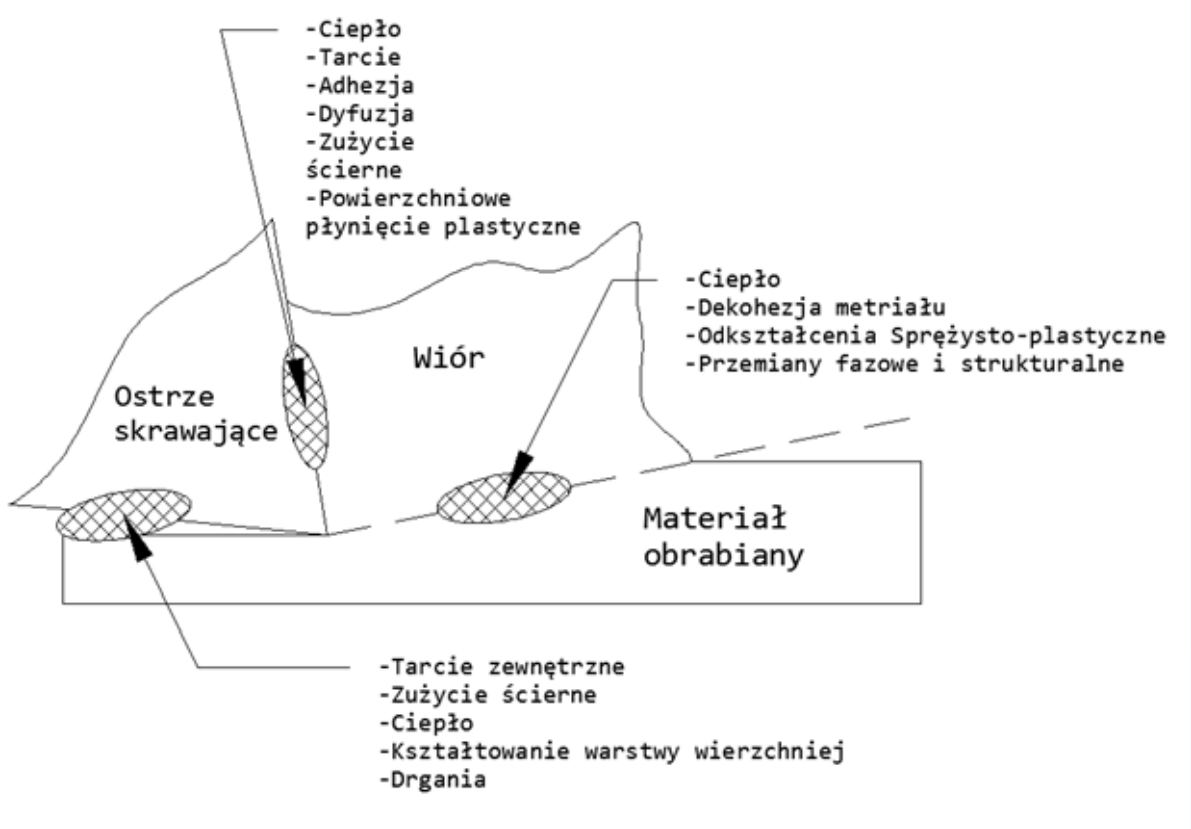
Monitoring, modelowanie i symulacja procesów obróbki

Zastosowanie kamer:

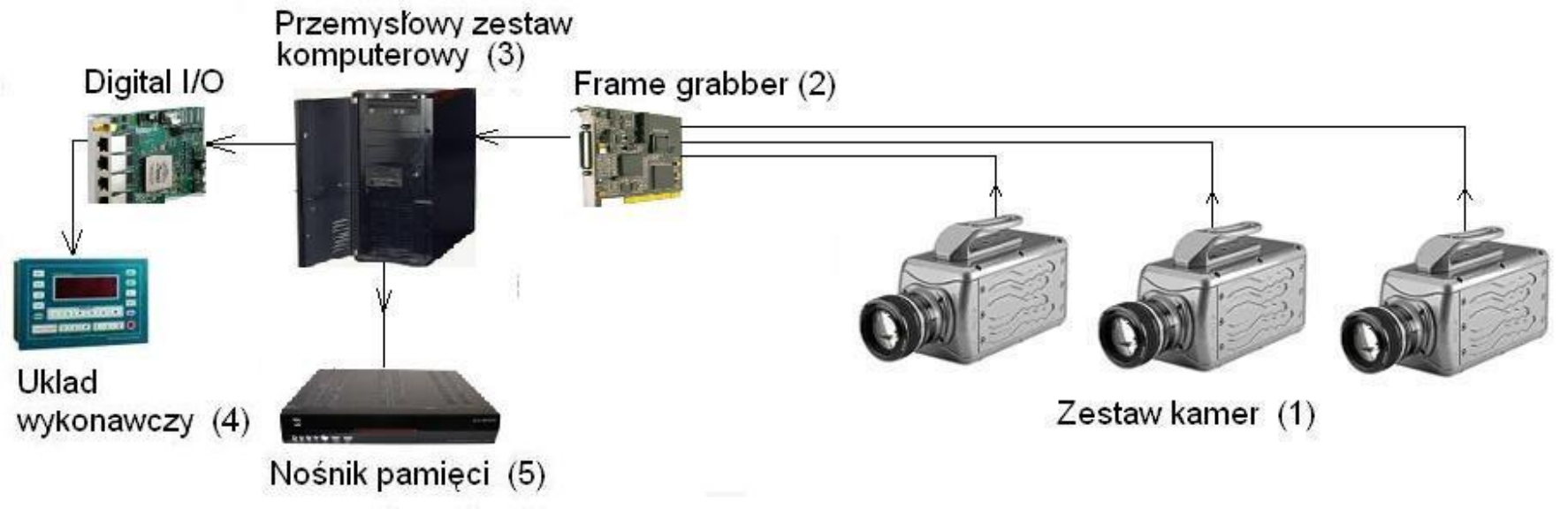
termowizyjnej i szybkoklatkowej

Fizyczne aspekty procesu skrawania



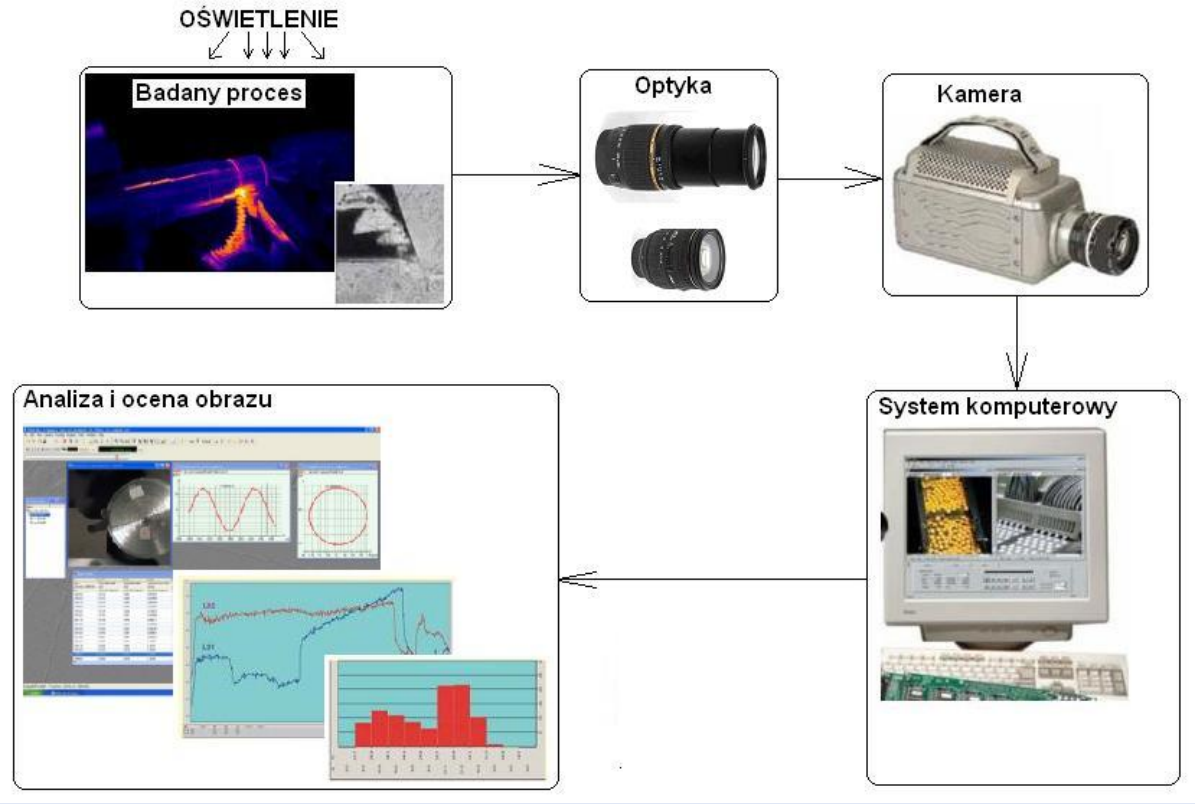
Zjawiska fizyczne zachodzące w procesie skrawania

System wizyjny



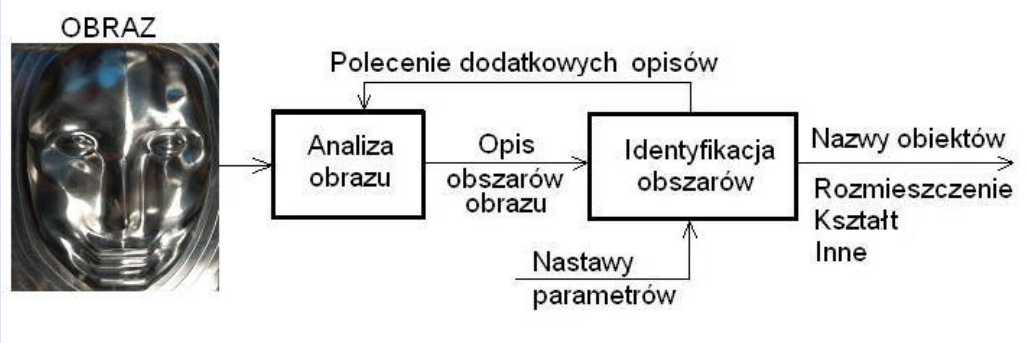
Przykładowa struktura systemu wizyjnego: (1) zestaw kamer, (2) frame grabber, (3) jednostka obliczeniowa – przemysłowy zestaw komputerowy z oprogramowaniem, (4) układ wykonawczy, (5) nośnik pamięci

Wizyjny system nadzorowania

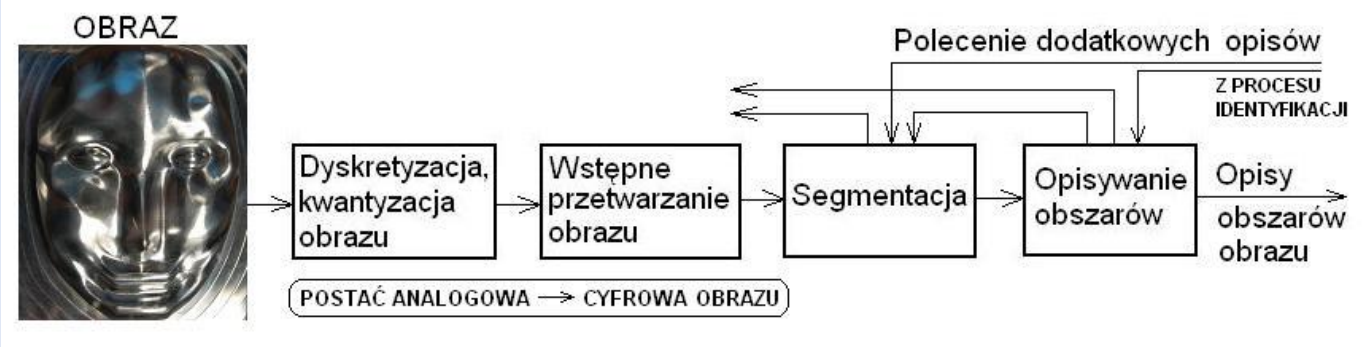


Schemat stanowiska do monitorowania procesu wytwarzania. Obrazy badanego procesu, po zarejestrowaniu przez kamerę są poddane analizie i ocenie przez specjalizowane oprogramowanie

Wizyjny system nadzorowania



Schemat procesu interpretacji obrazu. Moduł analizy umożliwia opis charakterystycznych cech obszarów obrazu, ich identyfikację a następnie określenie nazw obiektów, kształt i ich rozmieszczenie w obrębie obrazu



Schemat analizy obrazu. Po zamianie postaci analogowej na cyfrową obraz poddany jest wstępnemu przetwarzaniu, segmentacji a następnie opisowi wszystkich jego fragmentów

Ciepło w procesie skrawania

Q_γ *- Ciepło wytwarzane na powierzchni natarcia*

Q_α *- Ciepło wytwarzane na powierzchni przyłożenia*

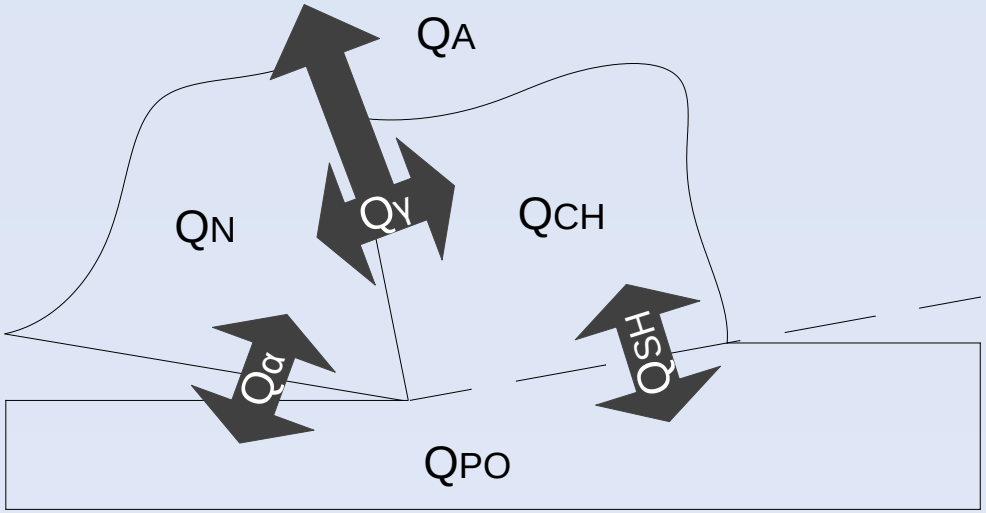
Q_{ch} *- Ciepło unoszone przez wiór*

Q_{PO} *- Ciepło wnikające w przedmiot obrabiany*

Q_N *- Ciepło wnikające w narzędzie*

Q_A *- Ciepło unoszone do otoczenia*

Q_{sh} - Ciepło wytwarzanie w strefie ścinania



$$Q_{sh} + Q_\gamma + Q_\alpha = Q_{ch} + Q_{PO} + Q_N + Q_A$$

Podział stref temperaturowych podczas skrawania

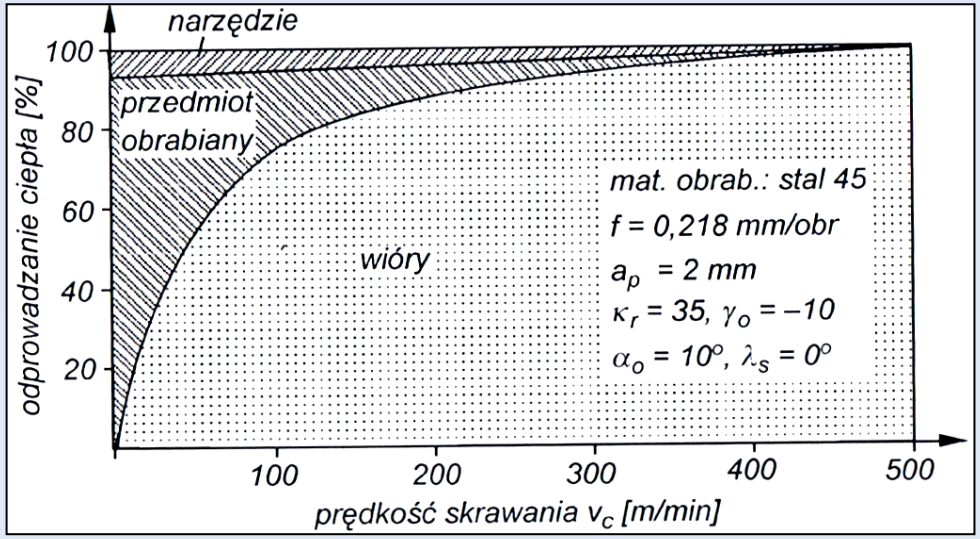
Ciepło w procesie skrawania

Ciepło które powstaje jest :

- unoszone przez tworzące się wióry,
- przewodzone do narzędzia i przejmowane przez materiał obrabiany,
- unoszone przez płyn obróbkowy i powietrze.

Ciepło rozpatrywane jako wydzielone w jednostce czasu równe jest mocy skrawania, czyli iloczynowi głównej siły i prędkości skrawania

$$Q = P_e = F_c \cdot v_c$$

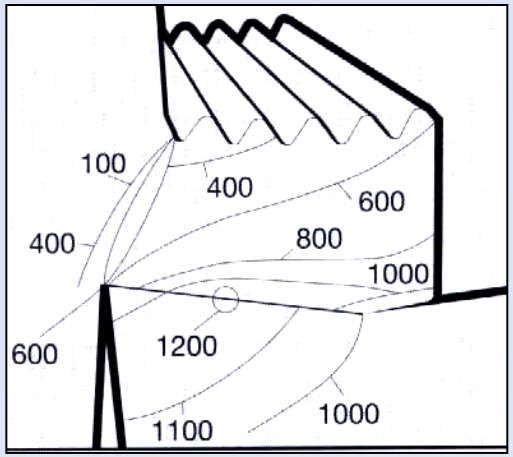


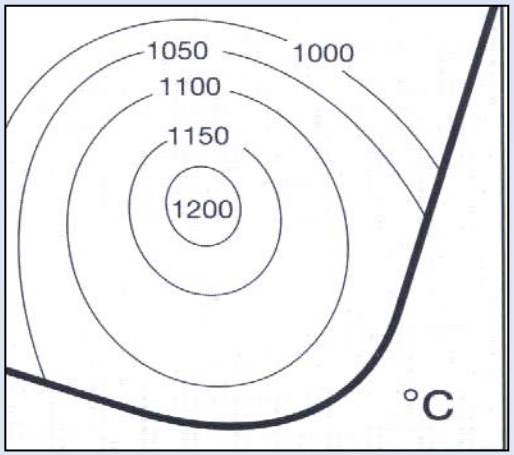
Wykres zależności odprowadzania ciepła w zależności od prędkości skrawania

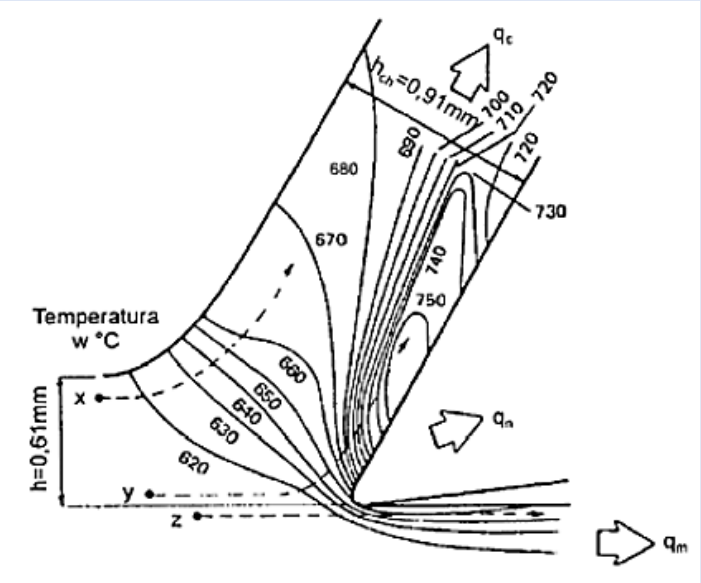
Temperatura w procesie skrawania

Czynniki wpływające na wartość temperatury:

- materiał obrabiany
- materiał ostrza
- geometria i stereometria ostrza
- parametry skrawania (prędkość, posuw, głębokość skrawania)
- rodzaj wiórów
- sposób chłodzenia

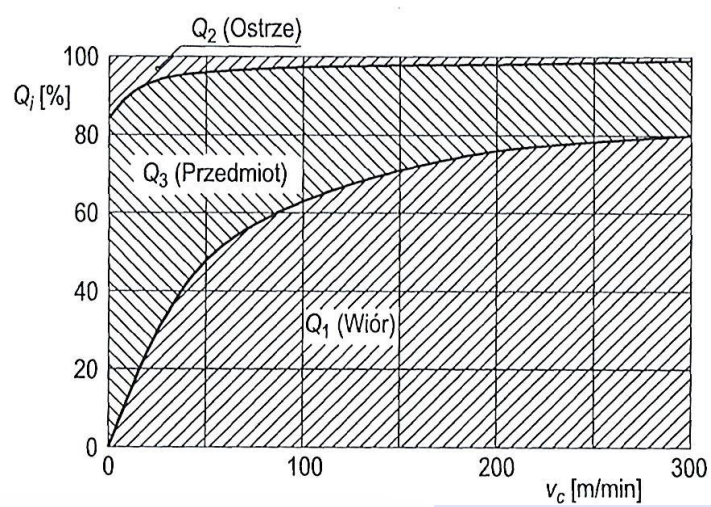


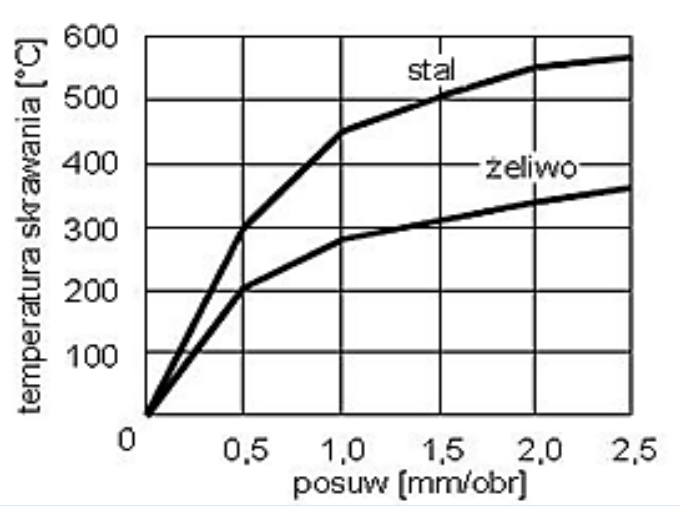


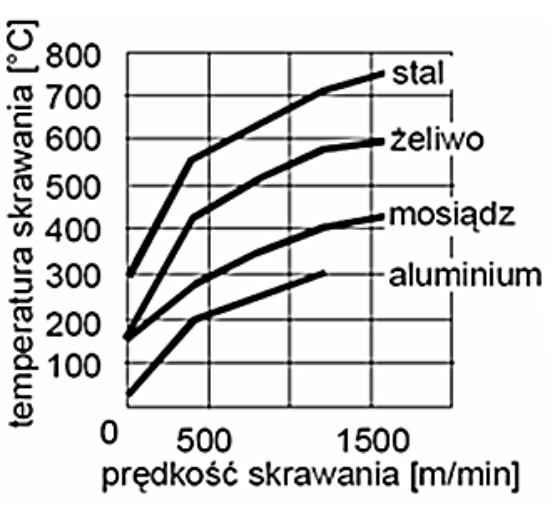


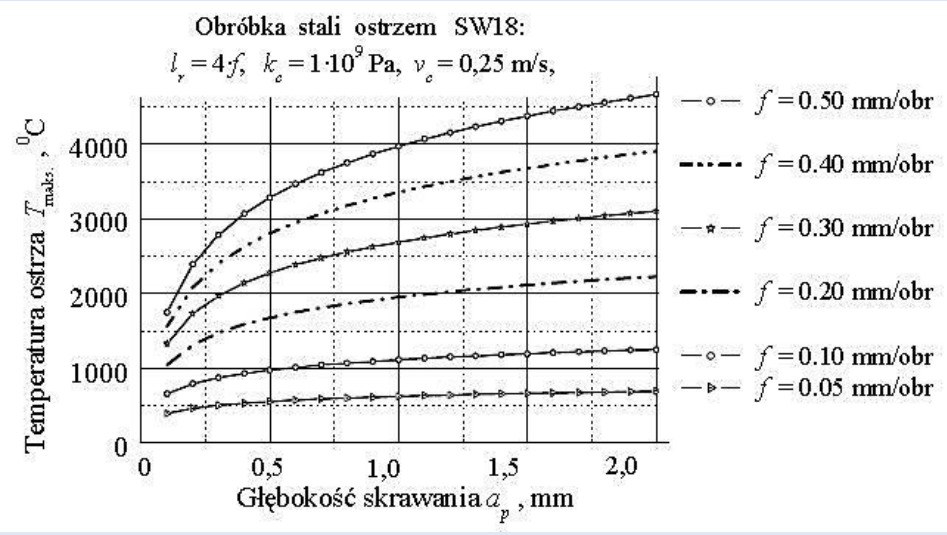
Rozkład temperatury w strefie skrawania

Temperatura w procesie skrawania







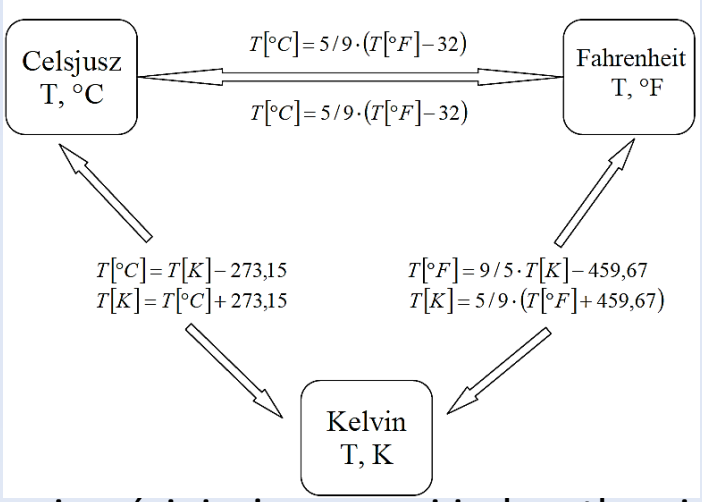


Wpływ parametrów skrawania na wartość temperatury

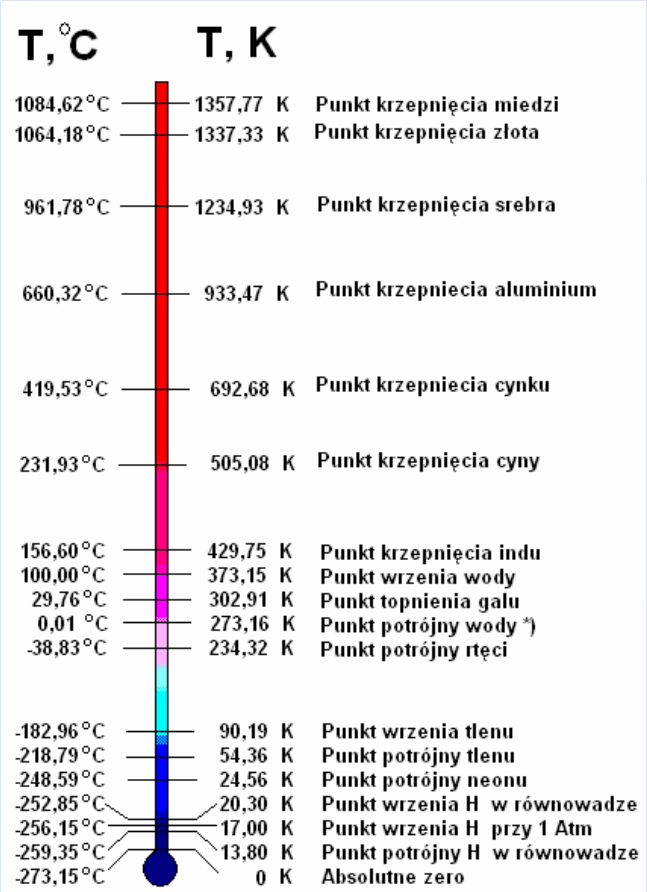
Międzynarodowa Skala Temperatury

Międzynarodowa Skala Temperatury 1990 (MTS-90; ang. International Temperature Scale, ITS-90) charakteryzuje się 17 punktami stałymi. Wyróżnia ona skale międzynarodowe Kelwina K oraz Celsjusza ºC. Podstawową skalą w układzie SI jest skala Kelwina odpowiadająca 1/273,16 temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody.

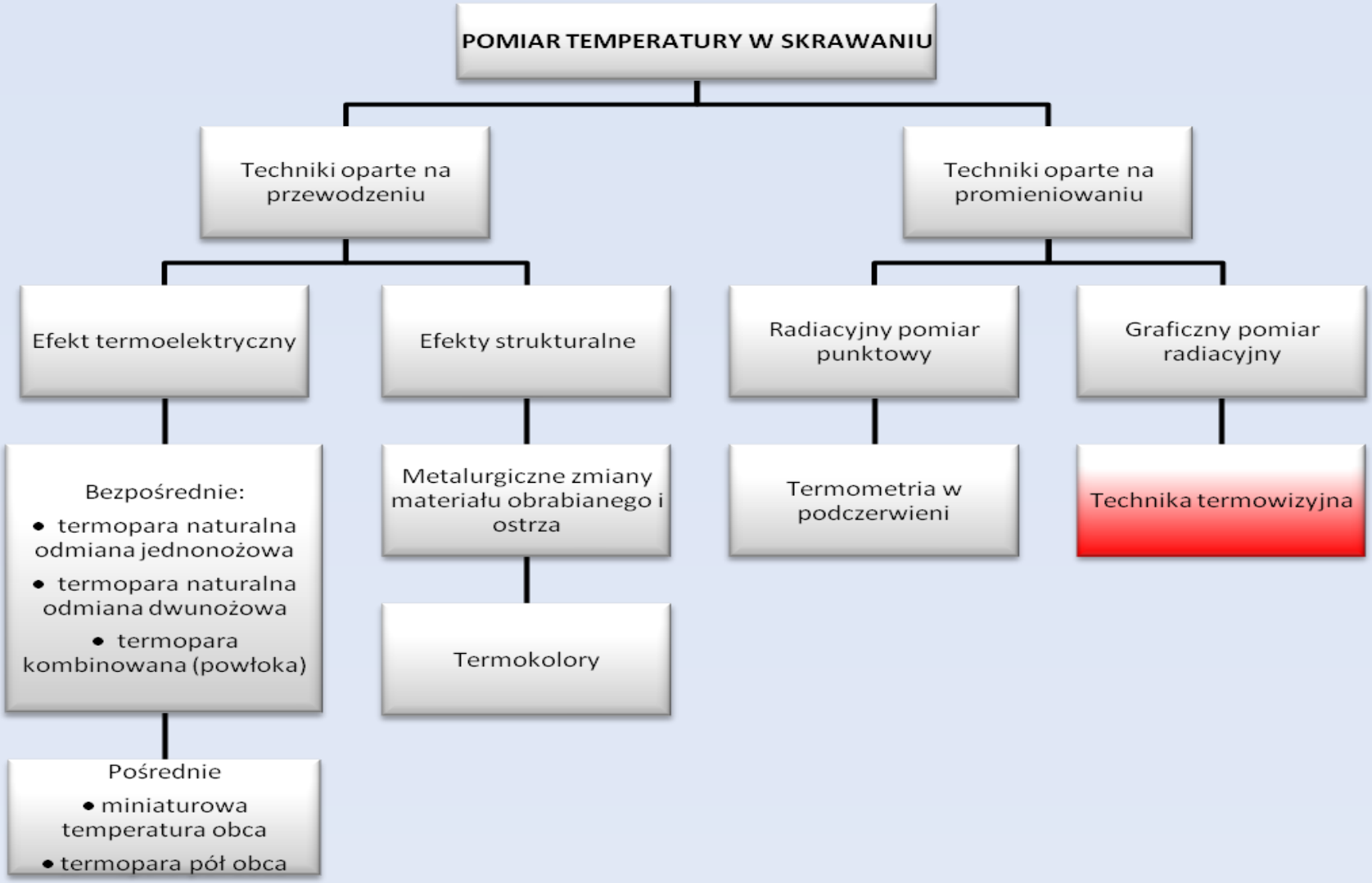
Skala Celsjusza oparta jest na dwóch punktach stałych, temperaturze topnienia lodu pod ciśnieniem jednej atmosfery (101325 Pa) i wynoszącej 0ºC i temperaturze wrzenia wody pod tym samym ciśnieniem równej 100ºC. Spotkać można także skale temperatur: Fahrenheita, Rankine'a, Reaumura.



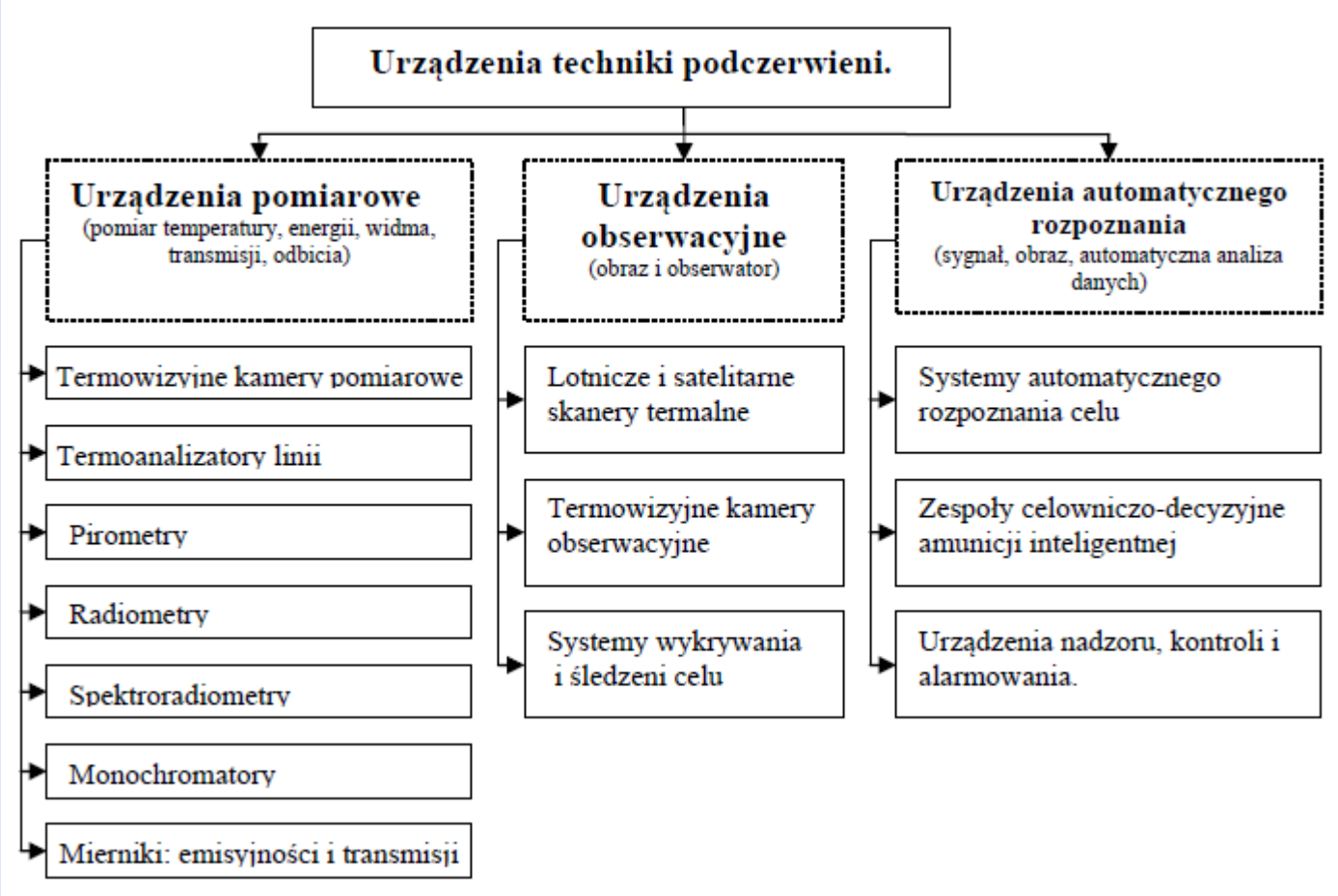
Zależności między najczęściej używanymi jednostkami



Metody pomiaru temperatury



Metody pomiaru temperatury



Metody pomiaru temperatury w strefie skrawania

W zależności od oddziaływania między badanym obiektem a czujnikiem pomiarowym wyróżnić można:

- pomiar dotykowy – dochodzi do styku czujnika (termometru) z obiektem, którego temperaturę mierzymy,
- pomiar bezdotykowy – poprzez pomiar promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez rozgrzane ciało

W zależności od wykorzystanych do pomiaru własności fizycznych czujnika pomiarowego, wyróżnić można pomiar z wykorzystaniem zjawiska:

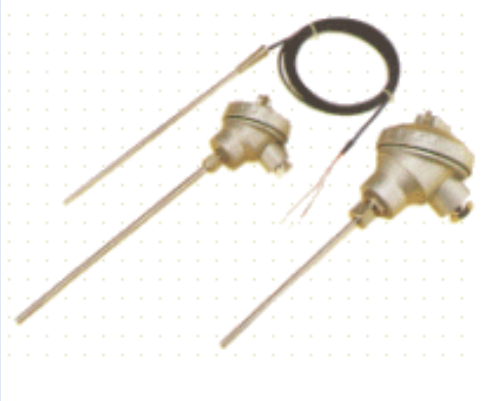
- odkształcenia bimetalu;
- wytwarzania napięcia elektrycznego na styku dwóch metali (termopara) w różnych temperaturach;
- zmiany rezystancji elementu (termistor);
- zmiany parametrów złącza półprzewodnikowego (termometr diodowy);
- zmiany objętości cieczy, gazu lub długości ciała stałego (termometr, termometr cieczowy);
- parametrów promieniowania cieplnego ciała np. kamera termowizyjna, pirometr.

Metody pomiaru temperatury w strefie skrawania

Termoparą nazywamy obwód zbudowany z dwóch różnych metali lub półprzewodników.
Termopary najczęściej wykonane są z:

- miedzi i konstantu (40%Ni i 60%Cu) -zakres pomiarowy od 70 K do 800 K.
- platyny i platyno rodu (90%Pt i 10%Rh) -zakres pomiarowy do 1300 K
- irydu i stopu irydu z rodem -zakres pomiarowy do 2300 K

pirometr



termopara

termistor

termometr diodowy

Metody pomiaru temperatury w strefie skrawania

Wskaźnikowe metody pomiaru temperatury w strefie skrawania (błąd nawet 30%):

- Metoda barw nalotowych
- Farby termometryczne
- Wskaźniki topnikowe

Metody pomiaru temperatury w oparciu o pomiar siły termoelektrycznej:

- obcego termoelementu,
- pół-obcego termoelementu,
- naturalnego termoelementu - jednonarzędziowa,
- naturalnego termoelementu – dwunarzędziowa.

Metody pomiaru temperatury w strefie skrawania

Wskaźnikowe metody pomiaru temperatury w strefie skrawania (błąd nawet 30%):

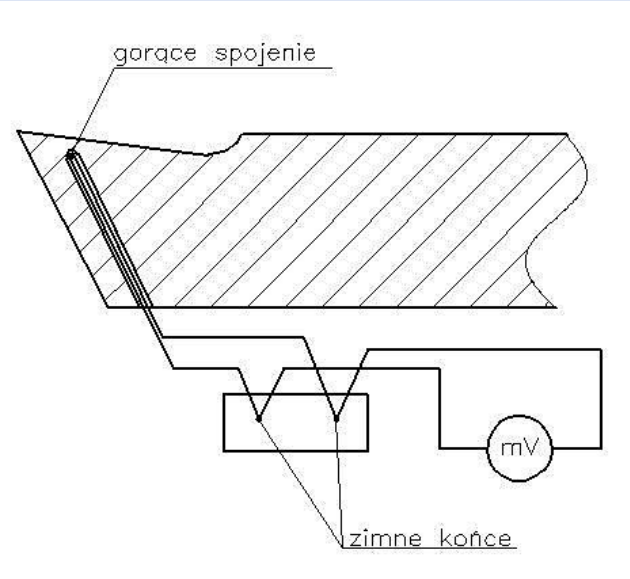
Metoda barw nalotowych
Obserwator procesu ocenia barwę powstającego wióra, który pokrywa się warstwą tlenków. Barwa wióra zależna jest od temperatury.

Farby termometryczne
Przedmiot obrabiany pokrywa się farbą termometryczną. Farby te cechuje fakt, że zmieniają swoją barwę w sposób ciągły lub nieciągły wraz ze zmianą temperatury. Metodę tą wyróżnia możliwość zaobserwowania zmian cieplnych także na materiałach niemetalicznych. Zaletą metody jest możliwość uzyskania obrazu pola temperatur na powierzchniach ostrza nie poddanych ścieraniu podczas skrawania.

Wskaźniki topnikowe
Wskaźniki topnikowe, są to odpowiednio wyselekcjonowane związki chemiczne, wytwarzane w postaci kredek lub szybkoschnących cieczy. W temperaturach niższych niż temperatura topnienia wskaźnika znak wykonany kredką lub płynem jest matowy, podobny do śladu, jaki zostawia kreda; po osiągnięciu temperatury topnienia wskaźnika i ponownym ostudzeniu staje się on gładki, nosząc ślady stopienia.

Metody pomiaru temperatury w strefie skrawania

Metoda pomiaru temperatury za pomocą obcego termoelementu



Metoda obcego termoelementu polega na wprowadzeniu w uprzednio wywiercony otwór, termoelementu (np. termopary).

Dzięki możliwości zastosowaniu oprzyrządowania z wieloma, różnie umieszczonymi otworami, możliwe jest zmierzenie wartości temperatury w różnych miejscach części roboczej.

Wadą tej metody przede wszystkim jest brak możliwości określenia wartości temperatury w pobliżu krawędzi skrawającej, gdzie gradienty temperatur są najwyższe. Dodatkowo utworzone otwory zakłócają pomiar z powodu innej charakterystyki odprowadzenia ciepła.

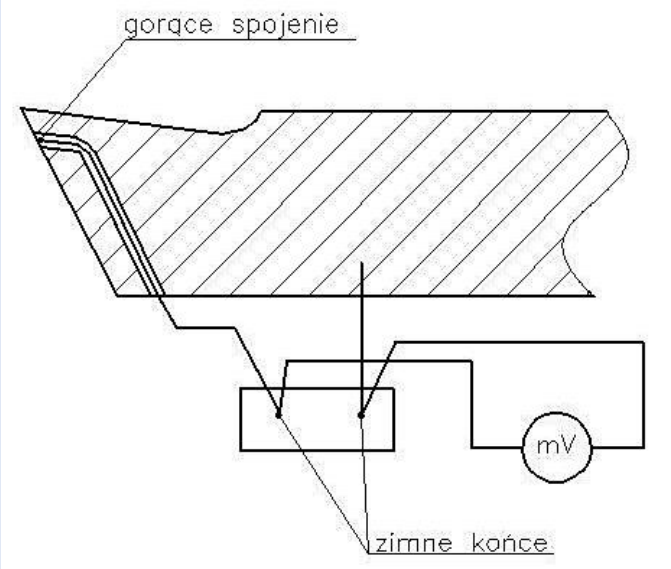
Metody pomiaru temperatury w strefie skrawania

Metoda pomiaru temperatury za pomocą pół-obcego termoelementu

Technika pomiaru temperatury za pomocą pół-obcego termoelementu różni się od metody obcego termoelementu tym, że jednym z materiałów termoelementu jest materiał samego narzędzia.

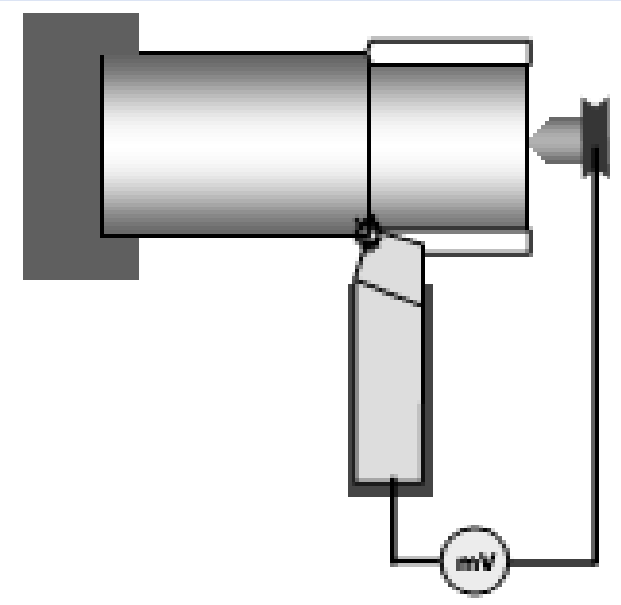
W otwór o średnicy ok. 1 mm wprowadza się cienki drut, który następnie jest kolejnym, większym otworem wyprowadzony na powierzchnię przyłożenia lub natarcia.

W odróżnieniu od zastosowania obcego termoelementu, łatwiejsza jest zmiana miejsca przyłożonego drutu pomiarowego, co daje możliwość dokonywania pomiarów pola temperatur na powierzchniach narzędzia.



Metody pomiaru temperatury w strefie skrawania

Metoda pomiaru temperatury za pomocą naturalnego termoelementu – jednonarzędziowa

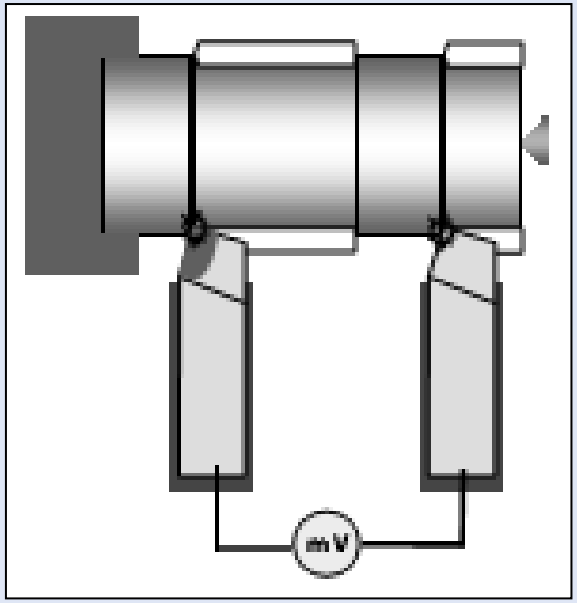


W metodzie jednonarzędziowej naturalnego termoelementu, część pomiarową stanowią zarówno termoelement oraz przedmiot obrabiany. Siła elektromotoryczna tworzona w miejscu kontaktu jest mierzona za pomocą miliwoltomierza. Na powierzchni styku zaobserwować można gradient temperatury. Metoda pomiaru należy do najbardziej rozpowszechnionych i najłatwiejszych do zrealizowania.

Przy zastosowaniu pomiarów tą metodą należy liczyć się z błędami, które wynikają z różnicy między warunkami wzorcowanymi a pracą termoelementu.

Metody pomiaru temperatury w strefie skrawania

Metoda pomiaru temperatury za pomocą naturalnego termoelementu - dwunarzędziowa



W metodzie tej nie jest konieczne powtarzanie wzorcowania termoelementu po każdorazowej zmianie materiału narzędziowego. Rolę tę pełnią dwa noże o identycznej geometrii, lecz o innej charakterystyce materiałowej. Ostrza pracują w takich samych warunkach, więc rodzaj materiału obrabianego nie wpływa znacznie na wartość siły termoelektrycznej.

Ograniczeniem jest fakt powstawania różnicy temperatur w wyniku zróżnicowanych współczynników tarcia i przewodnictwa cieplnego zdefiniowanych ostrzy.

Promieniowanie

Promieniowanie które występuje w przyrodzie, można podzielić na promieniowanie różniące się długością fali λ:

-kosmiczne promieniowanie gamma o długości fali λ<10,5 µm,

-typu „X" w zakresie : 10,5 < λ <0,35 µm,

-ultrafioletowe w zakresie : 10,2 < λ <0,35 µm,

-promieniowanie widzialne w zakresie λ-0,35-0,75 µm,

-promieniowanie podczerwone w zakresie 0,75< λ<103 µm,

-mikrofale i fale radiowe λ>103 µm.

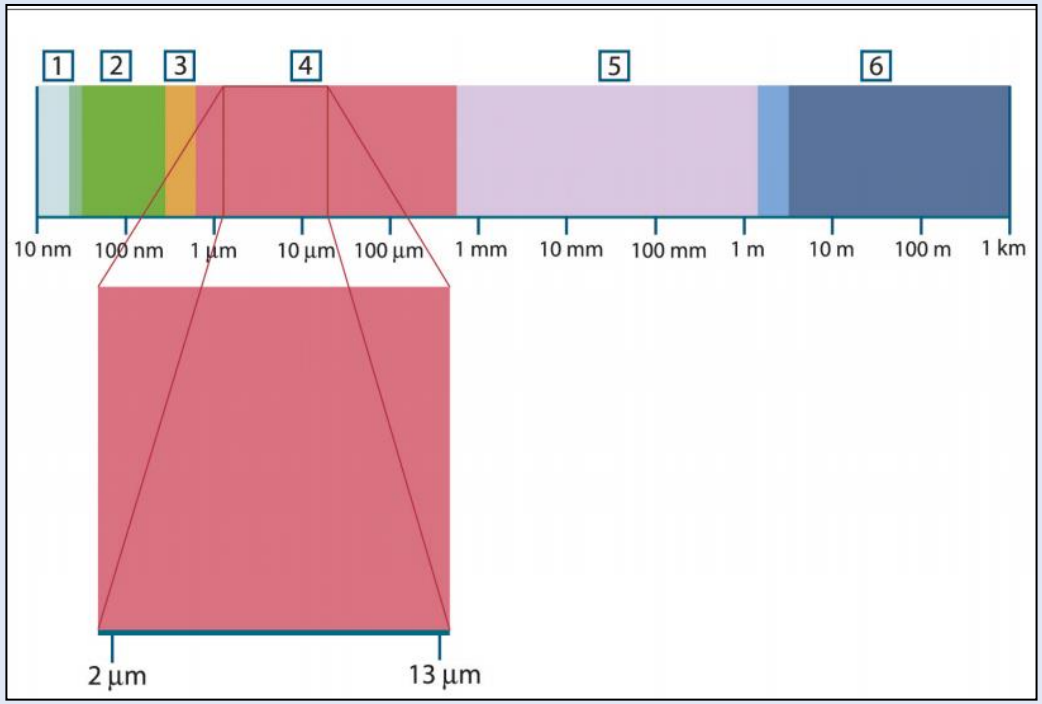
Z kolei pasmo podczerwone:

-podczerwień bliską (0,75-3 µm),

-podczerwień średnią (3-6 µm),

-podczerwień daleką (6-15 µm),

-podczerwień bardzo daleką (>15 µm).



Źródła promieniowania podczerwonego

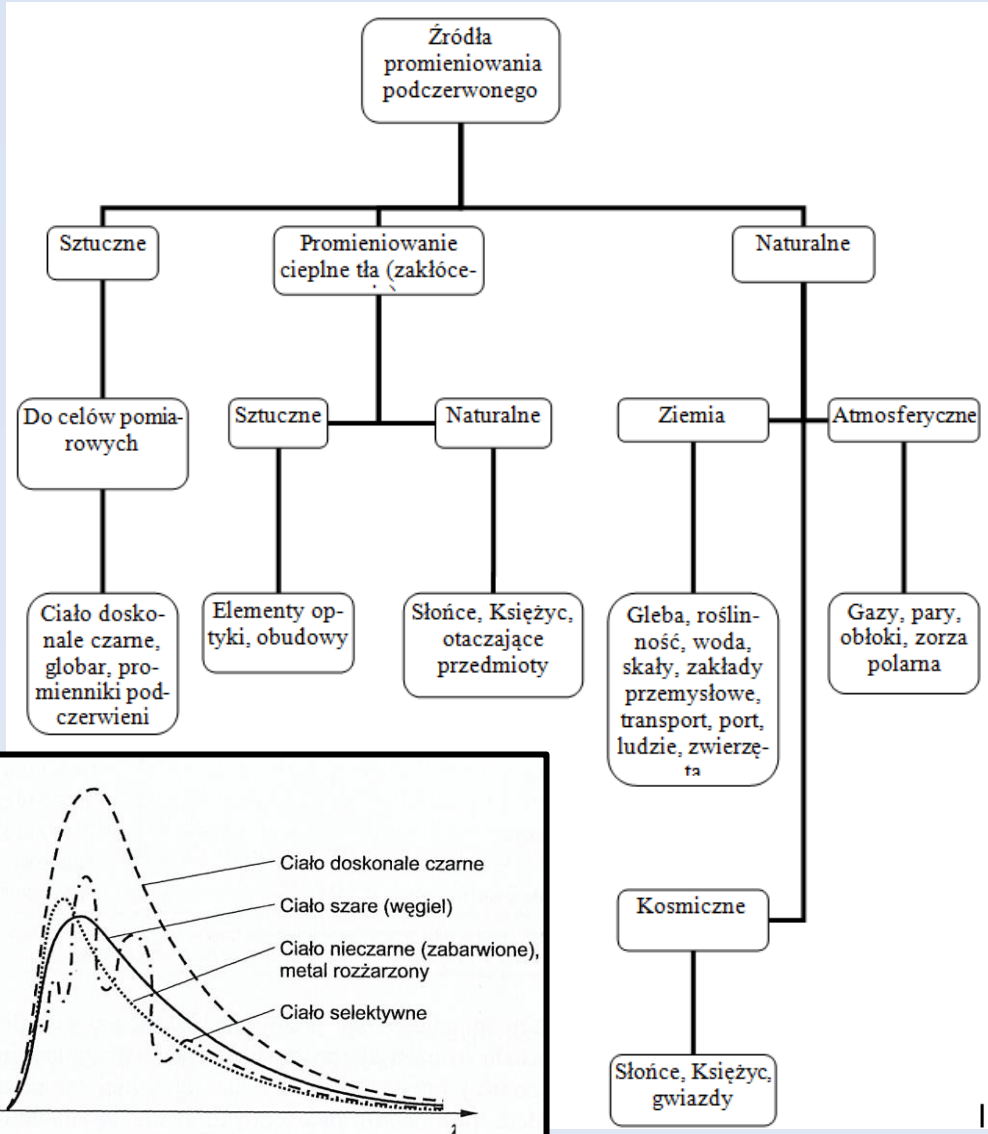
U podstaw działania termowizji leży prawo Stefana-Boltzmanna, które mówi, że całkowita moc promieniowania podczerwonego wysyłanego przez ciało doskonale czarne w zakresie fal o długości od 0 do ∞ opisuje wzór

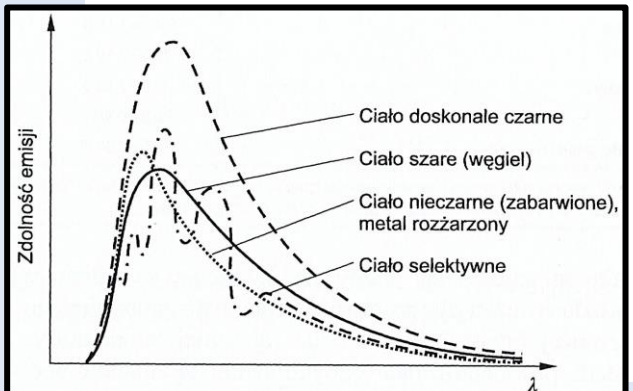
$$E_0 = \sigma T^4$$

gdzie: stała Stefana-Boltzmanna
σ = 5,670400*10-8 [W/m2K4], *T* – temp. [K]

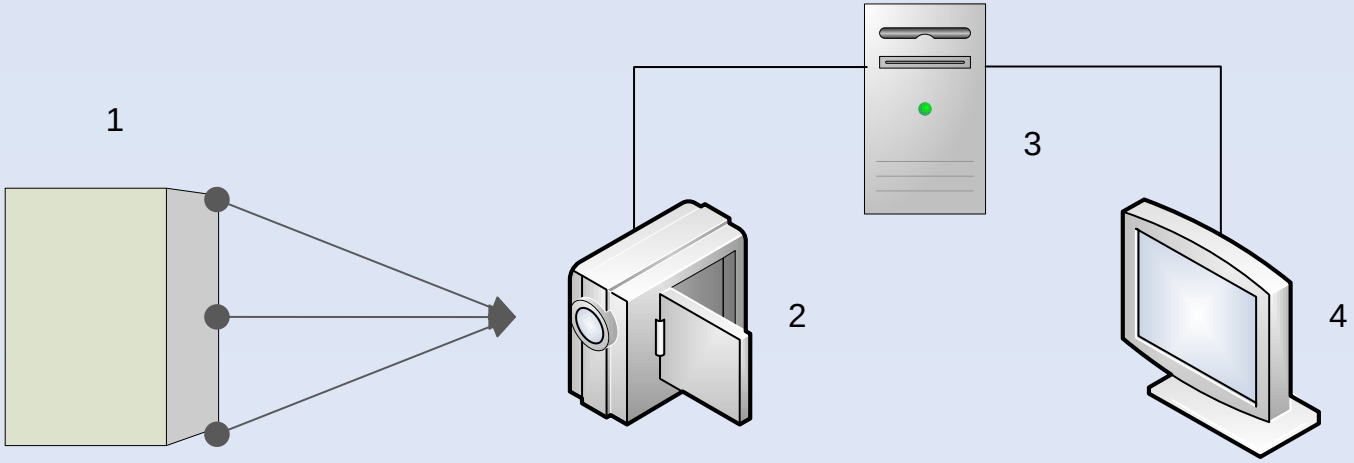
Ciałem doskonale czarnym nazwano ciało pochłaniające całkowicie padające nań promieniowanie, niezależnie od jego długości fali, kąta padania i temperatury obiektu promieniującego

Wnęka symulująca ciało doskonale czarne





Schemat wykonywania pomiaru kamerą termowizyjną



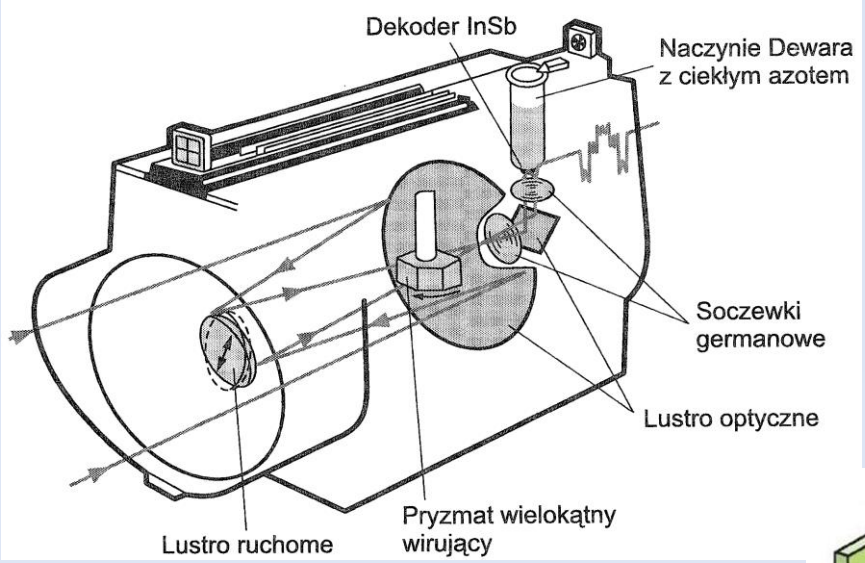
1. Badany obiekt generuje promieniowanie podczerwone.

2. Promieniowanie przechwytywane jest przez obiektyw kamery termowizyjnej, a następnie po przejściu przez optykę, zogniskowany na termo-czułym detektorze obraz, przetwarzany jest na sygnały elektryczne. Sygnał podawany jest na przetwornik analogowo-cyfrowy.

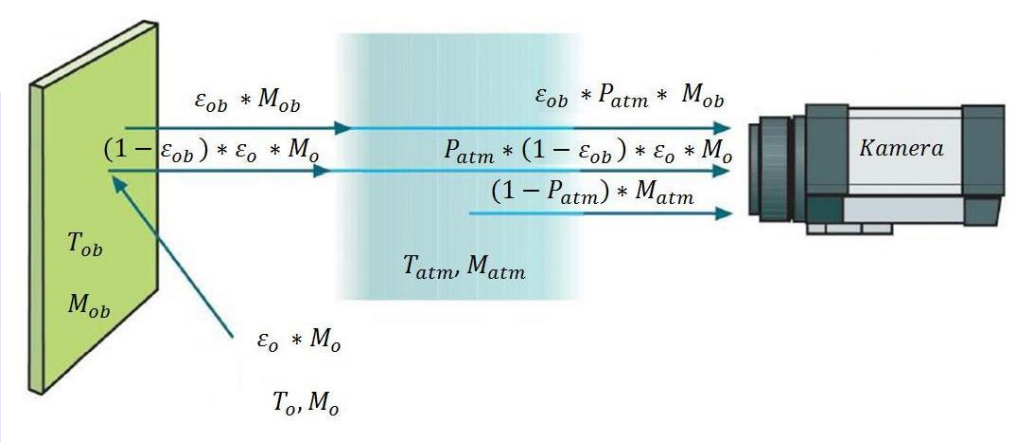
3. Sygnał ten trafia do komputera wyposażonego w oprogramowanie do analiz pozwalających na obróbkę zarejestrowanych danych.

4. Obraz wyświetlany jest na ekranie monitora w odpowiedniej, zadeklarowanej skali barw.

Zasada działania kamery termowizyjnej



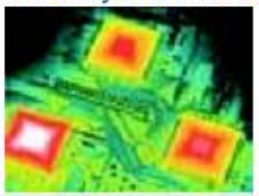
Kamera termowizyjna firmy AGA



Zasada pomiaru temperatury kamerą termowizyjną

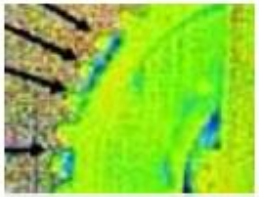
Zastosowanie kamer termowizyjnych

Przemysł elektroniczny



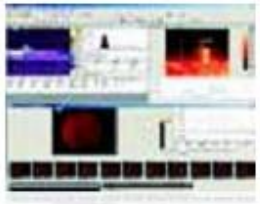
- Badania płyt drukowanych
- Badania przełączników mocy

Badania i testowanie materiałów



- Analiza naprężeń (przemysł samochodowy)
- Badania nieniszczące
- Badania parametrów materiałów

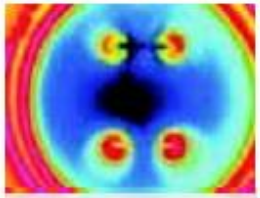
Badania akademickie i przemysłowe



- Szybka termografia
- Przygotowanie procesów
- Badania farmakologiczne i medyczne

Kamery naukowe FLIR

Integratorzy OEM

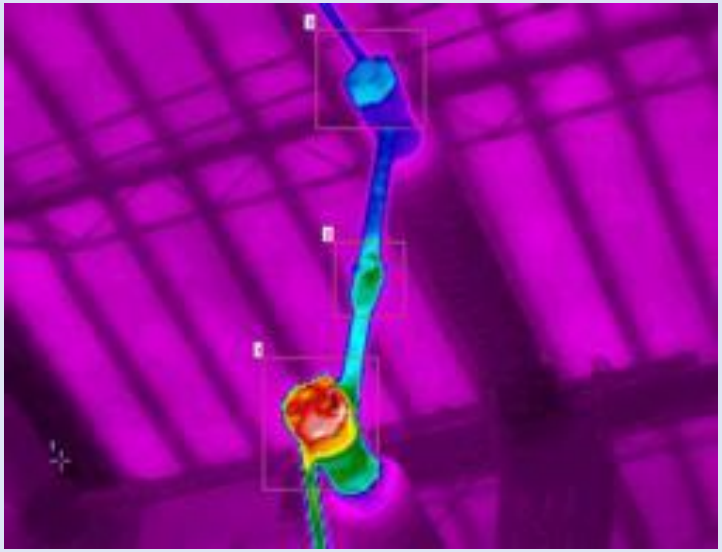


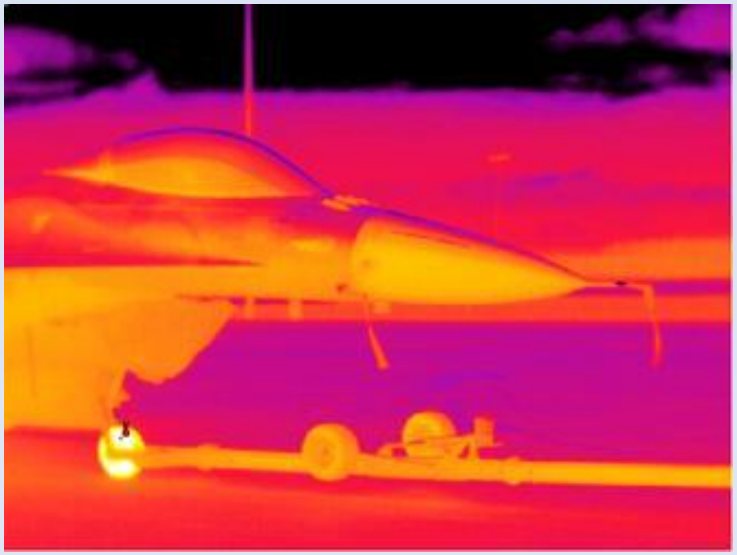
- Przemysł ciężki: stalowy, szkła …
- Ogniwa słoneczne
- Wytwórnie półprzewodników

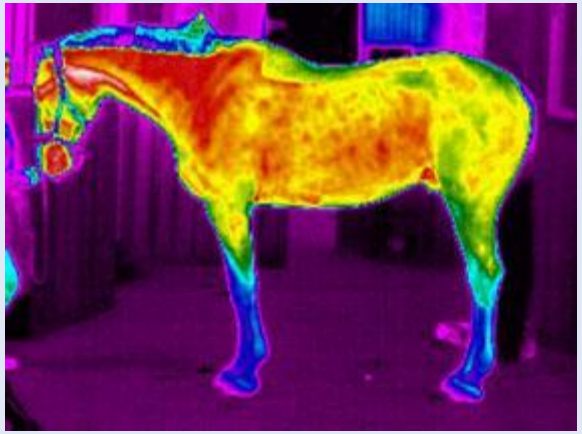
Laboratoria obronne

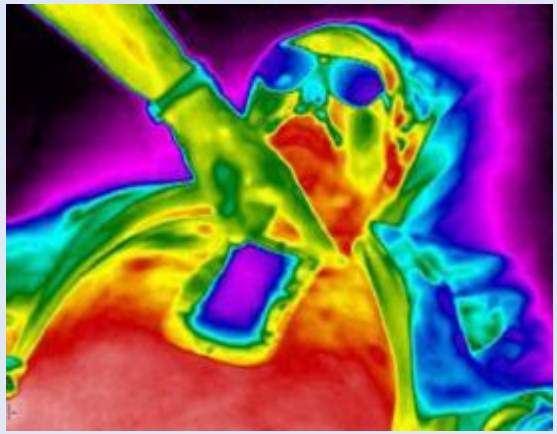
- Analiza sygnatur termicznych
- Śledzenie celów

Zastosowanie kamer termowizyjnych









Zastosowanie kamer termowizyjnych

Urządzenia termowizyjne znalazły zastosowanie m.in. :

- pożarnictwie (wykrywanie ognisk pożarów leśnych),
- medycynie (wykrywanie stanów zapalnych, np. reumatycznych; badania układu krążenia),
- mechanice (służą do badania stanu łożysk i innych ciernych elementów),
- energetyce (umożliwia kontrolę jakości przyłączy energetycznych i badanie stanu przewodów elektrycznych),
- hutnictwie (badanie jakości odlewów, określanie rozkładu temperatur w piecach i na ich powierzchni, określenie temperatur podczas walcowania),
- szeroko rozumiane budownictwo (wykrywanie wad izolacji cieplnej budynków lub instalacji cieplnej, kontroli i oceny jakości wykonawstwa budynków),
- elektryce (wpływają na badania jakości układów scalonych, ułatwiają zlokalizować uszkodzone elementów w aparaturze elektronicznej),
- rolnictwie i leśnictwie (pozwalają nam określić stan wilgotności gleby i stan upraw, ułatwiają poszukiwanie podziemnych zbiorników wodnych, czy też lokalizację obszarów zaatakowanych przez szkodniki),
- służby mundurowe (wojsko, policja, straż graniczna, itp.).

Pomiar kamerą termowizyjną

Promieniowane generowane przez obiekty zależy od szeregu czynników. Do najważniejszych zalicza się:

- Emisyjność
- Temperatura otoczenia
- Temperatura atmosfery
- Odległość od obiektu
- Względna wilgotność powietrza

Termografia znajduje zastosowanie szczególnie w warunkach gdzie metody kontaktowe, ze względu na dużą bezwładność termiczną czujników, mogą nie zarejestrować stosunkowo szybkich zmian temperatury.

Emisyjność

Współczynnik emisyjności charakteryzuje zdolność do emisji promieniowania, który jest zdefiniowany jako stosunek ilości energii wypromieniowanej przez badany obiekt znajdujący się w zadanej temperaturze do energii wyemitowanej przez idealne źródło promieniowania w tej samej temperaturze. Idealnym z metrologicznego punktu widzenia jest obiekt o emisyjności $\varepsilon=1$.

Emisyjność jest to wskaźnik, który informuje nas o zdolności rozpatrywanego obiektu do wypromieniowania energii promienistej.

Wartość wskaźnika „ε” ma decydujący wpływ na mierzalność kamery termowizyjnej.

Jego wielkość jest zależna od szeregu cech danego obiektu jakimi są np.: rodzaj materiału, jego powierzchnia (wykończenie, powłoki), temperatura (T), długość fali obserwacji (λ), kąt obserwacji α).

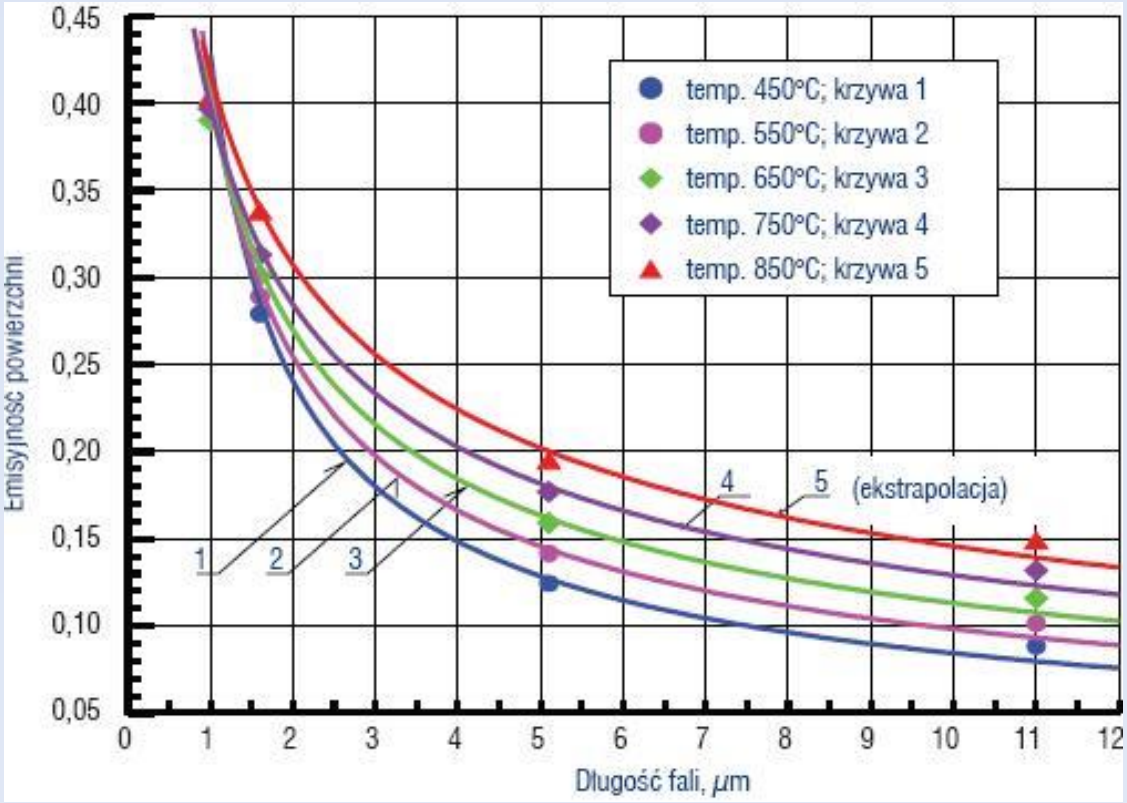
$$\boldsymbol{\varepsilon = (\lambda, T, \alpha)}$$

Emisyjność

Materiał (temperatura materiału)	Emisyjność
Aluminium, jasne platerowane (170 °C)	0.04
Aluminium, nieoksydowane (25 °C)	0.02
Aluminium, nieoksydowane (100 °C)	0.03
Aluminium, mocno oksydowane (93 °C)	0.20
Aluminium, mocno wypolerowane (100 °C)	0.09
Bawełna (20 °C)	0.77
Beton (25 °C)	0.93
Ołów chropowaty (40 °C)	0.43
Ołów, oksydowany (40 °C)	0.43
Ołów, oksydowany szary (40 °C)	0.28
Chrom (40 °C)	0.08
Chrom, polerowany (150 °C)	0.06
Lód, gładki (0 °C)	0.97
żelazo,papierem szmerglowym(20 °C)	0.24
żelazo z odlewną powierzchnią (100 °C)	0.80
żelazo z platerowaną powierzchnią (20 °C)	0.77
Gips (20 °C)	0.90
Szkło (90 °C)	0.94
Granit (20 °C)	0.45

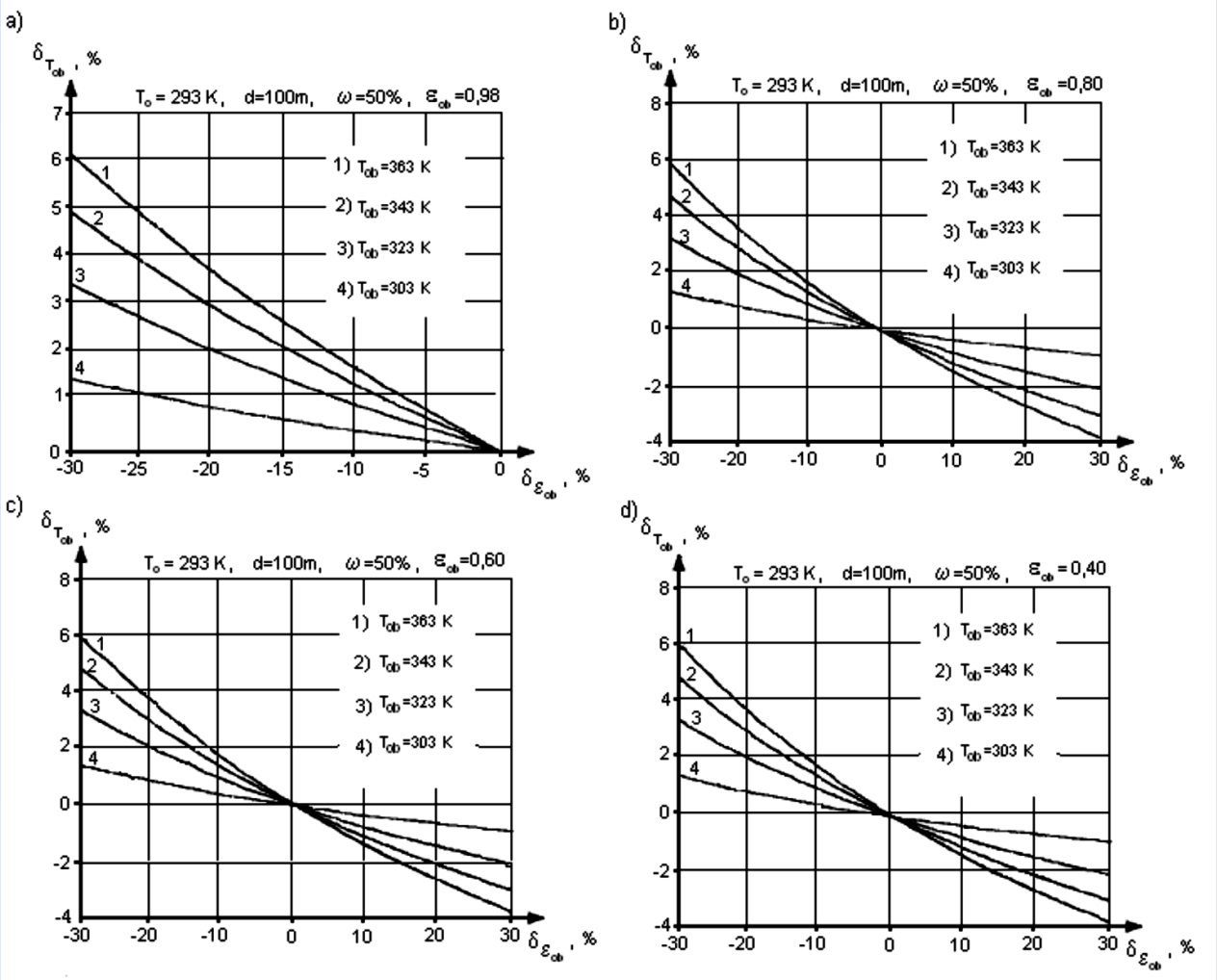
Farby olejne (wszystkie kolory) (90 °C)	0.92 to 0.96
Papier (20 °C)	0.97
Porcelana (20 °C)	0.92
Piaskowiec (40 °C)	0.67
Stal, powierzchnia hartowana (200 °C)	0.52
Stal, oksydowana (200 °C)	0.79
Stal, platerowana na zimno (93 °C)	0.75 to 0.85
Glina, wypalana (70 °C)	0.91
Farba odporna na olej transfor. (70 °C)	0.94
Cegła, zaprawa murarska, cynk (20 °C)	0.93
Cynk, oksydowany	0.1

Emisyjność



Zależność emisyjności blachy stalowej po walcowaniu od długości fali promieniowania podczerwonego

Emisyjność



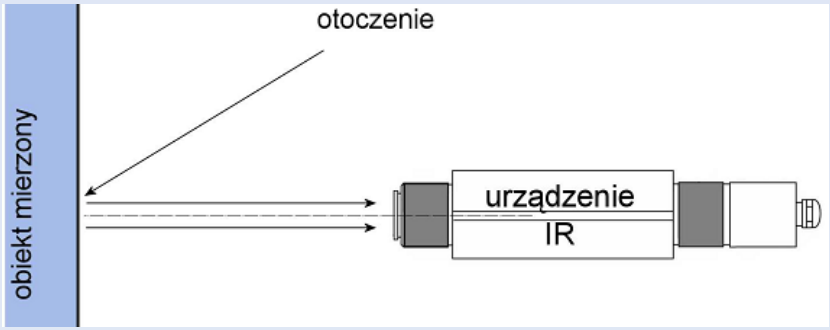
Wpływ błędu określenia emisyjności obiektu na błąd określenia jego temperatury

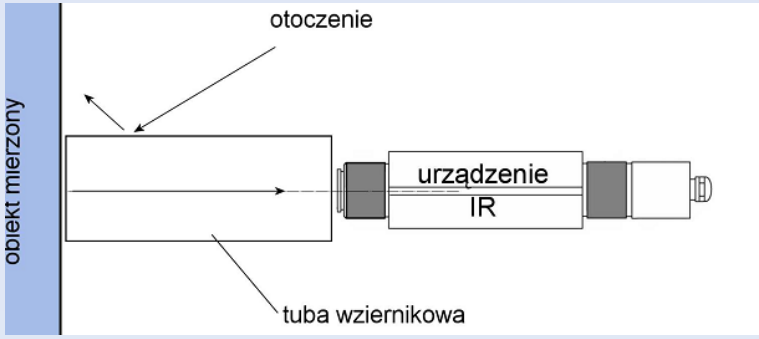
Refleksyjność

Poza emisyjnością ważna dla pomiarów pirometrycznych jest także refleksyjność.

$$\varepsilon + R = 1$$

Te ciała nie czarne, które charakteryzują się niewielką emisyjnością, posiadają większą refleksyjność.
Sam fakt niewielkiej emisyjności może być większą lub mniejszą dokładnością skompensowany przez zastosowanie korekcji emisyjności.
Duża refleksyjność natomiast powoduje zazwyczaj wzrost wpływu otoczenia na wartość wskazywanej temperatury. Przykładowym sposobem niwelacji tego problemu, może być zastosowanie np. tuby wziernikowej.





Tłumienie promieniowania podczerwonego

Kolejnym czynnikiem decydującym o dokładności pomiaru termowizyjnego jest atmosfera. Następuje pochłanianie promieniowania podczerwonego przez cząsteczki pary wodnej, dwutlenku węgla oraz ozonu. Rozmiar tych składników zależy od pogody, klimatu, pory roku czy położenia geograficznego.

Istnieją okna atmosferyczne w których jest możliwy do zrealizowania pomiar termowizyjny:

- I okno atmosferyczne - krótkofalowe 2÷5µm
- II okno atmosferyczne - długofalowe 8÷14µm

Na tej podstawie powstał także podział kamer termowizyjnych na krótkofalowe i długofalowe.

Współczynnik przepuszczania atmosfery zależy od:

-temperatury atmosfery (T_{atm})
-długości fali promieniowania (γ)
-jej stanu (wilgotność, kurz, gazy)

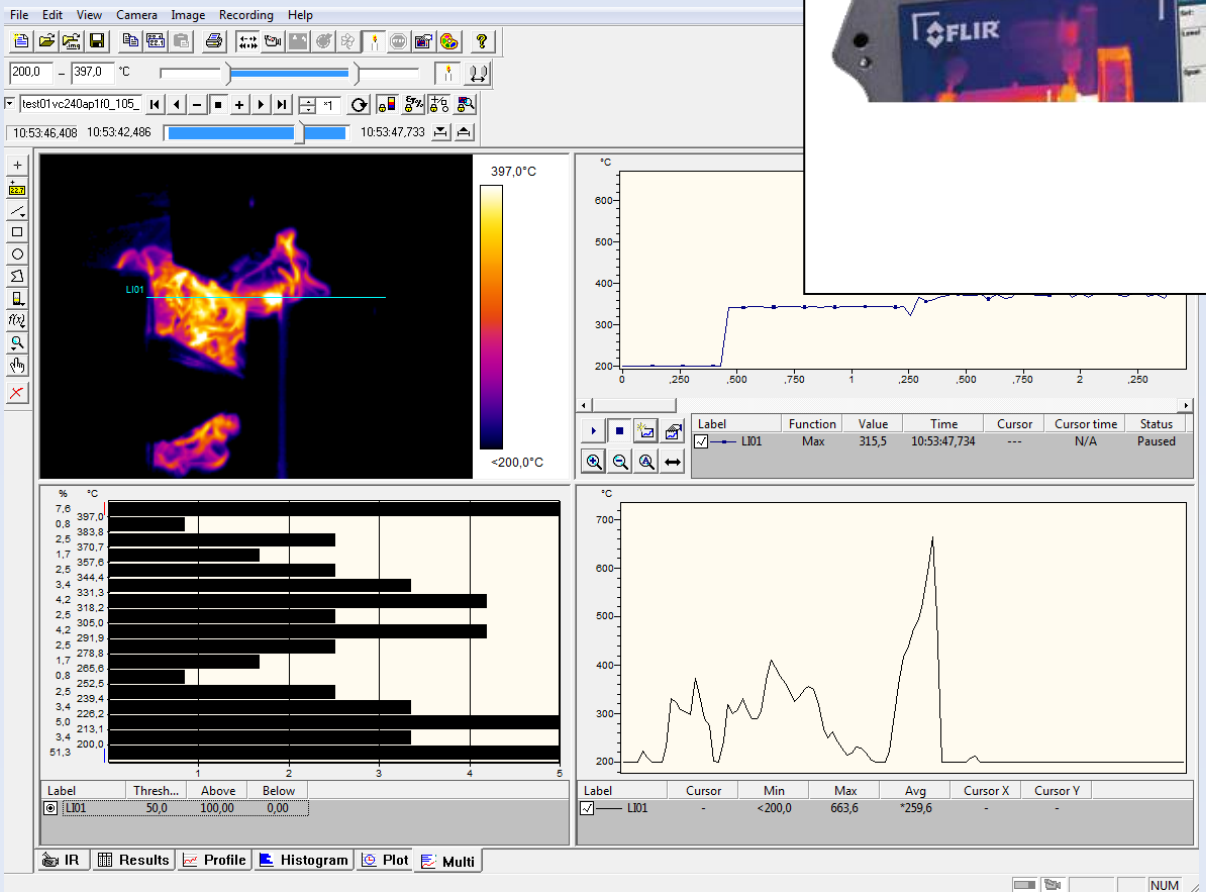
Tłumienie promieniowania podczerwonego

Aby uzyskać dokładny pomiar termowizyjny, wprowadza się do kamery odpowiednie wartości czynników:

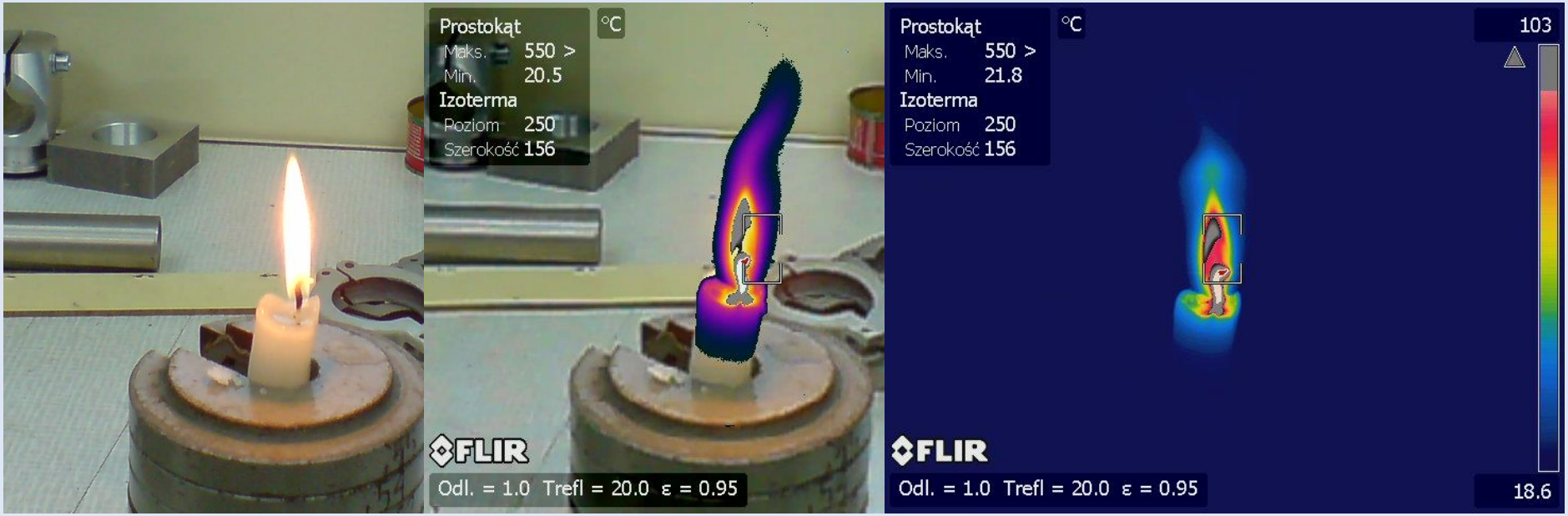
-temperatury otoczenia (odbitej temperatury pozornej) - parametr służący do kompensacji odbijanego promieniowania przez obiekt. Wartość ta przybiera szczególnego znaczenia w przypadku niskiej emisyjności i znacznej różnicy pomiędzy temperaturą obiektu a temperaturą odbitą.
-odległości - jest to dystans pomiędzy badanym obiektem a obiektywem kamery. Parametr ten kompensuje pochłanianie promieniowania przez atmosferę.
-wilgotności względnej - należy ustawić prawidłową wartość wilgotności względnej

Kolejnym zasadniczym zagadnieniem mającym wpływ na promieniowanie, jest tłumienie przez elementy optyczne kamery. Zjawisko to jest spowodowane brakiem przeźroczystości materiałów z których wykonane są elementy optyczne kamery (najczęściej krzem lub german). Przy konstrukcji układów optycznych należy uwzględnić problematykę załamania promieniowania podczerwonego na granicy atmosfery i materiału optyki. Celem zminimalizowania strat, stosuje się specjalistyczne powłoki antyrefleksyjne którymi pokrywa się soczewki.

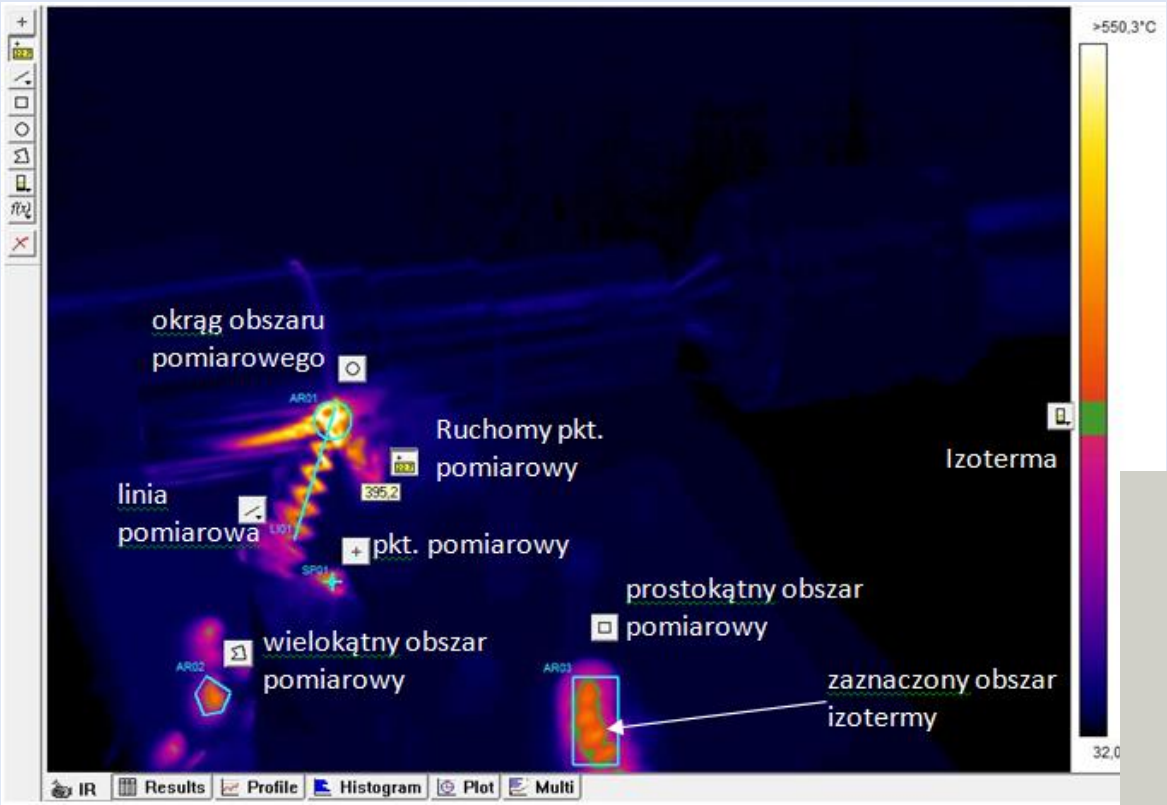
Kamera termowizyjna



Kamera termowizyjna



Narzędzia pomiarowe ThermaCam Researcher



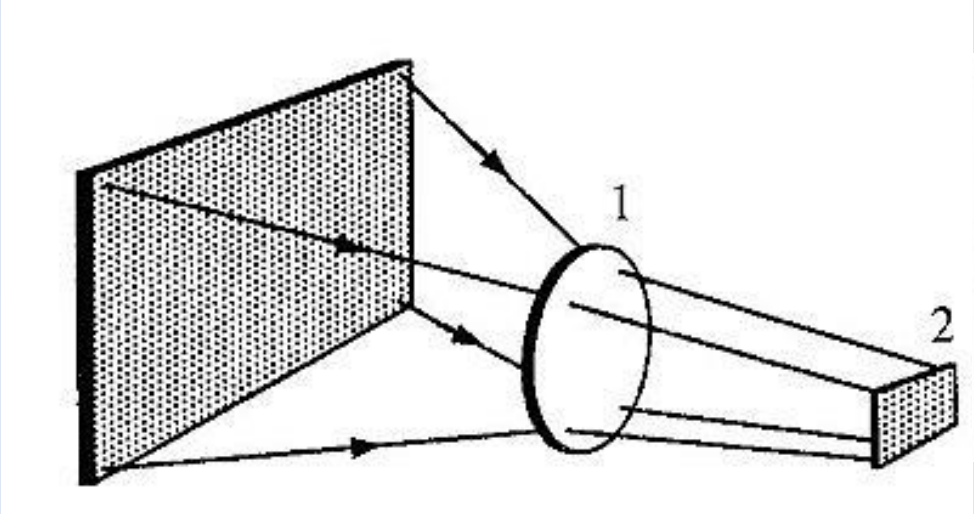
Podział kamer termowizyjnych

Ze względu na dwa pasma dobrego przepuszczania promieniowania atmosfery krótkofalowe SW 2-5 µm oraz długofalowe LW 8-14µm, wytworzył się także podział kamer termowizyjnych na krótko oraz długofalowe.

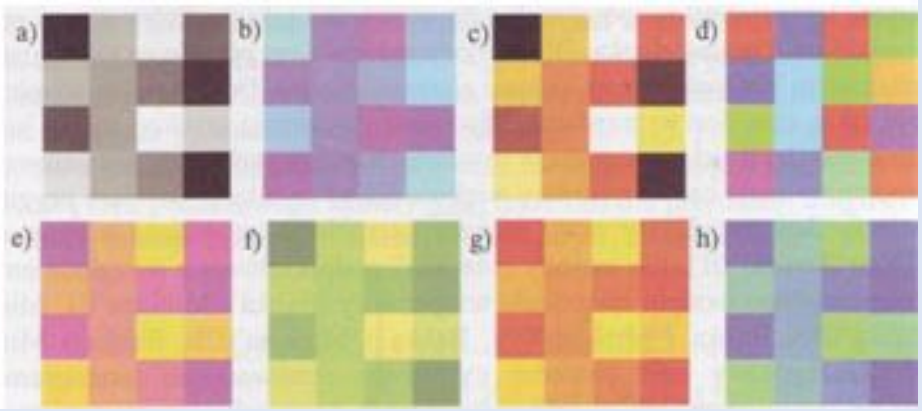
Kamery termowizyjne można podzielić również ze względu na zastosowanie detektorów, na kamery z detektorami chłodzonymi oraz niechłodzonymi, które pracują w temperaturze otoczenia.
Do 1997 roku wszystkie kamery posiadały detektory chłodzone do temperatury od -70ºC do -200ºC.

Wyróżnia się kamery pomiarowe wzorcowane u producenta, które wykorzystywane są do wykonywania pomiarów oraz kamery obserwacyjne pokazujące jedynie barwny rozkład temperatury obszaru

Detektory kamer termowizyjnych



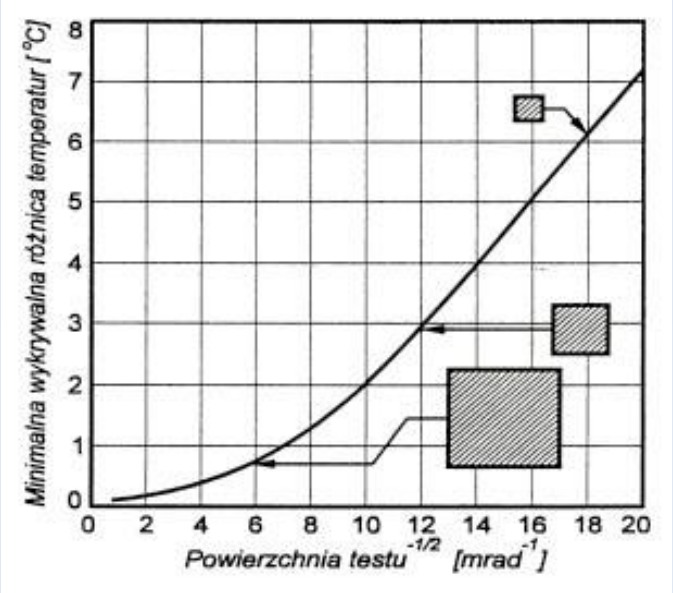
Układ optyki i detektor kamery matrycowej.
1-optyka kamery, 2-Detektor matrycowy typu FPA



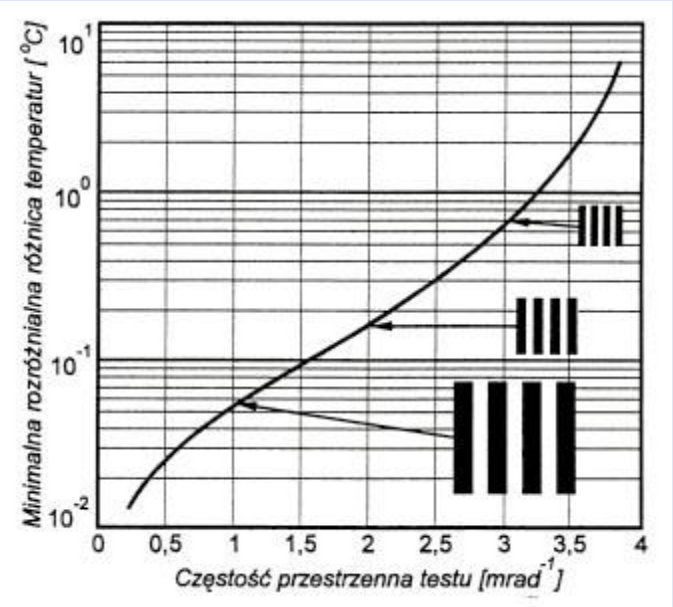
Powiększony obraz cyfrowy w różnych skalach kolorowania:
a) skala szarości, b) kolory zimne,
c) kolory ciepłe, d) HSI (intensywność nasycenia barwy), e) kolory wiosny, f) kolory lata, g) kolory jesieni, h) kolory zimy

Parametry metrologiczne kamer pomiarowych

MDTD czyli minimalna wykrywalna różnica temperatury (*ang. minimum detectable temperature difference*) określa zdolność obserwacyjnej kamery termowizyjnej do wykrycia obiektów o małych wymiarach kątowych, znajdujących się na jednorodnym tle.

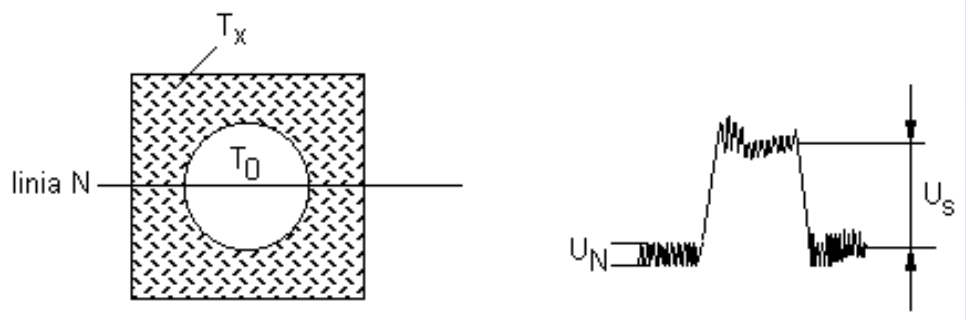


MRTD czyli minimalna rozróżnialna różnica temperatury (*ang. minimum resolvable temperature difference*) zależność minimalnej różnicy temperatury miedzy temperaturą czteropaskowego testu a temperaturą tła, przy której doświadczony obserwator, rozróżnia wszystkie paski testu na monitorze kamery, od częstości przestrzennej testu.



Parametry metrologiczne kamer pomiarowych

MTF - czyli funkcja przenoszenia modulacji (*ang. modulation transfer function*) jest to funkcja wyznaczana za pomocą modeli teoretycznych. Określa przestrzenną zdolność rozdzielczą kamery termowizyjnej w funkcji odległości od obiektu.
NETD - różnica temperatury równoważna szumowi – (*ang. noise equivalent temperature difference*) różnica temperatury badanego obiektu i otoczenia powodująca generację sygnału równą szumowi. Obserwowany jest sygnał pochodzący ze źródła ciała czarnego na tle tła.

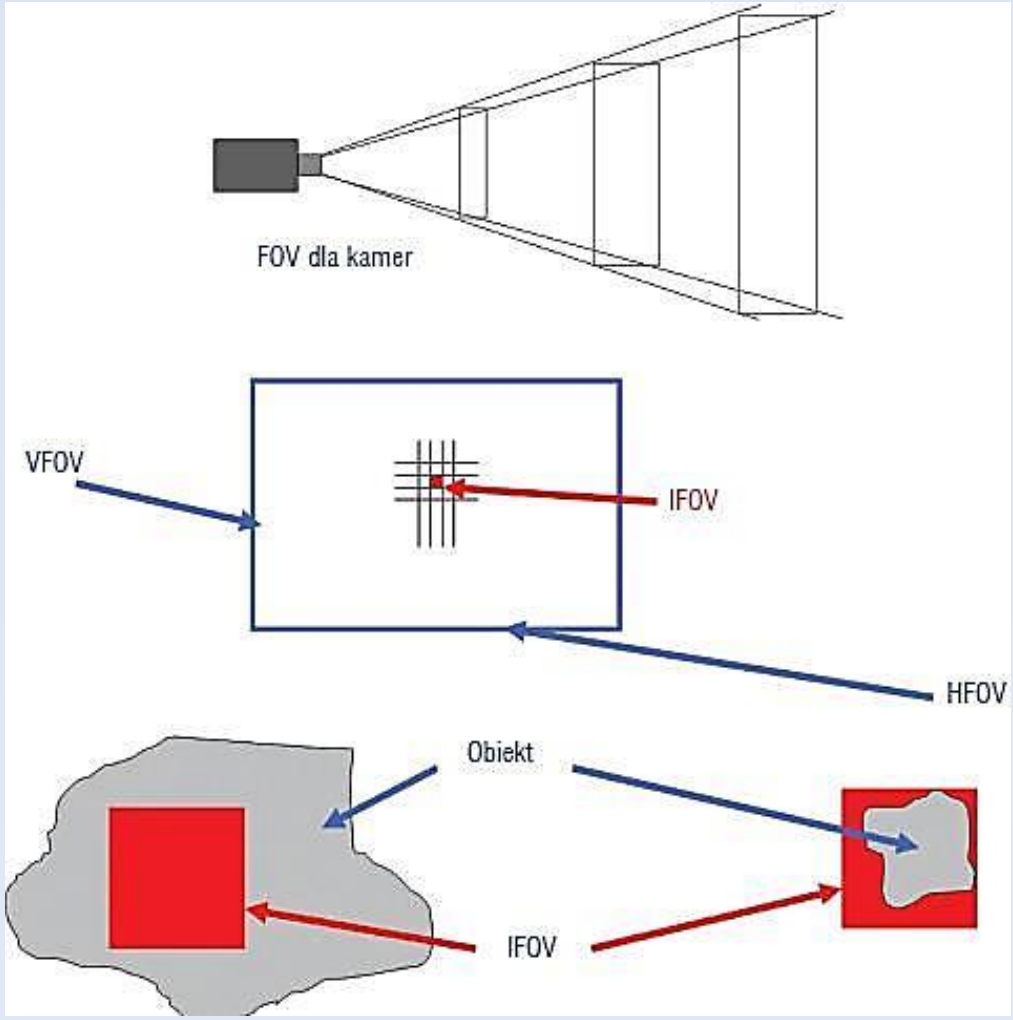


Parametry metrologiczne kamer pomiarowych

FOV - czyli pole widzenia (*ang. field of view*) wyznacza obszar, jaki z danej odległości można obserwować za pomocą danej optyki, zainstalowanej w kamerze. FOV jest określane w metrach i dotyczy kierunku obserwacji poziomej oraz pionowej.

IFOV - czyli kąt widzenia dla pojedynczego piksela (*ang. instantaneous field of view*) wyznacza, jaki obszar stanowi pole widzenia pojedynczego detektora (piksela) matrycy.

SRF - czyli funkcja szczelinowa (*ang. split response function*), określa zdolność kamery termowizyjnej z detektorem matrycowym do pomiaru temperatury małych obiektów

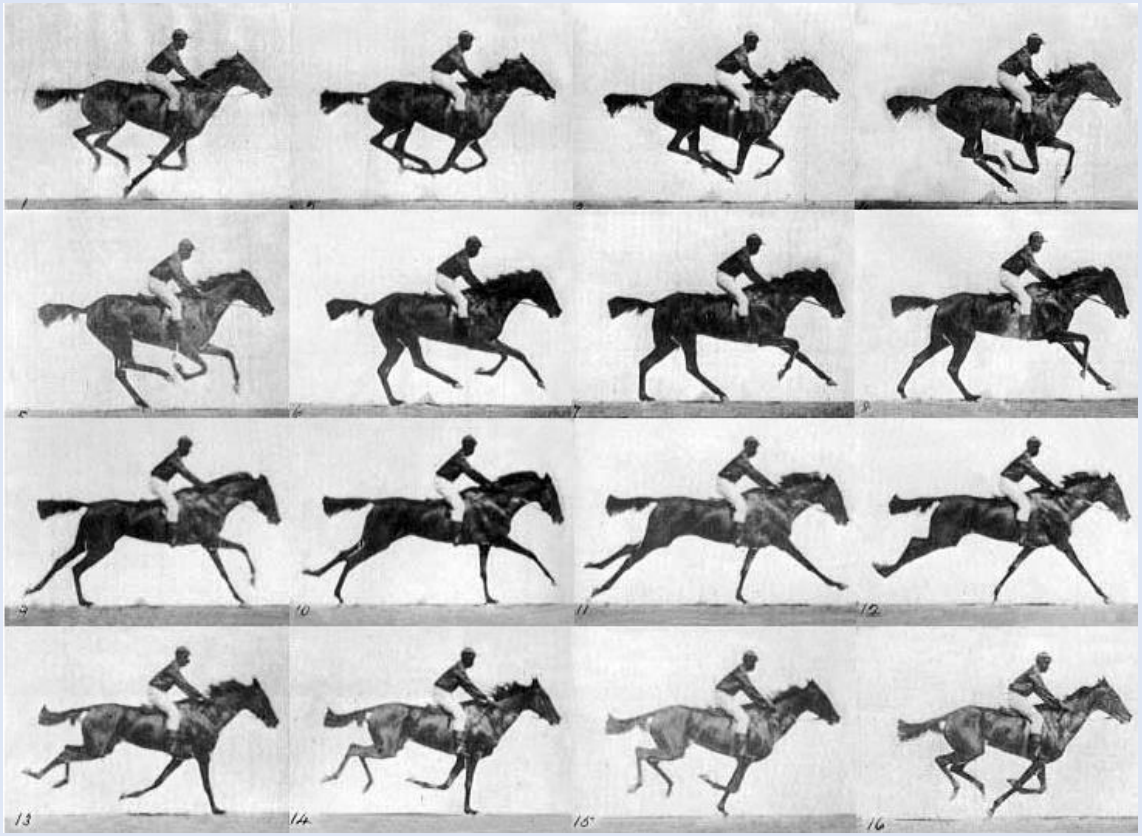


Kamera szybkoklatkowa

Parametr kamery	V5.2
Liczba pikseli sensora	1,032,192 piksele
Rozmiar piksela	11.5 µm
Rozdzielczość (piksele)	1152 x 896
Szybkośś rejestracji w pełnej rozdzieczości	1000 klatek/sekundę
Szybkość migawki	Minimum: 2µs
Pmięć wbudowana	1.5 GB, 3 GB, 6 GB, 12 GB
ISO (ISO-12232)	2400 mono / 600 kolor
Głębia bitowa obrazu	8, 10, 12 wybieralna
GB Ethernet	Tak
Temperatura pracy	10 ^{o}C, 40 ^{o}C
Wymiary	10.9cm x 10.16 cm x 24.13cm
Ciężar	3.175 kg

Rozdzielczość	Szybkość zapisu klatek/sek
1152x896	1000
1152x720	1244
1024x512	1885
768x768	1667
768x512	2489
768x384	3305
640x480	2971
512x512	3164
512x384	4197
512x256	6220
256x256	10362
256x128	19704
256x32	59701
128x128	25000
96x64	57971
96x32	88888
96x16	121212
96x8	148148

Kamera szybkoklatkowa - zastosowanie

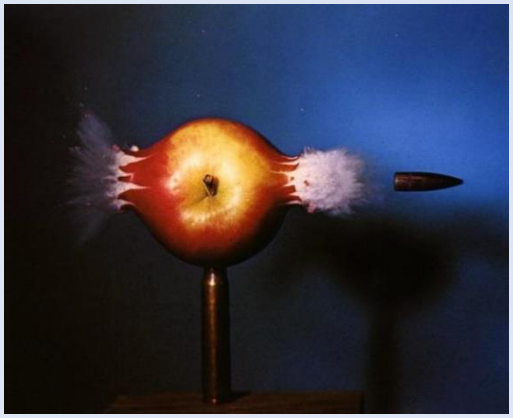


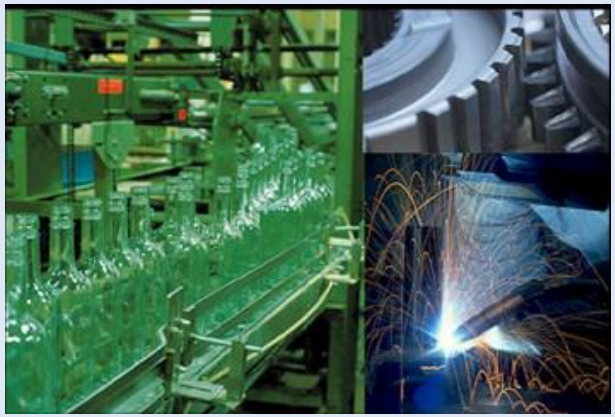
Seria zdjęć Muybridge'a dotycząca kolejności stawiania nóg przez konia w galopie

Kamery szybkoklatkowe - przegląd

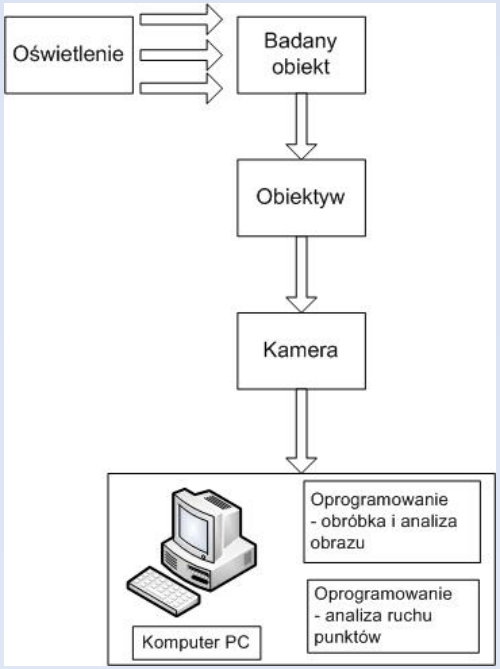
Producent	FASTVISION	VDS Vosskühler		Optronis		FASTEC IMAGING	QUALISYS
Model / Parametry	FastCamera 13	HCC - 1000	MiniVis ECO-2	CamRecord 600	MC1310/11	TroubleShooter HR	Oqus
Rozdzielczość [pikseli]	1280 x 1024	1024 x 1024	1280 x 1024	1280 x 1024	1280 x 1024	1280 x 1024	1280 x 1024
Ilość klatek w max. rozdzielczości	500	500	462	500	500	500	500
Czas zapisu w max. rozdzielczości/ Pamięć	800 klatek przy najwyższych parametrach	-512MB(2048 klatek) -1GB(4096 klatek)	- 3 sekundy - 6 sekund	- 4 GB (6.5sek) - 8 GB (13 sek)	Zależne od zamówionego systemu	- 1 GB (8.2 sek) - 2 GB (16.4 sek) - 3 GB (24.5 sek)	- 1.8 sek
Czujnik	monochromatyczny lub kolorowy	monochromatyczny lub kolorowy	monochromatyczny lub kolorowy	monochromatyczny lub kolorowy	MC1310 - mono MC1311 - kolorowy	monochromatyczny lub kolorowy	monochromatyczny lub kolorowy
Prędkość migawki	4 µsek - 32 msek	---	od 4 µsek	---	4 µs - 32 ms	1x,2x,3x,4x,5x,10x lub 20x większa niż prędkość nagrywania	---
Mocowanie soczewek	- C-mount - F-mount	- C-mount	- C-mount - F-mount	- C-mount - F-mount	- C-mount - F-mount	- C-mount	---
Rozmiar pikseli	12µm x 12µm	10 µm x 10 µm	---	12µm x 12µm	12µm x 12µm	---	---
Zasilanie	+ 5 V	+ 12 V DC	8 – 24 V	110.. 240 V	8 - 24 V DC	4xR20 lub 110/220AC	36-72 VDC lub 10-16 VDC
Wymiary [mm]	---	90Ø x 72	94 x 70 x 106	250 x 100 x 131.5	63 x 63 x 47	150 x 125 x 100	185 × 110 × 125
Waga [kg]	<0.6	---	0.9	---	0.3	1 (bez baterii)	1.9
Oprogramowanie	FastCamera	MatrixVision dostępne razem z systemem	Visart Media Player,SpeedCam Camera Utility (oba darmowe)	CamControl dostępne razem z systemem	Machine Visio firma dostarcza nieodpłatne oprogramowanie	darmowe oprogramowanie MIDAS 4.0	QUALISYS TRACK MANAGER, Visual3D

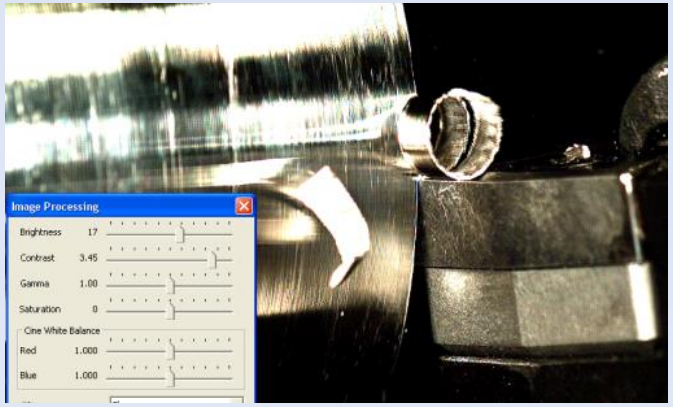
Kamera szybkoklatkowa - zastosowanie

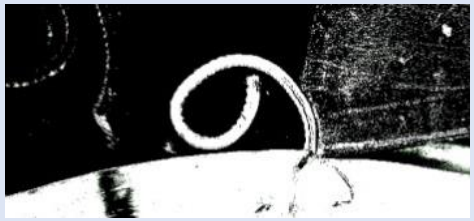


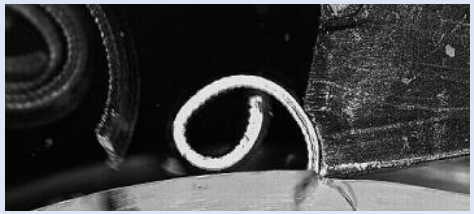


Kamera szybkoklatkowa



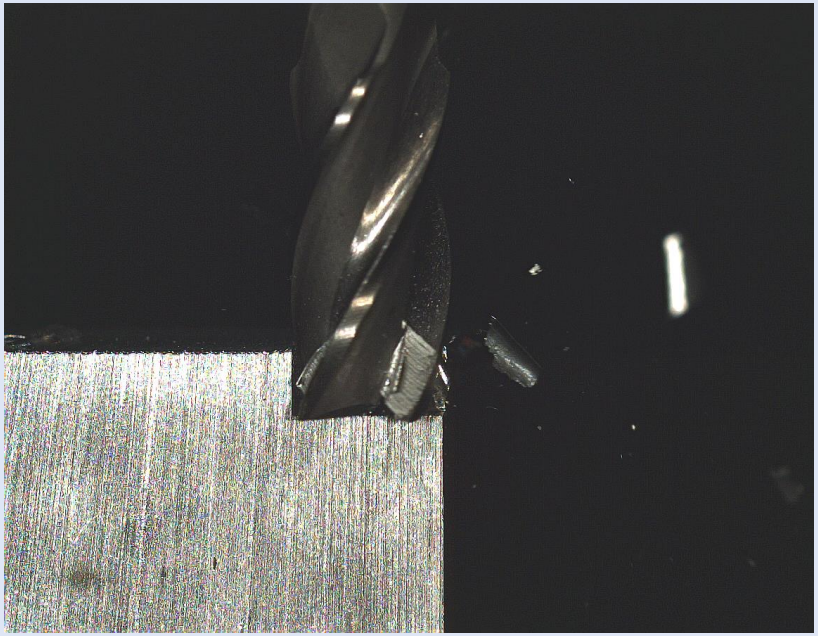


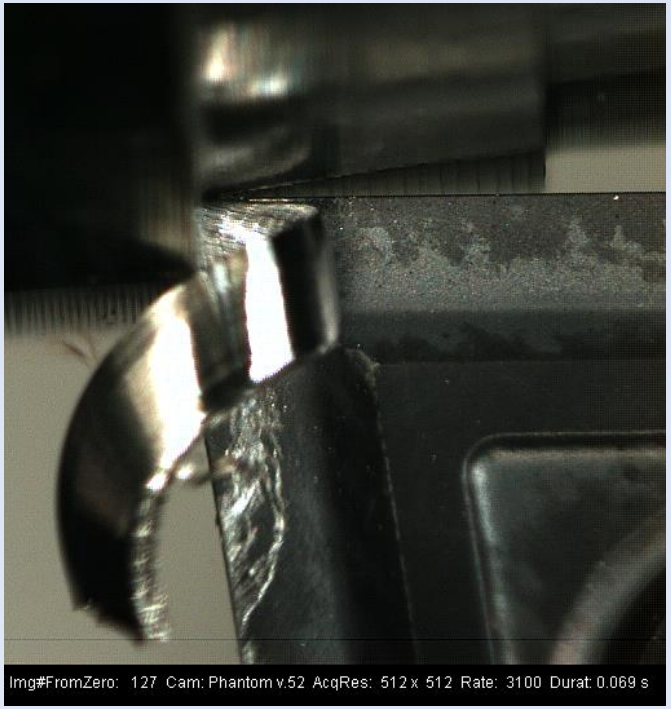




Schemat stanowiska badawczego wykorzystującego kamerę szybkoklatkową

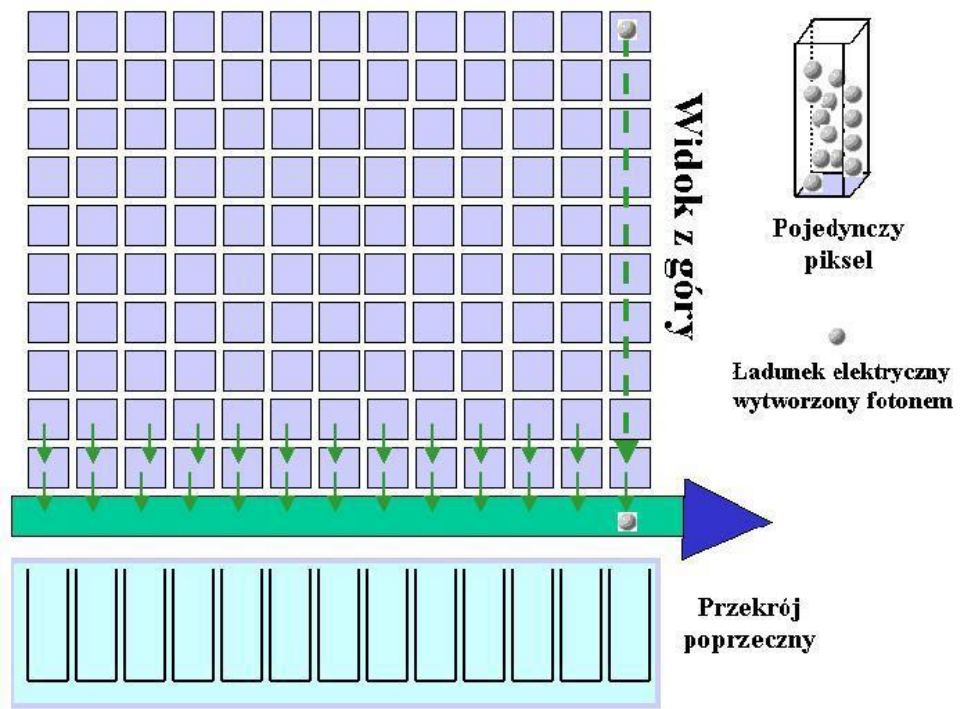
Kamera szybkoklatkowa



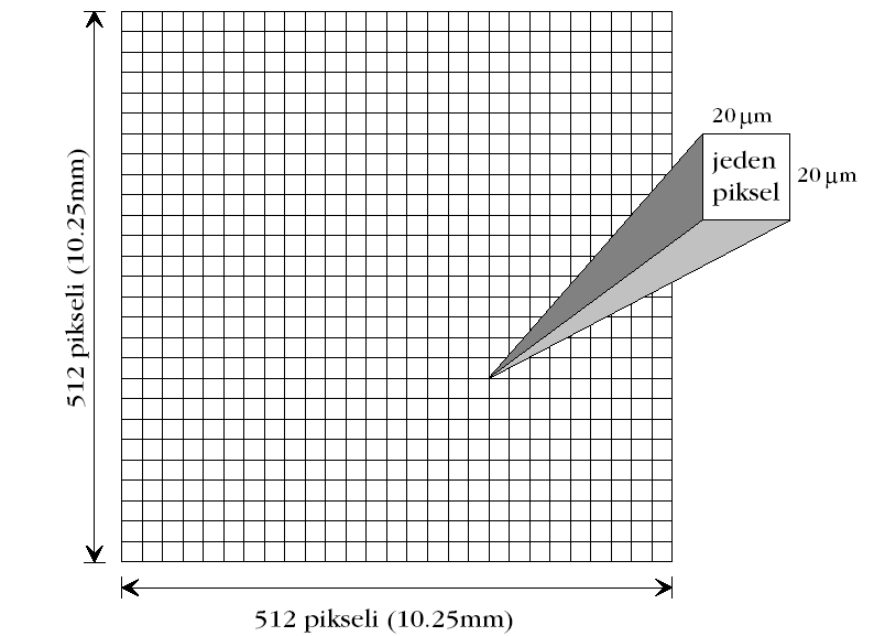


Przykłady zarejestrowanych obrazów procesu frezowania i toczenia

Kamera szybkoklatkowa

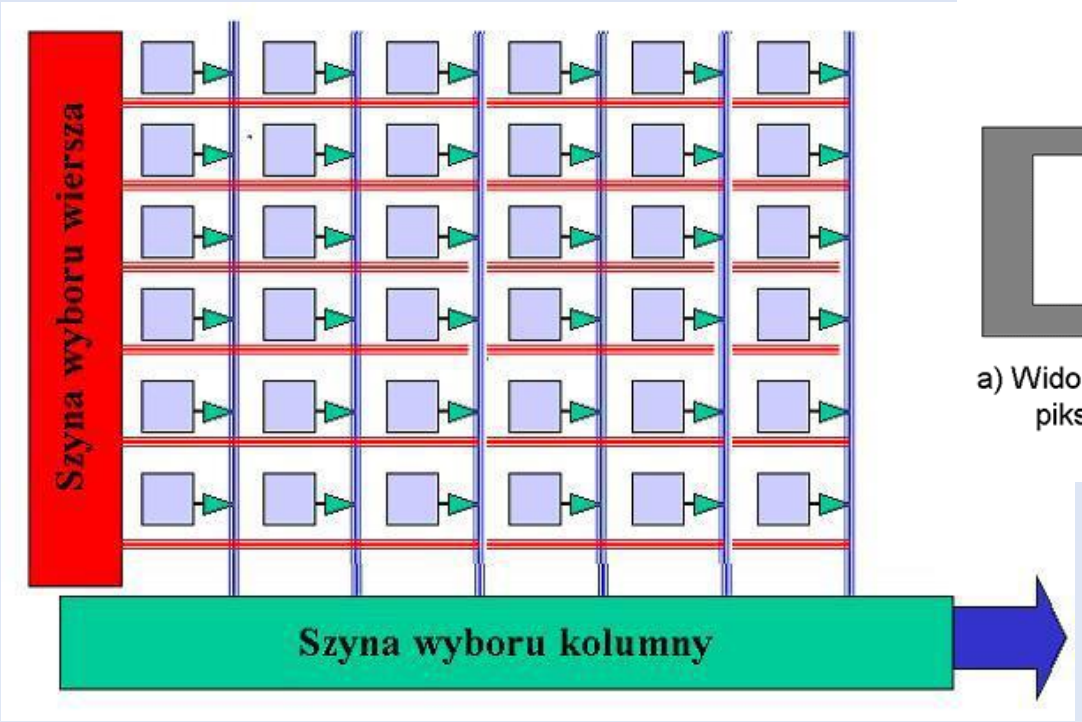


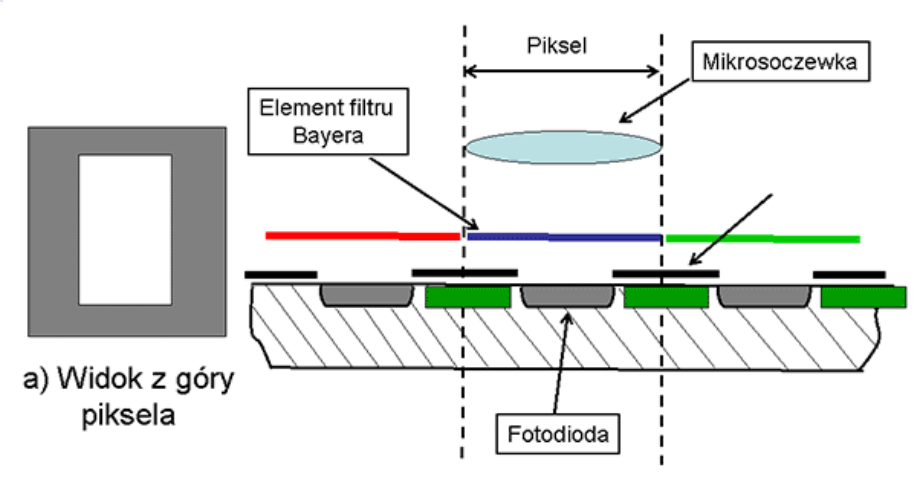
Schemat przedstawiający zasadę działania matrycy CCD (*ang. Charge Coupled Device*)



Budowa matrycy CCD

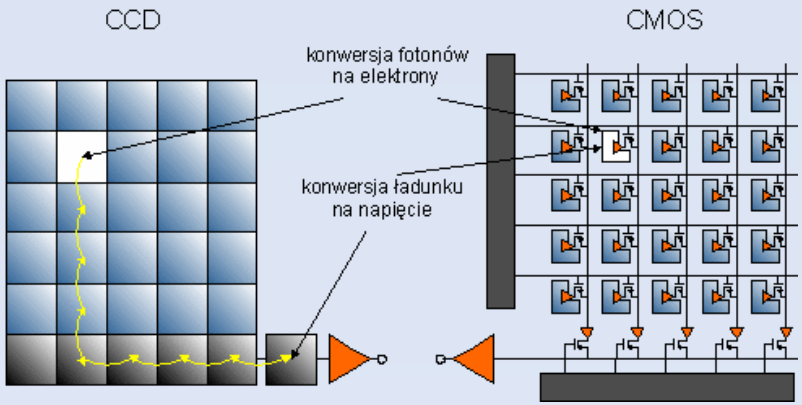
Kamera szybkoklatkowa





Budowa matrycy CMOS (*ang. Complementary Metal Oxide Semiconductor*)

Kamera szybkoklatkowa



CCD	CMOS
Nie ma możliwości odczytu zawartości pojedynczego piksela. Trzeba odczytać zawartość całej matrycy i dopiero potem wybrać interesujący nas piksel. Skutkiem tego jest wolne działanie.	Można odczytywać piksele w dowolnej kolejności i w dowolnej ich liczbie, co daje możliwość łatwego odczytu fragmentu obrazu, Z tego względu działają znacznie szybciej.
Matryca ma jeden przetwornik ładunku na napięcie i jeden przetwornik A/C. Zawartość wszystkich pikseli jest odczytywana po kolei przez ten układ.	Każdy piksel matrycy CMOS ma swój przetwornik ładunku na napięcie i układ odczytujący zawartość pikseli odczytuje napięcie wytworzone padającym na piksel światłem. W bardzo zaawansowanych matrycach CMOS każdy piksel ma swój przetwornik A/C, co ułatwia i przyspiesza dalszą obróbkę obrazu.
Ze względu na swą budowę matryce CCD pobierają więcej mocy w czasie pracy, bardziej się grzeją i szybciej zużywa się bateria lub akumulator zasilający aparat.	Zużywają mniej mocy elektrycznej, co pozwala wykonać więcej zdjęć z raz naładowanego akumulatora.
Większy współczynnik wypełnienia, czyli stosunek powierzchni pikseli do powierzchni całej matrycy.	Mniejszy współczynnik wypełnienia, gdyż część powierzchni w matrycach zajmują układy przetwarzające ładunek na napięcie.
Mniejsze szumy.	Większe szumy.

Porównanie matryc CCS i CMOS

Kamera szybkoklatkowa

Sample Rate

Określa tempo w którym obrazy mają być rejestrowane. Sample rate zależy od zdefiniowanej rozdzielczości (Resolution) szerokość x wysokość), w której są rejestrowane obrazy.

Exposure time

Interwał czasowy, niezbędny do naświetlenia klatki.

EDR Exposure

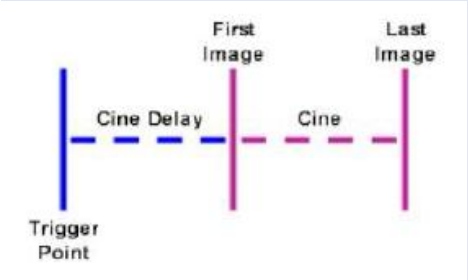
EDR (Extrem Dynamic Range) stosowane, gdy obiekt ma zarówno bardzo jasne jak i ciemnie obszary, a wszystkie muszą być naświetlone właściwie w trakcie całej sceny.

PostTrigger

Ustawia liczbę klatek jakie mają być zapisane po otrzymaniu sygnału triggera (wyzwalacza).

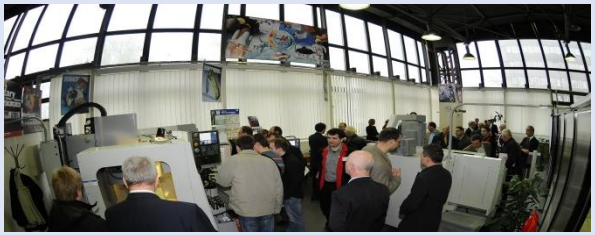
EDR Off

EDR On

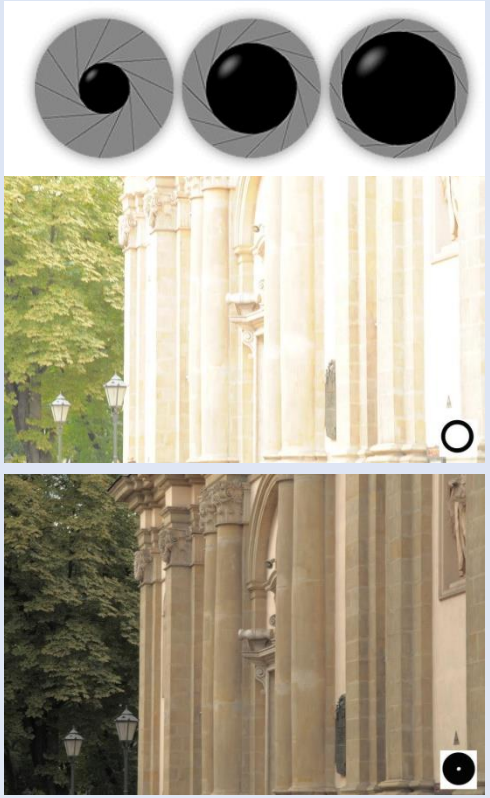


Podstawowe ustawienia przy rejestracji kamerą szybkoklaktową

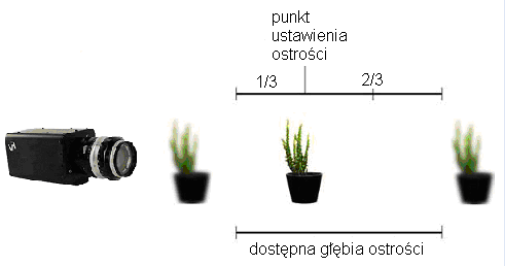
Kamera szybkoklatkowa - optyka



Obiektyw „rybie oko”:



Wpływ zmiany wartości przesłony na jasność fotografii



Rozmazanie obiektów poza zakresem głębi ostrości

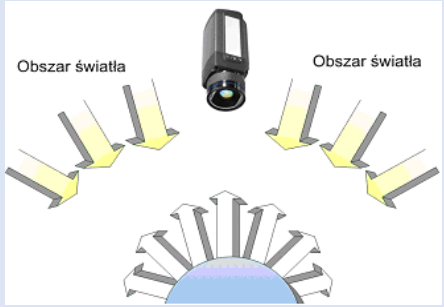
Kamera szybkoklatkowa

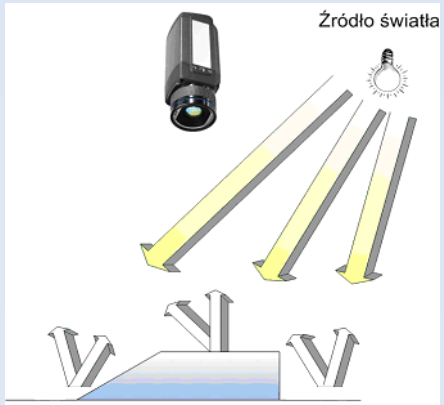
Speed (Frames per Second)	Max Resolution (Approximate)	Product (Bandwidth)	Duration (seconds)	Pictures
400 (Spec.)	1632 x1200 (v9)	783 MB/sec	109	43,805
500	1536 x 1096	841 MB/sec	102	51,000
600	1440 x 976	843 MB/sec	101	61,021
700	1440 x 832	838 MB/sec	102	71,661
800	1152 x 912	840 MB/sec	102	81,719
900	1152 x 808	837 MB/sec	102	92,136
1,000	960 x 872	837 MB/sec	102	102,498
2,000	768 x 536	823 MB/sec	104	208,567
3,000	576 x 472	815 MB/sec	105	315,203
4,000	480 x 272	798 MB/sec	106	427,776
5,000	480 x 328	787 MB/sec	108	544,442
6,006	480 x 272	784 MB/sec	109	655,032
7,005	384 x 280	774 MB/sec	112	790,982
8,000	384 x 244	749 MB/sec	111	891,958
9,009	336 x 248	750 MB/sec	113	1,022,488
10,000	288 x 256	737 MB/sec	116	1,164,501
20,000	192 x 160	614 MB/sec	139	2,794,803
30,075	96 x 132	554 MB/sec	154	4,658,005

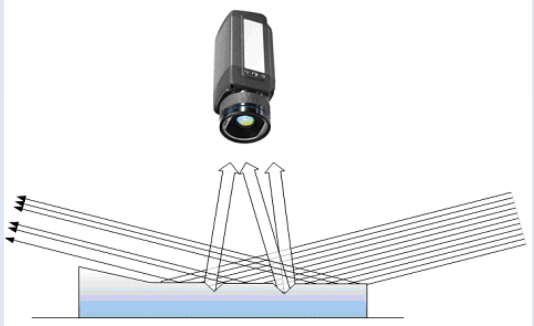
Image^3 – Speed vs. Resolution Chart w/80GB Memory

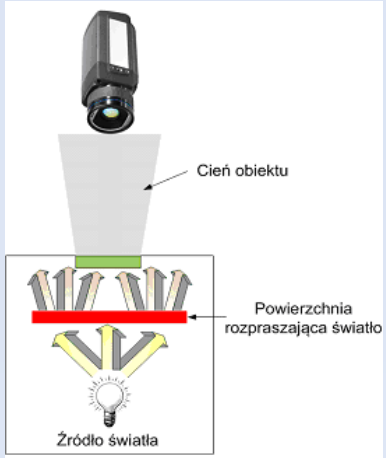
Kamera szybkoklatkowa – źródła światła

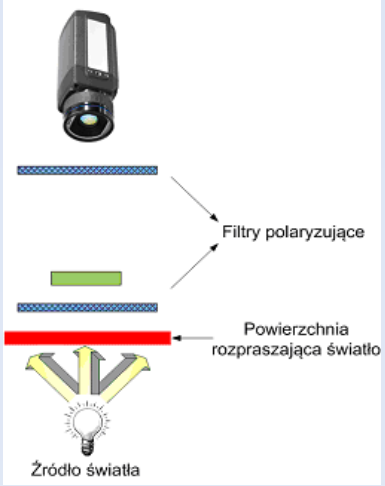
Źródło światła	Zalety	Wady
Żarówka	• niska cena • łatwo dostępna • duża różnorodność rozmiarów i kształtów • możliwość włączania i wyłączania w dowolnym rytmie	• mała efektywność świetlna • niska trwałość • produkuje dużo ciepła
Halogen	• bardzo duża jasność światła	• wydziela spore ilości ciepła • nie może być szybko włączany i wyłączany cyklicznie
Jarzeniówka	• duża efektywność cieplna • zimne światło	• niewiele dostępnych rozmiarów i kształtów • nie może być szybko włączana i wyłączana
Laser He – Ne	• dobra kolimacja wiązki światła • prosta optyka • nieskończenie długa głębia ostrości	• bardzo wysoka cena • wrażliwość na uszkodzenia • mała trwałość • trudna regulacja
Laser IR	• zwarta konstrukcja • może być łatwo strobowany	• wymaga skomplikowanej optyki • rozbieżna wiązka • trudna regulacja
Dioda IR	• zwarta konstrukcja • prosta optyka	• niska moc • rozbieżna wiązka światła
Lampa strobo-skopowa	• duża moc i efektywność świetlna • możliwość synchronicznej obse-rwacji ruchomych elementów	• duże rozmiary • wymaga wysokiego napięcia • wysoka cena • zbyt błękitne światło





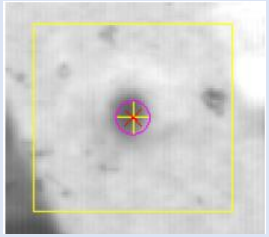




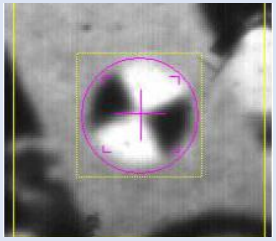


Sposoby oświetlania

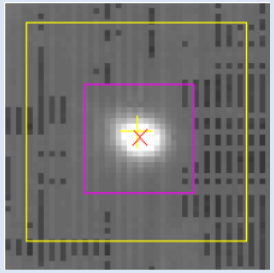
Kamera szybkoklatkowa – analiza obrazu



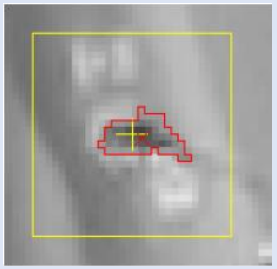
a) Corrleation



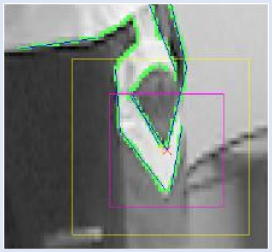
b) Quadrant



c) Circular Symmetry



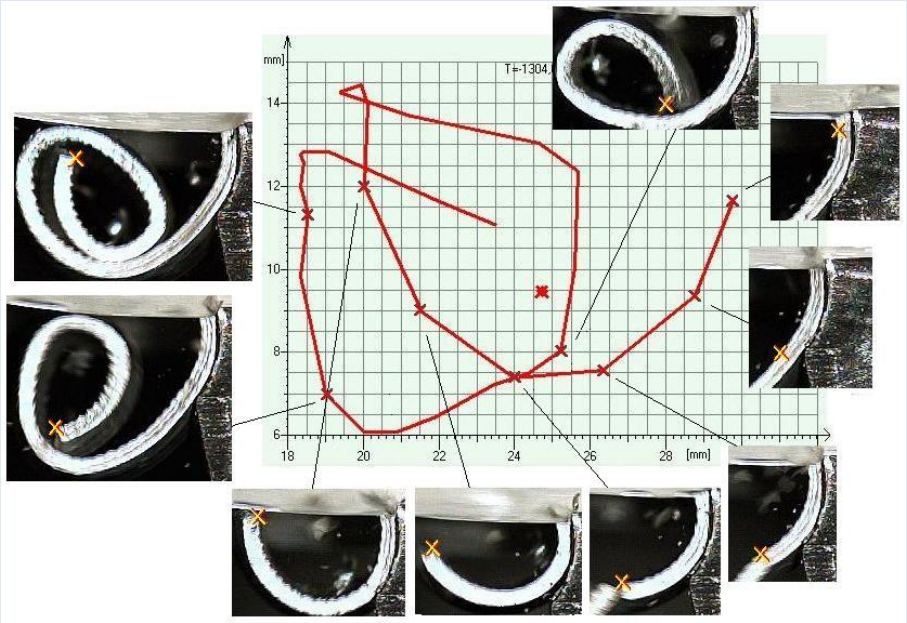
d) Center of gravity



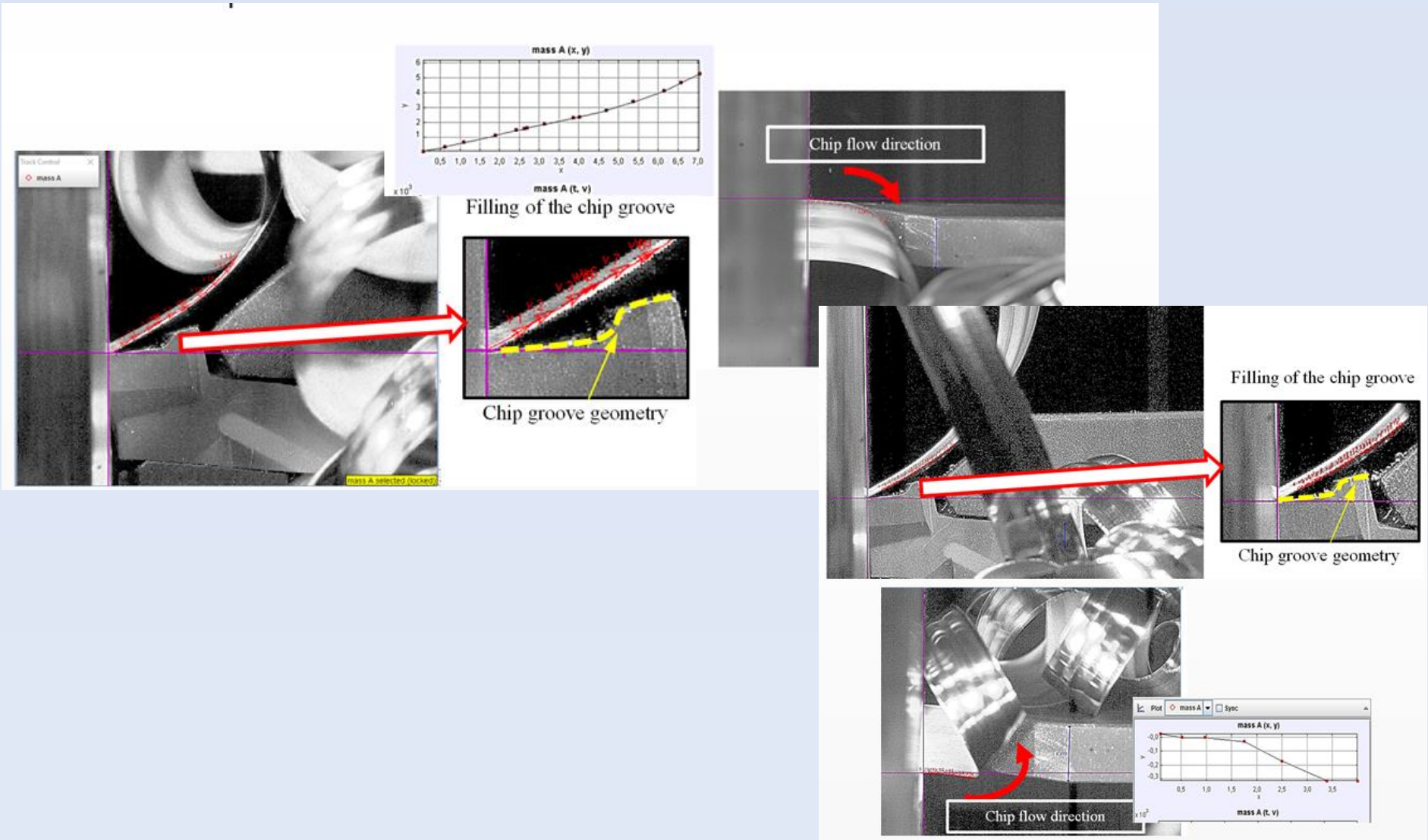
e) Intersection tracker

Algorytmy śledzenia dostępne w programie TEMA Motion

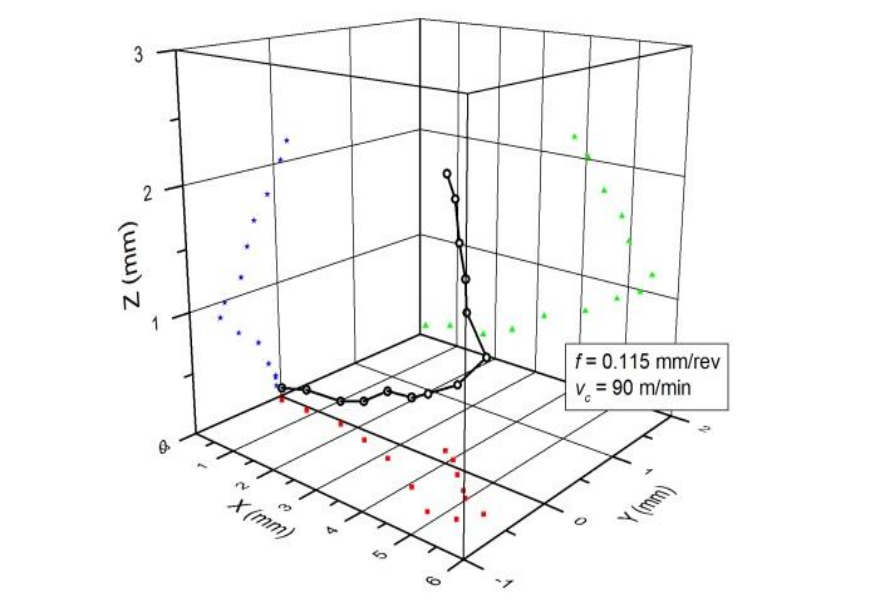
Zobrazowanie ruchu znacznika podczas procesu tworzenia i zwijania wióra w układzie współrzędnych XY

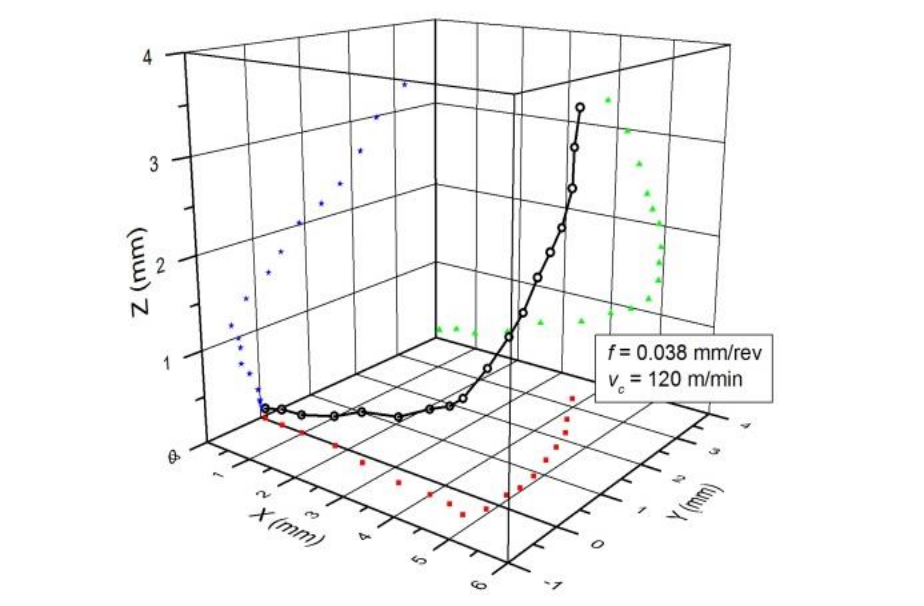


Kamera szybkoklatkowa – analiza obrazu

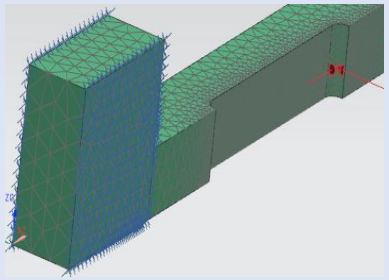


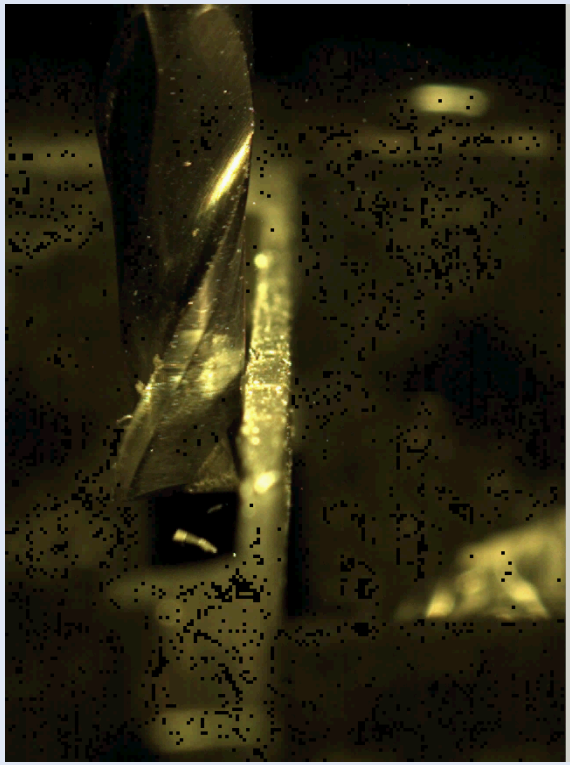
Kamera szybkoklatkowa – analiza obrazu

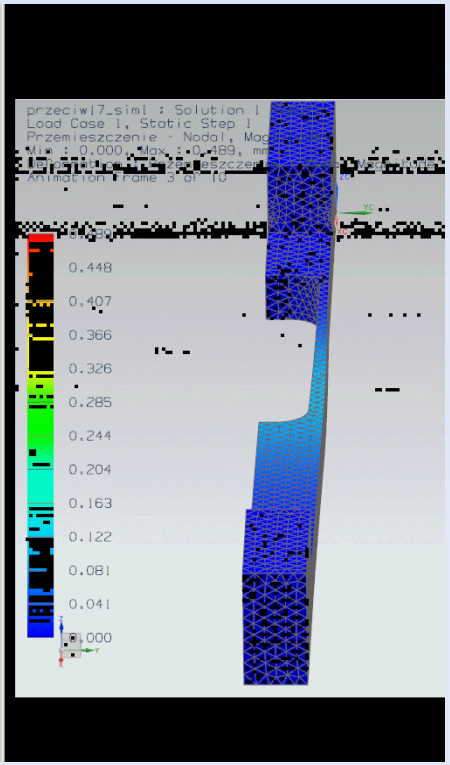


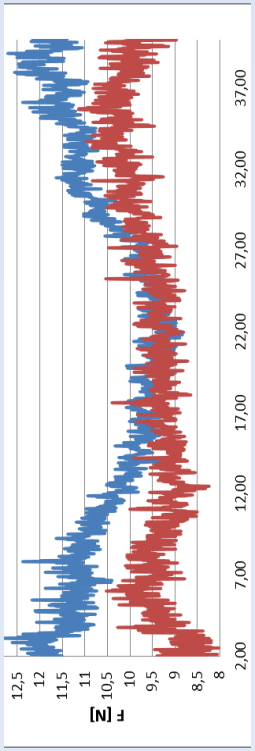


Kamera szybkoklatkowa – analiza obrazu









Dziękuję za uwagę