

MIECZYŚLAW PŁOCICA, BOGDAN KOZIK, GRZEGORZ BUDZIK *

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA TERMOWIZJI DO OCENY JAKOŚCI WSPÓŁPRACY PARY KÓŁ ZĘBATYCH

POSSIBILITY OF THERMOGRAPHY APPLICATION FOR VALUATION OF QUALITY OF GEARS COOPERATION

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono propozycję wykorzystania pomiarów termowizyjnych do oceny śladu współpracy kół zębatach. Wskazano na możliwości uzyskania danych o błędach wykonawczych i montażowych przekładni na podstawie termogramu. Zarysowano perspektywę użycia termowizji jako dynamicznej metody analizy pracy przekładni w okresie jej użytkowania, określania zużycia przekładni oraz prognozowania miejsc wystąpienia uszkodzeń.

Słowa kluczowe: termografia, przekładnie zębate, pomiar temperatury

Abstract

In the paper a thermography measurement with application to gears valuation was presented. Thermal images (called thermograms), are actually visual displays of the amount of infrared energy emitted, transmitted, and reflected by an object. Thermograms can be used for dynamical analysis of gear pairs and provide data about its quality.

Keywords: thermography, gears, temperature measurement

* Dr inż. Mieczysław Płocica, dr inż. Bogdan Kozik, dr hab. inż. Grzegorz Budzik, Katedra Konstrukcji Maszyn, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska.

1. Metody oceny jakości zazębienia kół zębatach

Jednym z podstawowych kryteriów jakości zazębienia pary zębatach jest sumaryczny ślad współpracy. Jego kształt, wielkość i położenie wpływa na hałas generowany przez przekładnię, możliwość przenoszenia obciążeń oraz zużycie współpracujących powierzchni zębatach. Klasyczny sposób oceny przekładni polega na pokrywaniu tuszem powierzchni bocznych zębatach i sprawdzaniu śladu współpracy pod lekkim obciążeniem na maszynie kontrolnej (tzw. kontrolerce). Porównanie uzyskanego śladu z wzorcowym pozwala zakwalifikować przekładnię jako prawidłowo wykonaną, ewentualnie dostarcza informacji o koniecznych do wprowadzenia korektach ustawczych obrabiarki. Tę metodykę stosuje się ciągle w ocenie przekładni stożkowych, na życzenie niektórych odbiorców, niemających dostatecznego zaufania do nowoczesnej metody komputerowej symulacji obróbki i sprawdzania współpracy na wygenerowanych modelach w odpowiednich programach inżynierskich. Tradycyjny sposób oceny śladu współpracy jest procesem długotrwałym i wymagającym wielu prób, które muszą być przeprowadzane każdorazowo po zmianie ustawień obrabiarki i wymagają nacięcia (po wprowadzonych zmianach) nowej pary zębatach.

Współczesna metoda oceny współpracy kół zębatach na modelach komputerowych stanowi istotny postęp w weryfikacji jakości przekładni. Opiera się ona na utworzonych matematycznych modelach procesu kształtowania i współpracy zębatach przekładni. Szczególnie użyteczne dla projektowania technologii są programy umożliwiające generowanie śladu współpracy przekładni na podstawie analizy kontaktu naciętej pary kół. Ślad ten jest wynikiem rozwiązań równań nieliniowych, określonych na podstawie teorii zazębienia [3].

W odniesieniu do przekładni stożkowych omawiana metoda została rozwinięta przez wiodących producentów obrabiarek, narzędzi i samych przekładni, tj. firmy Gleason oraz Klingelnberg-Oerlikon. Ocena śladu współpracy jest prowadzona w dwóch wariantach – jako TCA (*tooth contact analysis*) bez obciążenia oraz LTCA (*load tooth contact analysis*) pod obciążeniem, gdy ząb ulega ugięciu i następuje przemieszczenie śladu. Dodatkowo analizowany jest w obydwu wariantach wykres nierównomierności przekazywania ruchu, który pozwala ocenić sposób przenoszenia obciążenia przez zęby przekładni. Korzystanie z TCA i LTCA w praktyce przemysłowej wymaga zakupu odpowiedniego programu od jednej z wymienionych firm oraz dodatkowych modułów, umożliwiających symulację obróbki na konkretnych obrabiarkach [2]. Skutkiem działania programów są graficzne przedstawienia chwilowych elips styku, tworzących ślad współpracy. Dodatkowo możliwa jest współpraca w pętli sprzężenia zwrotnego z oprogramowaniem do pomiarów uzębienia na współrzędnościowych maszynach pomiarowych. Po zmierzeniu boku zęba naciętego koła (musi być wykonany przynajmniej jeden wręb) oraz porównaniu go z wzorcem uzyskanym z symulacji możliwe jest automatyczne lub ręczne generowanie wartości poprawek ustawczych obrabiarki tak, aby dopasować efekt obróbki do topografii wzorcowej.

Główne funkcje, realizowane przez zestaw współpracujących ze sobą programów (oferowanych zakładom przemysłowym na zasadach komercyjnych), to [3]:

- wspomaganie projektowania geometrii przekładni stożkowych i hipoidalnych,
- generowanie danych wejściowych dla obrabiarek do kół stożkowych (*summary*),
- konwersja danych z maszyn sterowanych mechanicznie na numeryczne,
- generowanie danych dla szlifierek do noży do głowic,

- generowanie i analiza śladu współpracy kół (TCA),
- sprawdzanie nierównomierności przenoszenia ruchu w przekładni,
- optymalizacja śladu współpracy zazębienia,
- automatyczne generowanie korekt do nastaw obrabiarki,
- tworzenie danych wzorcowych do kontroli geometrii kół,
- analiza podcięcia zęba oraz naprężeń,
- analiza wytrzymałościowa kół,
- generowanie i analiza śladu współpracy pod obciążeniem (LTCA),
- analiza porównawcza śladu współpracy ze śladem otrzymanym na maszynie kontrolnej,
- wizualizacja efektów przeprowadzonych analiz.

Komputerowa analiza zazębienia jest ciągle rozwijana z uwagi na istotne zalety w porównaniu do metody klasycznej. Skraca ona czas wdrażania do produkcji nowej przekładni przez minimalizację fizycznych prób nacinania kół, co jest zastępowane symulacjami obróbki i wprowadzaniem korekt na etapie projektowania. Wirtualna obróbka oraz analiza kontaktu pozwala na szybkie skorygowanie ustawień obrabiarki do takich, które gwarantują uzyskanie właściwego śladu współpracy.

2. Termografia i jej zastosowanie w technice

Termografia (lub termowizja – określenia stosowane zamiennie) w podczerwieni polega na zbieraniu i analizie informacji o temperaturze, uzyskanych z urządzeń do bezkontaktowego pomiaru temperatury. Kolory na obrazach termowizyjnych (termogramach) przedstawiają odbicie i emisję promieniowania. Emisja ciepła pochodzi z materiałów, natomiast odbicie – od elementów wokół obiektów (oraz od operatora kamery termowizyjnej) [4]. Zastosowanie przemysłowe termowizji obejmuje m.in.:

- kontrolę stanu pracy urządzeń (silniki, pompy, wymienniki ciepła),
- przeglądy instalacji elektrycznych,
- diagnostykę techniczną,
- kontrolę produkcji.

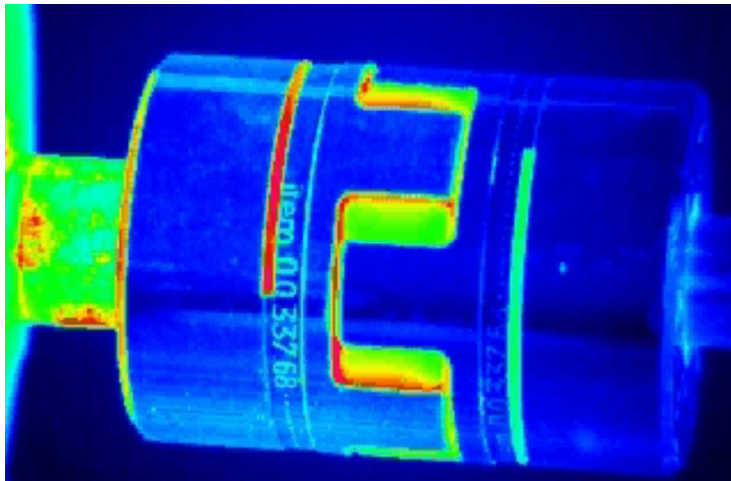
Dzięki zastosowaniu termografii można także określić emisję ciepła przez urządzenia i budynki oraz wdrażać modernizacje dla obniżenia strat ciepła.

Efekt pomiaru termowizyjnego w dużym stopniu zależy od materiału mierzonego przedmiotu. Wiarygodne efekty uzyskuje się, jeśli przedmioty są dobrymi emiterami. Do materiałów o dużej emisyjności należą m.in. drewno, guma, PVC i większość innych tworzyw sztucznych, porcelana, beton, ceramika, ziemia, papier. Metale są słabymi emiterami i poza elementami mocno utlenionymi mają emisyjność poniżej 0,25. Mimo to, powszechnie stosuje się termowizję do diagnostyki obwodów elektrycznych i stacji rozdzielczych, w których podstawowe elementy wykonane są z miedzi lub stopów aluminium. Uzyskanie czytelnego termogramu, jednoznacznie wskazującego miejsca o zwiększonych stratach ciepła, jest możliwe z uwagi na dużą różnicę temperatury między otoczeniem a elementem, nieprawidłowo obciążonym cieplnie (np. przeciążona faza).

Emisyjność zależy także od:

- stanu i chropowatości powierzchni,
- kształtu powierzchni (nieciągłości, otwory i wklęsłości zwiększają emisyjność),

- kąta obserwacji,
- stopnia utlenienia metalu,
- pokryć malarskich i innych.



Rys. 1. Wpływ pokrycia malarskiego (napis na korpusie sprzęgła) na emisyjność powierzchni

Fig. 1. The influence of paint (inscription on clutch body) on surface emission

Zalety termografii to:

- szybka ocena obciążenia termicznego powierzchni obiektu i możliwość porównania pod tym względem różnych jego obszarów,
- możliwość zapisu termogramu i późniejszych analiz ścieżek termalnych,
- brak oddziaływania użytkownika na mierzony obiekt.

W odniesieniu do przekładni zębatach pomiary termograficzne znalazły dotychczas zastosowanie jedynie do oceny obciążeń cieplnych korpusów, ewentualnie węzłów łożyskowych. Pomiar rozkładu temperatury na zębach kół nie jest wykonywany tą metodą z uwagi na trudności, jakie występują przy pomiarze. Główne czynniki utrudniające pomiar to jakość powierzchni zębów (zazwyczaj błyszcząca stal, co daje małą emisyjność) oraz praca przekładni w zamkniętych korpusach (termografia rejestruje tylko temperaturę bezpośrednio widocznej powierzchni). Nie ma jednak obiektywnych przeszkód, żeby dokonywać pomiarów kół przekładni wykonanych z tworzyw sztucznych na stanowiskach badawczych.

Współpraca powierzchni bocznych zębów w przekładni powoduje ich odkształcenie w miejscu styku. Dodatkowo występuje tarcie, które jest drugim czynnikiem generującym wzrost temperatury w obszarze współpracy. Pole zmian temperatury pozwala wyciągnąć wnioski co do obszaru styku oraz błędów wykonania kół zębatach i błędów montażowych.

Celowość wykorzystania termografii do oceny przekładni zębatach wynika z jej następujących przesłanek:

- bezkontaktowy pomiar i szybka diagnostyka,
- możliwość pomiarów dynamicznych w czasie pracy przekładni,

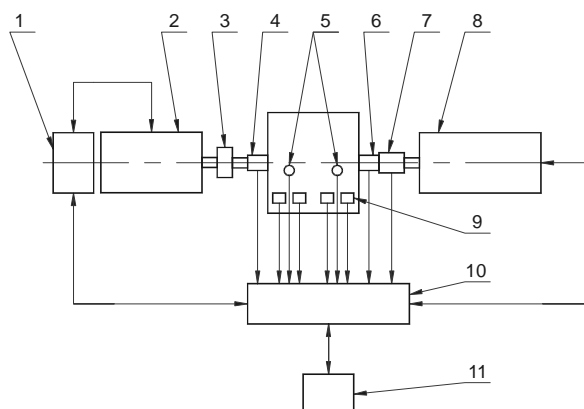
- możliwość powtarzania pomiaru okresowo w czasie użytkowania przekładni, co pozwala na określenie stopnia jej zużycia, zaplanowanie remontu, ewentualnie zauważenie rozwijających się zmian, mogących prowadzić do uszkodzenia zespołu,

Ostatni z wymienionych podpunktów wymaga opracowania metodyki pomiaru termowizyjnego przekładni w jej miejscu pracy (konieczność bezpośredniego wizualnie dostępu do wieńców zębatach).

3. Pomiar termowizyjny przekładni zębatej w czasie pracy

Koła przekładni do badań termowizyjnych wykonano metodą FDM (*fused deposition modeling*). Jest to jedna z najbardziej popularnych metod Rapid Prototyping i polega na budowaniu modelu warstwami przez natryskiwanie materiału za pomocą dyszy, która jest nagrzewana w celu stopienia podawanego materiału. W metodzie FDM można wykorzystać kilka rodzajów materiału, jak: wosk, ABS (akrylonitrylbutadienstyren) i poliwęglany. Przedmiotowe koła wykonano z ABS. Materiał ten ma największą wytrzymałość w porównaniu do pozostałych oraz pozwala jednocześnie na uzyskanie największej dokładności wykonania. Badane koła mają zarys ewolwentowy (kąt zarysu $\alpha = 20^\circ$) oraz moduł $m = 1,5$ mm.

Pomiary termowizyjne wykonano przy prędkości obrotowej $n = 1500$ obr/min i momencie obciążającym $T = 4$ Nm. Wykorzystano stanowisko badawcze, którego schemat blokowy przedstawia rys. 2. Zostało ono zaprojektowane i wykonane w Katedrze Konstrukcji Maszyn Politechniki Rzeszowskiej w celu prowadzenia badań przekładni i par kół zębatach małych mocy (do 1,5 kW) wykonanych przede wszystkim z tworzyw sztucznych [1]. Założenia do budowy stanowiska opracowano przy współpracy z firmą ZELMER.

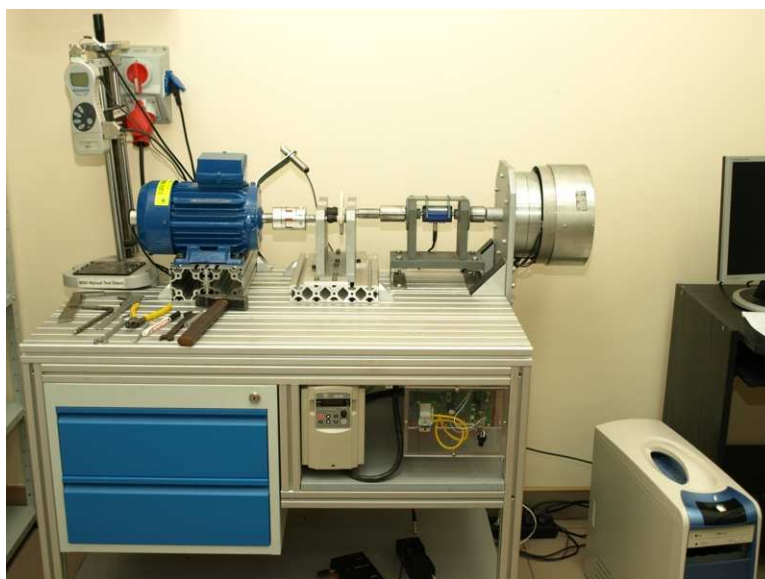


Rys. 2. Schemat blokowy stanowiska: 1 – Falownik, 2 – Silnik, 3 – Sprzęgło, 4 – Enkoder we, 5 – Pirometr, 6 – Enkoder wy, 7 – Momentomierz, 8 – Hamulec, 9 – Termopara, 10 – System pomiarowy, 11 – Komputer

Fig. 2. The block diagram of research stand: 1 – inverter, 2 – engine, 3 – dog clutch, 4 – encoder in, 5 – pyrometer, 6 – encoder ex, 7 – torquemeter, 8 – brake, 9 – thermocouple, 10 – measuring system, 11 – computer

Trójfazowy silnik indukcyjny (2) sterowany falownikiem (1) poprzez sprzęgło (3) napędza badaną przekładnię stanowiskową. Przekładnia ta obciążona jest hamulcem (8), który wprowadza do układu moment napinający mierzony momentomierzem (7). Położenie wałów przekładni określone jest cyfrowo przez przetworniki położenia (4, 6). Wszystkie dane ze stanowiska badawczego są odczytywane przez system pomiarowy (10) i przekazywane do komputera (11).

Do pomiaru termowizyjnego wykorzystano kamerę typu FLIR SC5000. Umożliwia ona rejestrację zmian temperatury na poziomie 25 mK (różnica temperatury rejestrowana przez sąsiednie piksele) w obszarze 640×512 pikseli. Termogramy rejestrowano w programie ALTAIR.

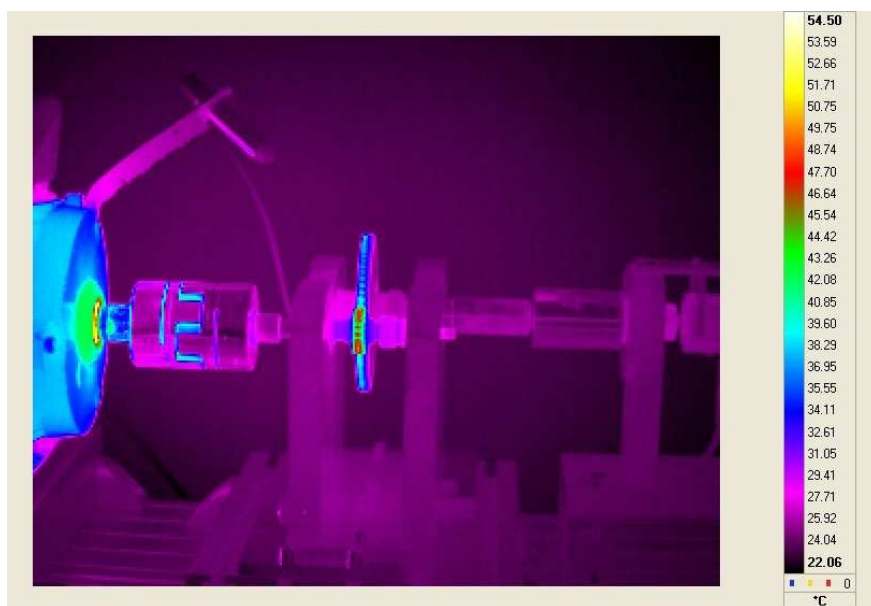


Rys. 3. Widok ogólny stanowiska badawczego

Fig. 3. The overall view of research stand

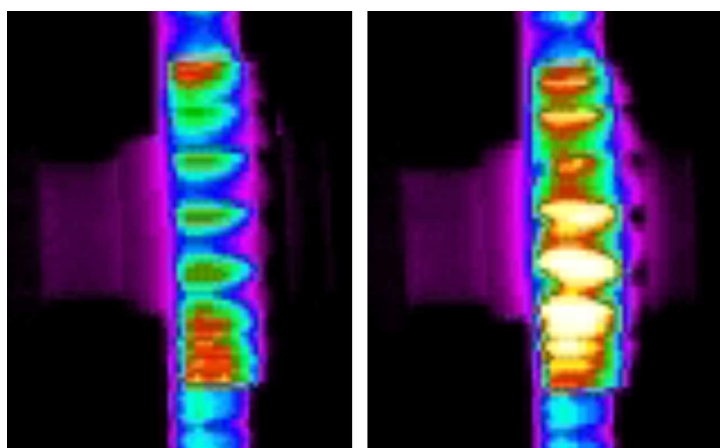
Przy wykonywaniu pomiarów termowizyjnych należy zwrócić uwagę, że część rejestrowanej temperatury to pozorna temperatura odbita (ang. *reflected apparent temperature*, ozn. TRefl). Odbicia takie mogą być przyczyną błędnej oceny temperatury. Dla prawidłowości pomiaru termowizyjnego konieczne jest zdefiniowanie odniesienia do wzorców emisyjności i odbicia (TRefl), ponieważ obydwie te wielkości nie są obliczane automatycznie. W praktyce jako ciało o znanej emisyjności wykorzystuje się czarną taśmę samoprzylepną (emisyjność $\epsilon = 0,95$) natomiast TRefl określa się na podstawie błyszczącej folii aluminiowej. Metodę ustalenia obydwu omawianych wielkości dla wzorców zawiera norma ISO 18434-1. Zakres temperatury przeznaczony do rejestracji na termogramie może być ustawiany automatycznie lub ręcznie. Dla oceny wybranego fragmentu obiektu można definiować wielkość okna pomiarowego, zależnie od możliwości kamery. Im mniejsze okno pomiarowe, tym można uzyskać większą częstotliwość odczytu temperatury (ponad 1000 zapisów na sekundę). W omawianym przypadku ustawiono

zakres temperatury od $+20$ do $+55^{\circ}\text{C}$ oraz wykorzystano pełny obszar pomiarowy kamery (640×512 pikseli) oraz obszar zmniejszony, obejmujący tylko zębnik przekładni, na którym obserwowano temperaturę w obszarze współpracy zazębienia. Przykładowe klatki zarejestrowanych termogramów pokazano na rys. 4 i 5.



Rys. 4. Obraz termowizyjny stanowiska badawczego z pracującą przekładnią

Fig. 4. Thermogram of research stand with tested gears



Rys. 5. Klatki termogramu zębniaka (zapis wykonany co 180°)

Fig. 5. Thermograms of pinion (record made every 180°)

4. Wnioski

Z uwagi na wstępne rozpoznawanie zagadnienie użyteczności termografii dla oceny jakości współpracy par zębnych, możliwe do określenia wnioski i perspektywy są ogólne. Na podstawie rozpoczętych prac badawczych można je sformułować następująco:

- metoda termowizyjna pozwala na analizę dynamiczną zazębienia i może stanowić istotne uzupełnienie stosowanych dotychczas metod oceny wskaźników jakościowych przekładni zębnych,
- na podstawie termogramu można określić podstawowe błędy wykonania uzębienia (np. błąd podziałki, błąd zarysu) oraz błędy montażowe (skoszenie osi). Można także zidentyfikować nietypowe błędy wykonawcze związane ze specyficznymi metodami wytwarzania (techniki RP). W badanej przekładni zaobserwowano związek wielkości pola odkształcenia z kątem obrotu koła (rys. 5). Jest to wynik błędu okrągłości jednego z kół (tj. niestałością średnicy okręgu tocznego).

Podczas pomiarów termowizyjnych przekładni należy zwrócić szczególną uwagę na:

- dobór odpowiedniej wartości obciążenia dla jednoznacznej obserwacji pola styku. Zbyt duże obciążenie powoduje ugięcie całego zęba i wzrost temperatury w całej jego objętości, skutkiem czego termogram traci czytelność,
- dobór właściwych parametrów pomiaru termowizyjnego. Rozdzielczość obrazu i częstotliwość zapisu powinny być odpowiednio wysokie, należy brać tu pod uwagę prędkość obrotową kół.

Należy wskazać na nieuniknione problemy do rozwiązania, wynikające z metody pomiaru i sposobu odczytu. W obszarze współpracy zęby ulegają ugięciu, z czym związana jest zmiana temperatury. Obserwacja nie jest jednak prowadzona w miejscu styku, ale po obrocie koła o pewien kąt, dlatego postać obszaru współpracy powinna zostać skorygowana na podstawie wiedzy nt. spadku temperatury w czasie przemieszczenia zęba od miejsca styku z drugim zębem do miejsca obserwacji.

Badania realizowane w ramach Projektu Nr POIG.0101.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

Literatura

- [1] Budzik G., Kozik B., Sobolak M., *Uniwersalne stanowisko badawcze małych przekładni z tworzyw sztucznych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika, z. 75, Rzeszów 2008.
- [2] Feld M., Brzeski K., *Optymalizacja wielkości ustawczych obrabiarek do nacinania uzębień kół stożkowych o kołowo-lukowym zarysie zęba*.
- [3] Marciniak A., Płocica M., *Raport na temat aktualnego stanu wiedzy o konstrukcji i technologii lotniczych przekładni stożkowych*, Opracowanie w ramach projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Rzeszów 2009.
- [4] www.flir.com