższa od 0 stopni Kelvina (-273 stopni Celsjusza), emitują energię promieniowania podczerwonego. Energia promieniowania emitowana przez mierzony obiekt, jest zamieniana w kamerze na sygnał elektryczny przez matrycę obrazową (mikrobolometr), i wyświetlana na monitorze jako kolorowy lub monochromatyczny obraz termiczny. Podstawy teoretyczne są objaśnione poniżej:

7.1. Promieniowanie podczerwone

Promieniowanie podczerwone jest formą promieniowania elektromagnetycznego, tak samo jak fale radiowe, mikrofałe, ultrafiolet, światło, promienie rentgenowskie i promieniowanie gama. Wszystkie te formy, które łącznie tworzą widmo elektromagnetyczne, są podobne w tym, że emitują energię w postaci fali elektromagnetycznej rozchodzącej się z prędkością światła. Główną różnicą między każdym pasmem jest ich długość fali, która odnosi się do energii którą fala przenosi. Przykładowo, promieniowanie gamma posiada długość fali miliony razy mniejszą od światła, długość fali radiowych jest miliardy razy większa od fal światła.

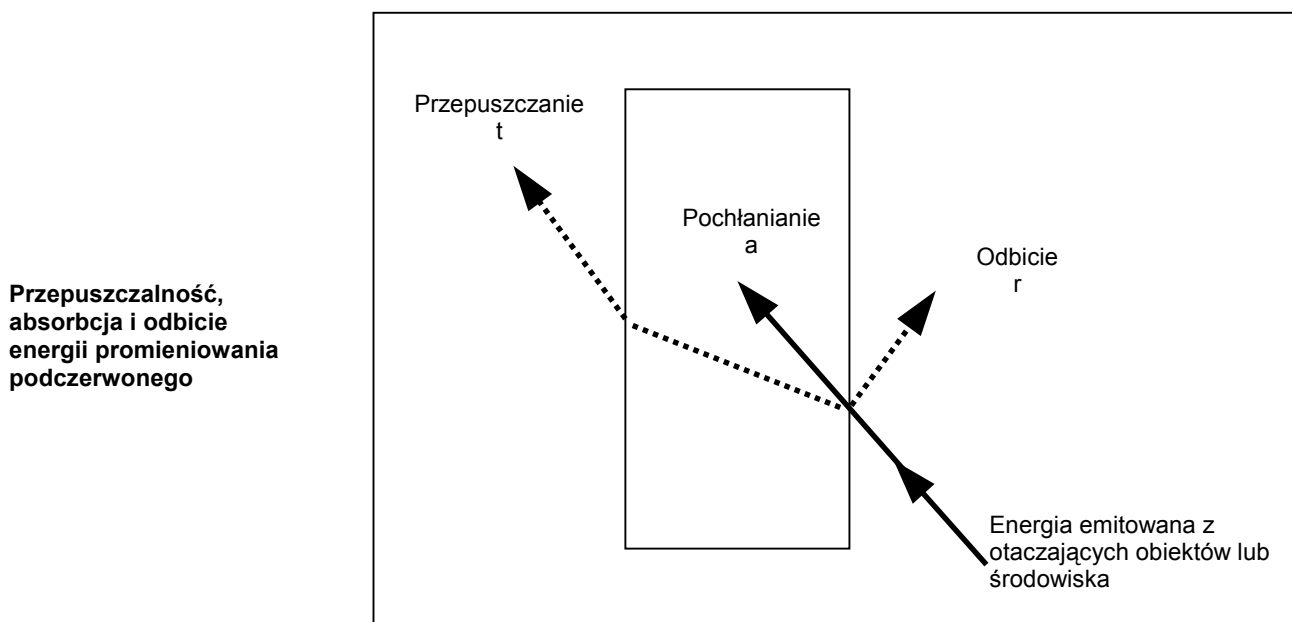
Widmo promieniowania elektromagnetycznego



Długość fal pasma promieniowania podczerwonego wynosi 0.78...1000μm (mikrometrów). Są to fale dłuższe niż promieniowanie światła ale krótsze od fal radiowych. Pasma podczerwieni jest sklasyfikowane od bliskiej podczerwieni do dalekiej podczerwieni.

7.2. Emisyjność

Promieniowanie podczerwone jest energią promieniowaną w wyniku ruchu atomów i molekuł na powierzchni obiektu, gdy temperatura obiektu jest powyżej zera bezwzględnego. Intensywność emisji jest funkcją temperatury materiału. Innymi słowami, im wyższa temperatura, tym wyższa intensywność promieniowania emitowanej energii podczerwieni. Oprócz emisji energii promieniowania, materiały także odbijają, absorbują i w niektórych przypadkach także przepuszczają promieniowanie podczerwone. Gdy temperatura materiału jest taka jak jego otoczenia, ilość energii promieniowania absorbowanej przez obiekt jest równa ilości energii emitowanej przez obiekt.



Rysunek powyżej trzy sposoby którymi promieniowana energia padająca na obiekt może być rozpraszana. Tymi sposobami rozpraszania są:

a = pochłanianie
 t = przepuszczanie
 r = odbicie

Ułamek całkowitej energii promieniowania, która jest powiązana z każdym z powyższych sposobów rozpraszania, noszą nazwy pochłaniania (a), przepuszczalność (t) i współczynnik odbicia (r) ciała. Zgodnie z teorią zachowania energii, współczynnik określający jak materiały odbijają, absorbują i przepuszczają energię promieniowania podczerwonego jest znany jako emisyjność materiału.

7.3. Ciało czarne

Emisyjność ciała jest zdefiniowana formalnie przez poniższy wzór jako stosunek energii promieniowania emitowanego przez ciało do energii promieniowania, która mogłaby być wyemitowana przez ciało czarne w tej samej temperaturze.

$$e = \frac{W_o}{W_{bb}}$$

gdzie,

W_o = całkowita energia promieniowana przez ciało w temperaturze T

W_{bb} = całkowita energia promieniowana przez ciało czarne w temperaturze T

Jeśli cała energia padająca na ciało jest absorbowana (brak przepuszczania i odbicia), pochłanianie wynosi dokładnie 1. W stałej temperaturze, cała zaabsorbowana energia zostałaby wyemitowana (wypromieniowana), zatem emisyjność takiego ciała wynosiłaby dokładnie 1. Dlatego dla ciała czarnego,

$$\text{absorbcyjność} = \text{emisyjność} = 1$$

Ciała spotykane w rzeczywistości nie zachowują się jak idealne, lecz są też jak to opisano odznaczają się przepuszczalnością i współczynnikiem odbicia,

$$\text{absorbcyjność} + \text{przepuszczalność} + \text{współcz. odbicia} = 1$$

Energia promieniowana przez ciało czarne jest opisana wzorem [“Prawo Plancka”].

Prawo Plancka

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

W celu uzyskania całkowitej energii emitowanej przez ciało czarne, należy scałkować wyrażenie (1) po wszystkich długościach fali (od 0 do nieskończoności). Wynik jest następujący i jest zwany “prawem Stefana-Boltzmann’a.”

Prawo Stefana-Boltzmann’a

$$(2) \quad W = e\sigma T^4$$

Z tego równania wynika, że można wprost określić temperaturę ciała czarnego na podstawie znajomości ilości energii promieniowanej przez to ciało. Aby znaleźć długość fali charakteryzującej się maksymalną spektralną emitancją energetyczną, należy zróżniczkować wzór Plancka i przyrównać go do zera.



UWAGA:

Ciało czarne to teoretyczna powierzchnia, która pochłania i wypromieniowuje całą energię promieniowania, którą otrzymuje. Nie odbija ani nie przepuszcza żadnej energii promieniowania. Idealne ciała czarne nie występują w przyrodzie.

Prawo Wiena

$$(3) \quad \lambda_m T = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

To równanie jest nazywane prawem Wiena.

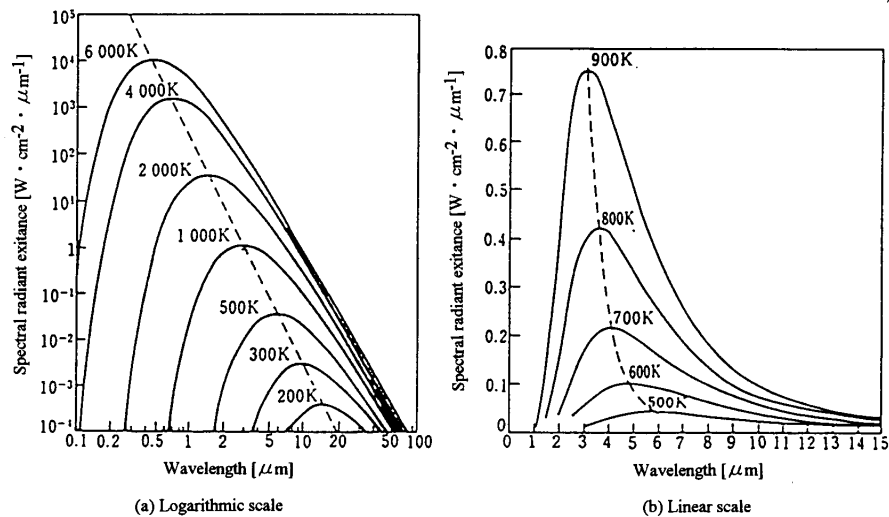
Gdzie w (1) do (3):

W_λ : Emitancja spektralna na jednostkę długości fali powierzchni [$\text{W}/\text{cm}^2\mu\text{m}$]
 λ_m : Długość fali o maksymalnej emitancji spektralnej [μm]
 λ : Długość fali [μm]
 h : Stała Plancka = 6.6261×10^{-32} [Ws^2]
 T : Temperatura bezwzględna [K]
 c : Prędkość światła = 2.9979×10^8 [m/s]
 K : Stała Boltmanna = 1.3807×10^{-23} [Ws/K]
 s : Stała Stefana-Boltzmannna = 5.6705×10^{-12} [$\text{W}/\text{cm}^2\text{K}^4$]
 C_1 : Pierwsza stała promieniowania = 3.7418×10^4 [$\text{W}/\text{cm}^2\mu\text{m}^4$]
 C_2 : Druga stała promieniowania = 1.4388×10^4 [μmK]

Dla promieniowania ciała normalnego, z uwagi iż emisyjność jest niższa (<1) niż ciała czarnego, należy pomnożyć powyższy wzór przez emisyjność. Następujące rysunki przedstawiają spektralną emitancję energetyczną ciała czarnego.

(a) rysunek w skali logarymicznej (b) rysunek w skali liniowej.

Spektralna emitancja energetyczna ciała czarnego



Wykresy pokazują, że długość fali i spektralna emitancja energetyczna zależą do temperatury. Pokazują też, że ze wzrostem temperatury, maksimum spektralnej emitancji energetycznej przesuwa się w kierunku fal o krótszej długości. To zjawisko da się zaobserwować w regionie fal świetlnych, ponieważ obiekt o niższej temperaturze świeci na czerwono, a wraz ze

wzrostem temperatury kolor zmienia się na żółtawy a następnie białawy, co oznacza przesunięcie w kierunku coraz krótszych fal ze wzrostem temperatury.

7.4. Wzorzec ciała czarnego i emisyjność

Chociaż ciało czarne jest tylko teoretycznym ideałem, można zbudować obiekt, który jest do niego zbliżony. Prawem ściśle odnoszącym się do ciała czarnego jest prawo Kirchhoffa, które definiuje odbicie, przepuszczalność, pochłanianie i promieniowanie.

$$a = e = 1$$

Pochłanianie jest równe emisyjności, zatem emisyjność może być opisana za pomocą odbicia i przepuszczalności.

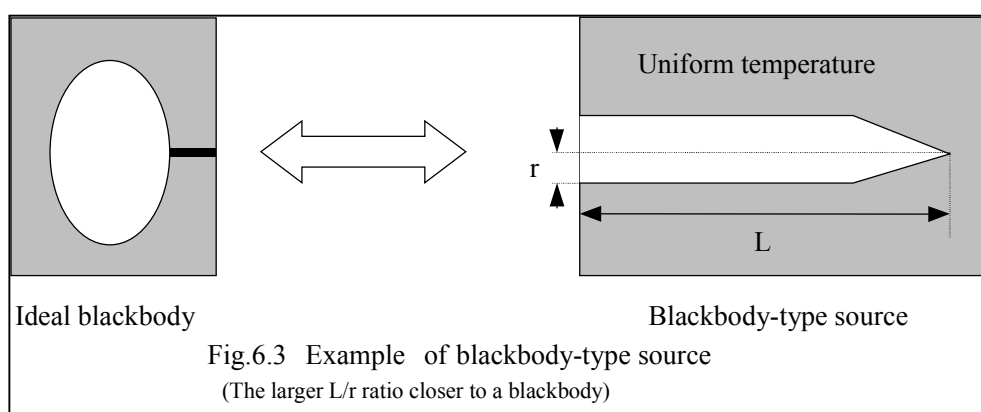
$$a + t + r = 1$$

Oznaczenia:

a = pochłanianie
t = przepuszcz.
r = odbicie
e = emisyjność

Aby uzyskać rzeczywistą temperaturę obiektu, konieczne jest poznanie jego prawdziwej emisyjności. Dlatego emisyjność obiektu musi być zmierzona za pomocą wzorca ciała czarnego, który jest zbliżony własnościami do ciała czarnego najbardziej jak to tylko możliwe. Wzorzec ciała czarnego może być skonstruowany tak by spełniał warunki wskazane prawem Kirchhoffa, w którym "promieniowanie w obudowie izotermicznej jest promieniowaniem ciała czarnego".

Źródło typu ciała czarnego do pomiarów, musi promieniować na zewnątrz zamkniętej powierzchni poprzez mały otwór wywiercony przez ścianę obudowy, na tyle mały aby nie zakłócać warunków ciała czarnego. Promieniowanie opuszczające ten otwór jest prawie takie samo jak dla ciała czarnego. Gdy średnica otworu wynosi $2r$ a głębokość L , to jeśli L/r jest większy lub równy 6, można go traktować jak wzorzec ciała czarnego dla celów praktycznych. Poniższe rysunki ilustrują przykłady wzorcowych źródeł typu ciała czarnego oparte o warunki ciała czarnego.



7.5. Wyznaczanie emisyjności

Emisyjność jest stosunkiem energii promieniowanej przez obiekt na zewnątrz do energii promieniowanej przez ciało czarne. Emisyjność zależy od stanu powierzchni obiektu, temperatury i długości fali. Jeśli wartość emisyjności nie jest precyzyjna, wtedy nie można wyznaczyć dokładnie rzeczywistej temperatury. Inaczej mówiąc zmiany emisyjności prowadzą do zmiany wskazań temperatury przez kamerę.

Aby zbliżyć się do rzeczywistej temperatury należy więc,

Emisyjność musi być zbliżona do 1.0 (->Mierzony obiekt musi być prawie ciałem czarnym)
Emisyjność musi być skorygowana. (->Emisyjność mierzonego obiektu musi być wewnętrznie skorygowana w kamerze.)

Dlatego, w celu dokonania prawidłowych pomiarów temperatury, emisyjność musi być wyznaczona następująco:

1) Za pomocą tabeli

Różne książki i literatura podają tabele stałych fizycznych, jednak jeśli warunki pomiaru nie są identyczne, stałe mogą być bezużyteczne. W takich przypadkach literatura może być używana dla celów orientacyjnych.

2) Wyznaczanie za pomocą stosunku – Opcja 1

Termometr typu stykowego jest używany dla potwierdzenia, że obiekt znajduje się w stanie równowagi termicznej i że wzorzec ciała czarnego jest w tej samej temperaturze. Obiekt i wzorzec ciała czarnego jest mierzony za pomocą termometru radiacyjnego i wynikowy stosunek energii jest używany do wyznaczenia emisyjności w sposób następujący:

$$E_K : E_S = 1 : X$$

Gdzie:

E_K : energia wzorca ciała czarnego
 E_S : energia ciała mierzonego
 X : emisyjność mierzonego obiektu

3) Wyznaczanie za pomocą stosunku – Opcja 2

Obiekt przypominający ciało czarne jest przystawiony do źródła ciepła aby uzyskać tę samą temperaturę ciała czarnego co obiektu. Stosunek energii wyznacza emisyjność jak w powyższym wzorze.

4) Porównanie z powierzchnią ciała czarnego – Opcja 1

W mierzonym obiekcie należy wykonać bardzo mały otwór aby uzyskać warunki dla ciała czarnego wspomniane wcześniej, i doprowadzić do jednorodnej temperatury całego ciała. Następnie używając funkcji korekcji emisyjności w kamerze, redukować emisyjność dopóki wskazanie temperatury mierzonego obiektu nie będzie identyczne z temperaturą otworu zmierzonego przy emisyjności 1. Ustawiona emisyjność będzie emisyjnością obiektu. (Dotyczy to tylko warunków takich samych jak podczas pomiaru.)

5) Porównanie z powierzchnią ciała czarnego – Opcja 2

Jeśli w obiekcie nie można wykonać żadnego otworu, wtedy emisyjność można uzyskać nakładając czarną farbę na obiekt i osiągając równowagę termiczną a pomocą opisanych procedur. Ponieważ pomalowany obiekt nie posiada całkowitych cech ciała czarnego, emisyjność pomalowanego obiektu musi być najpierw określona i dopiero wtedy wykonane pomiary temperatury. Poniżej przedstawiono przykłady farb zbliżonych do ciała czarnego.

**Przykłady farb
zbliżonych do ciała
czarnego**

Nazwa	Emisyjność	Pasma
Farba termoodporna (czarna)	0.96	8 do 13µm
Farba termoodporna (czarna)	0.95	3 do 5.3µm
Taśma niflonowa	0.94	8 do 13µm



UWAGA:

Przy niskich temperaturach można użyć taśmy maskującej lub skrobi kukurydzianej.

7.6. Szumy tła

Podczas pomiarów temperatury obiektów za pomocą termometru radiacyjnego, ważne jest aby wziąć pod uwagę wspomnianą powyżej korekcję emisyjności jak również warunki środowiskowe miejsca w którym pomiary będą dokonywane.

Promieniowanie podczerwone przedostaje się do kamery z obiektu mierzonego oraz wszelkich obiektów leżących w jego pobliżu. Dlatego aby uniknąć ich wpływu, konieczna jest funkcja korekcji odbicia środowiskowego, itp. Także gdy wymagane są bardzo precyzyjne wyniki, konieczne jest na przykład zminimalizowanie wpływu środowiska, przez skrócenie drogi transmisji promieniowania.

Aby zredukować szum tła mogą być użyteczne następujące metody.

- 1) Skrócenie odległości między kamerą i mierzonym obiektem. Należy utrzymywać bezpieczny dystans aby chronić operatora jak również sprzęt.
- 2) Unikać obiektów o wysokiej temperaturze za mierzonym obiektem, jak np. słońca świecącego z tyłu obiektu.
- 3) Nie dopuszczać aby promieniowanie słoneczne padało na kamerę.
- 4) Nie pozwalać aby przeszkody takie jak pył lub para (które tłumią promieniowanie podczerwone) znajdowały się między kamerą a mierzonym obiektem.

7.7. Pomiar praktyczne

Istnieje wiele metod korekcji emisyjności w celu uzyskania prawidłowej wartości temperatury. Procedura korekcji dla każdej metody jest opisana poniżej.

(1) Metoda porównania lub bezpośredniego pomiaru z emisyjnością równą lub zbliżoną do 1.0

- a) Ustabilizować temperaturę mierzonego obiektu lub podobnego materiału.
- b) Otworzyć bardzo mały otwór (dalej zwany częścią ciała czarnego) w obiekcie który ma być zmierzony kamerą.
- c) Ustawić funkcję korekcji emisyjności kamery tak, aby temperatura części ciała czarnego i reszty powierzchni były takie same. Ustawiona w ten sposób emisyjność jest emisyjnością mierzonej powierzchni.
- d) Przy późniejszym pomiarze obiektu tego samego typu nie trzeba korygować ustawień emisyjności.



NOTE:

If you already know the emissivity, you can make thermal imaging measurements immediately

(2) Metoda bezpośredniego pomiaru emisyjności

Jeśli nie można wykonać otworu jak w metodzie 1, wtedy należy nałożyć czarną farbę o wysokiej emisyjności i przeprowadzić tę samą procedurę uzyskiwania emisyjności. Ponieważ czarna farba nie jest doskonałym ciałem czarnym, najpierw trzeba wyznaczyć emisyjność samej farby.

(3) Pomiar pośredni

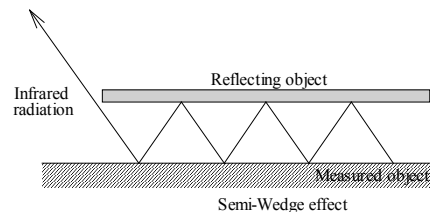
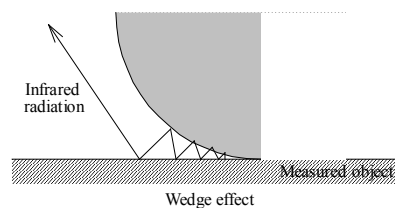
Zmierzyć próbkę zbliżoną do obiektu mierzonego, i umieścić ją w warunkach z możliwością podgrzewania za pomocą grzałki, itp. Następnie zmierzyć obiekt i próbkę na przemian za pomocą kamery i gdy wskazania są identyczne, zmierzyć próbkę za pomocą termometru stykowego. Ustawić emisyjność w kamerze tak, aby wartość wskazywana była zgodna z termometrem stykowym. Ustawiona emisyjność jest emisyjnością mierzonego obiektu.

(4) Pomiar z wykorzystaniem efektu klina

Za pomocą tej metody, emisyjność mierzonej powierzchni jest samoczynnie wzmacniana za pomocą efektu klina lub pozornego klina. Należy jednak zwrócić uwagę na liczbę odbić i/lub kąt pomiaru.

Mała zmiana kąta może zredukować wzmocnienie emisyjności.

Pomiar z efektem klina



7.8. Emisyjność różnych materiałów

Na podstawie książki "Infrared Radiation, a Handbook for Applications" Mikaela A. Bramsona

Materiał		Temperatura °C	Emisyjność ϵ
Aluminium	Polerowany	50 to 100	0.04 to 0.06
jw.	Chropowata powierzchnia	20 to 50	0.06 to 0.07
jw.	Silnie utleniony	50 to 500	0.20 to 0.3
jw.	Brąz aluminiowy	20	0.6
jw.	Tlenek aluminium, czysty, proszek	Temperatura normalna	0.16
Mosiądz	Matowy	20 to 350	0.22
jw.	Utleniony w 600°C	200 to 600	0.59 to 0.61
jw.	Polerowany	200	0.03
jw.	Arkusze, obrobione ściernie	20	0.2
Brąz	Polerowany	50	0.1
jw.	Porowaty, chropowaty	50 to 150	0.55
Chrom	Polerowany	50	0.1
jw.	jw.	500 to 1000	0.28 to 0.38
Miedź	Komercyjna, wytapiana	20	0.07
jw.	Elektrolityczna, starannie polerowana	80	0.018
jw.	Elektrolityczna, proszek	Temperatura normalna	0.76
jw.	Stopiona	1100 to 1300	0.13 to 0.15
jw.	Utleniona	50	0.6 to 0.7
jw.	Utleniona na czarno	5	0.88
Żelazo	Pokryte rdzą rdzą	20	0.61 to 0.85
jw.	Elektrolityczne, starannie polerowane	175 to 225	0.05 to 0.06
jw.	Świeżo obrobione pilnikiem	20	0.24
jw.	Utlenione	100	0.74
jw.	jw.	125 to 525	0.78 to 0.82
jw.	Gorąco walcowane	20	0.77
jw.	jw.	130	0.60
Ołów	Szary, utleniony	20	0.28
jw.	Utleniony w 200°C	200	0.63
jw.	Czerwony, proszek	100	0.93
jw.	Siarczan ołowiu, proszek	Temperatura normalna	0.13 to 0.22
Rtęć		0 to 100	0.09 to 0.12
Molibden		600 to 1000	0.08 to 0.13
jw.	Włókno	700 to 2500	0.10 to 0.30
Nichrom	Drut, czysty	50	0.65
jw.	jw.	500 to 1000	0.71 to 0.79
jw.	Drut, utleniony	50 to 500	0.95 to 0.98
Nikiel	Komercyjnie czysty, polerowany	100	0.045
jw.	jw.	200 to 400	0.07 to 0.09
jw.	Utleniony w 600°C	200 to 600	0.37 to 0.48
jw.	Drut	200 to 1000	0.1 to 0.2
jw.	Tlenek niklu	500 to 650	0.52 to 0.59
jw.	jw.	1000 to 1250	0.75 to 0.86
Platyna		1000 to 1500	0.14 to 0.18
jw.	Czysta, polerowana	200 to 600	0.05 to 0.10
jw.	Taśma	900 to 1100	0.12 to 0.17
jw.	Drut	50 to 200	0.06 to 0.07
jw.	jw.	500 to 1000	0.10 to 0.16
Srebro	Czyste, polerowane	200 to 600	0.02 to 0.03
Stal	Stop (8% Ni, 18% Cr)	500	0.35

jw.	Galwanizowana	20	0.28
jw.	Utleniona	200 to 600	0.80
jw.	Silnie utleniona	50	0.88
jw.	jw.	500	0.98
jw.	Świeżo walcowana	20	0.24
jw.	Chropowata powierzchnia	50	0.95 to 0.98
jw.	Zardzewiała, ruda	20	0.69
jw.	Arkusze	950 to 1100	0.55 to 0.61
jw.	Arkusze, niklowane	20	0.11
jw.	Arkusze, polerowane	750 to 1050	0.52 to 0.56
jw.	Arkusze, walcowane	50	0.56
jw.	Nierdzewna, walcowana	700	0.45
jw.	Nierdzewna, piaskowana	700	0.70
Żeliwo	Odlew	50	0.81
jw.	Wlewki	1000	0.95
jw.	Ciekłe	1300	0.28
jw.	Utlenione w 600°C	200 to 600	0.64 to 0.78
jw.	Polerowane	200	0.21
Cyna	Wytapiana	20 to 50	0.04 to 0.06
Tytan	Utleniony w 540°C	200	0.40
jw.	jw.	500	0.50
jw.	jw.	1000	0.60
jw.	Polerowane	200	0.15
jw.	jw.	500	0.20
jw.	jw.	1000	0.36
Wolfram		200	0.05
jw.		600 to 1000	0.1 to 0.16
jw.	Włókno	3300	0.39
Cynk	Utleniony w 400°C	400	0.11
jw.	Utleniona powierzchnia	1000 to 1200	0.50 to 0.60
jw.	Polerowane	200 to 300	0.04 to 0.05
jw.	Arkusze	50	0.20
Cyrykon	Tlenek cyrykonu, proszek	Temperatura normalna	0.16 to 0.20
jw.	Krzemian cyrykonu, proszek	jw.	0.36 to 0.42
Azbest	Płyta	20	0.96
jw.	Papier	40 to 400	0.93 to 0.95
jw.	Proszek	Temperatura normalna	0.40 to 0.60
jw.	Łupek	20	0.96
Węgiel	Włókno	1000 to 1400	0.53
jw.	Oczyszczony (0.9% popiołu)	100 to 600	0.81 to 0.79
Cement		Temperatura normalna	0.54
Węgiel drzewny	Proszek	jw.	0.96
Gлина	Wypalona	70	0.91
Tkanina	Czarna	20	0.98
Ebonit		Temperatura normalna	0.89
Korund nat.	Gruby	80	0.85
Lakier	Bakelit	80	0.93
jw.	Czarny, matowy	40 to 100	0.96 to 0.98
jw.	Czarny, błyszczący, natryśnięty na stal	20	0.87
jw.	Ciepłoodporny	100	0.92
jw.	Biały	40 to 100	0.8 to 0.95
Sadza		20 to 400	0.95 to 0.97
jw.	Nałożona na stałą powierzchnię	50 to 1000	0.96
jw.	Ze szkłem wodnym	20 to 200	0.96

Papier	Czarny	Temperatura normalna	0.90
jw.	Czarny, matowy	jw.	0.94
jw.	Zielony	jw.	0.85
jw.	Czerwony	jw.	0.76
jw.	Biały	20	0.7 to 0.9
jw.	Żółty	Temperatura normalna	0.72
Szkło		20 to 100	0.94 to 0.91
jw.		250 to 1000	0.87 to 0.72
jw.		1100 to 1500	0.70 to 0.67
jw.	Oszronione	20	0.96
Gips		20	0.80 to 0.90
Lód	Pokryty mocnym szronem	0	0.98
jw.	Gładki	0	0.97
Wapień		Temperatura normalna	0.30 to 0.40
Marmur	Szary, polerowany	20	0.93
Mika	Gruba warstwa	Temperatura normalna	0.72
Porcelana	Szklista	20	0.92
jw.	Biała, błyszcząca	Temperatura normalna	0.70 to 0.75
Guma	Twarda	20	0.95
jw.	Miękka, szara, chropowata	20	0.86
Piasek		Temperatura normalna	0.60
Szelak	Czarny, matowy	75 to 150	0.91
jw.	Czarny, błyszczący, na płycie cynowej	20	0.82
Krzemionka	Granulowany proszek	Temperatura normalna	0.48
jw.	Silikon (silikażel), proszek	jw.	0.30
Żużel	Kotłowy	0 to 100	0.97 to 0.93
jw.	jw.	200 to 500	0.89 to 0.78
jw.	jw.	600 to 1200	0.76 to 0.70
Śnieg			0.80
Tynk	Chropowaty, wapienny	10 to 90	0.91
Smola			0.79 to 0.84
jw.	Papier smołowany	20	0.91 to 0.93
Woda	Warstwa na metalowej powierzchni	20	0.98
jw.	Warstwa > 0.1mm grubości	0 to 100	0.95 to 0.98
Cegła	Czerwona, chropowata	20	0.88 to 0.93
jw.	Ognioodporna	20	0.85
jw.	jw.	1000	0.75
jw.	jw.	1200	0.59
jw.	Ognioodporna korundowa	1000	0.46
jw.	Szmatowa, silnie promieniująca	500 to 1000	0.80 to 0.90
jw.	Szmatowa, słabo promieniująca	500 to 1000	0.65 to 0.75
jw.	Silikatowa (95% SiO ₂)	1230	0.66

W celu zapewnienia właściwego formatowania dokumentu, ta strona jest celowo pusta.