

**Marek FIDALI, Anna BZYMEK, Wojciech JAMROZIK, Artur CZUPRYŃSKI, Anna TIMOFIEJCZUK**  
POLITECHNIKA ŚLĄSKA,  
Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice

## Dobór elementów wizyjnego systemu monitorowania procesu spawania

### Dr inż. Marek FIDALI

Absolwent Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej. Od 2003 zatrudniony na stanowisku adiunkta w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn. Podstawowe zainteresowania i kierunki badań dotyczą metod diagnostyki technicznej, termowizji, metod przetwarzania i analizy sygnałów oraz obrazów, analizy modalnej, systemów pomiarowych a także wibroakustyki.



e-mail: [marek.fidali@polsl.pl](mailto:marek.fidali@polsl.pl)

### Dr inż. Anna BZYMEK

Absolwentka Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej. Od 2011 roku jest zatrudniona na stanowisku adiunkta w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn. Głównym obszarem zainteresowań i kierunkiem badań są: zastosowania wizji maszynowej i systemów wizyjnych w diagnostyce maszyn i procesów wytwórczych, przetwarzanie, analiza i rozpoznawanie obrazów oraz analiza sygnałów.



e-mail: [anna.bzymek@polsl.pl](mailto:anna.bzymek@polsl.pl)

### Mgr inż. Wojciech JAMROZIK

Absolwent Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej. Od 2007 uczestnik studiów doktoranckich w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn. Podstawowe kierunki prac badawczych obejmują metody diagnostyki technicznej i termowizji, przetwarzania, analizy i rozpoznawania obrazów oraz fuzji informacji niepewnej w diagnostyce maszyn i procesów.



e-mail: [wojciech.jamrozik@polsl.pl](mailto:wojciech.jamrozik@polsl.pl)

### Streszczenie

Obserwacje wizyjne stają się coraz bardziej powszechnym sposobem kontroli i nadzorowania procesów produkcyjnych i zjawisk w nich zachodzących. Jedną z możliwości zastosowania systemu wizyjnego jest kontrola procesu spawania i wykonywanych połączeń. W artykule przedstawiono wskazówki i zalecenia dotyczące wyboru i konfiguracji systemu wizyjnego przeznaczonego do kontroli procesu spawania i połączeń spawanych. Informacje zawarte w artykule wynikają z doświadczeń zdobytych przez autorów w trakcie opracowywania systemu wizyjnej kontroli spawania.

**Słowa kluczowe:** termografia w podczerwieni, proces spawania, monitorowanie wizyjny, obraz, kamera.

## Selection of components of a vision monitoring system for welding process

### Abstract

Visual observation are becoming more and more common way of control and supervision of industrial processes and phenomena related to them. One of possibilities of vision system application is control of a welding process and welded joints. In the paper there are presented hints and recommendations dealing with selection of a configuration of the vision system for control of a welding process and welded joints. A system for monitoring welding process elaborated by the authors is also described and discussed. The welding process can be observed both in a range of infrared as well as in visual electromagnetic waves. The vision system consists of elements realizing image generation, acquisition, processing, and analysis. In more sophisticated systems the last stage of their operation is image recognition. Recently, the observation of welding processes with use of

### Dr inż. Artur CZUPRYŃSKI

Absolwent Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej. Od 2003 roku zatrudniony na stanowisku adiunkta w Katedrze Spawalnictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach. W roku 2001 uzyskał certyfikat European Welding Engineer (EWE-00648/2001) nadany przez Instytut Spawalnictwa w Gliwicach. W swej działalności naukowej zajmuje się technologiami spawania i cięcia termicznego, lutowania oraz problemami regeneracji części maszyn metodami spawalniczymi.



e-mail: [artur.czuprynski@polsl.pl](mailto:artur.czuprynski@polsl.pl)

### Dr inż. Anna TIMOFIEJCZUK

Absolwentka Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej. Od 1999 roku zatrudniona na stanowisku adiunkta w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn. Podstawowe zainteresowania i kierunki badań dotyczą metod diagnostyki technicznej, analizy sygnałów niestacjonarnych, wnioskowania diagnostycznego oraz metod przetwarzania i analizy obrazów i termogramów.



e-mail: [anna.timofiejczuk@polsl.pl](mailto:anna.timofiejczuk@polsl.pl)

vision systems is a subject of great interests of numerous companies and research centers. There are commercial and experimental solutions of these systems. During the process usually the size and location of a weld pool, geometry of the welded joint as well as the quality of the joint can be evaluated. An on-line system basing on the analysis results of the above enumerated elements of the welding process makes it possible to control the process parameters. The authors have elaborated a system consisting of a TV and infrared camera. The system allows observing MIG/MAG welding process. The authors' experience shows that a correct configuration of the vision system has fundamental influence on the recorded data.

**Keywords:** infrared thermography, welding process, vision monitoring, image, camera.

## 1. Wstęp

Wizyjna kontrola procesu spawania jest nowoczesną i ciągle rozwijającą się techniką służącą do obserwacji zjawisk zachodzących podczas spawania oraz do monitorowania i oceny jakości wykonywanych połączeń. Obserwacja procesu spawania jest realizowana w świetle widzialnym, jak również w zakresie bliskiej i dalekiej podczerwieni, przez systemy wizyjne stanowiące odpowiednio dobrane i powiązane ze sobą elementy pozwalające na rejestrację, przetwarzanie i analizę obrazów.

Obserwacja procesu spawania za pomocą systemów wizyjnych jest przedmiotem zainteresowania wielu firm i instytutów badawczych. Istnieją komercyjne i eksperymentalne rozwiązania pozwalające kontrolować i śledzić proces spawania [1, 2, 3] rozmiary i położenie jeziorka spawalniczego [4, 5, 6], kontrolować geometrię złącza oraz jakość wykonania połączenia [7, 8]. Stosowane rozwiązania coraz częściej działają w trybie on-line [9, 10] i pozwalają w sposób adaptacyjny korygować parametry procesu spawania [11, 12].

W Polsce prace nad wizyjnym monitorowaniem procesu spawania do oceny jakości połączenia spawanego prowadzone są w kilku ośrodkach naukowo badawczych [13, 14, 15] oraz m.in. na Politechnice Śląskiej gdzie opracowano system monitorowania procesu spawania metodą MIG/MAG bazujący na urządzeniach obrazowania w podczerwieni i świetle widzialnym oraz zaawansowanych metodach przetwarzania i analizy obrazów [17, 18, 19].

W artykule podano ogólne zalecenia niezbędne przy projektowaniu i budowie efektywnego systemu wizyjnego do oceny proce-

su spawania. Należy podkreślić, że dobór i odpowiednia konfiguracja elementów systemu wizyjnego ma duży wpływ, na jakość jego funkcjonowania i przydatność pozyskanych danych.

## 2. Charakterystyka procesu spawania

Spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazowej należy do jednej z najczęściej spotykanych metod łączenia metali zarówno w przemyśle jak i w warunkach warsztatowych. Metoda MIG/MAG jest procesem w trakcie, którego łuk elektryczny jarzący się między topliwą elektrodą metalową a materiałem rodzimym stapia materiał dodatkowy, który łącząc się z nadtopionymi brzegami elementów spawanych tworzy trwale nierozłączne połączenie. Proces powstawania złącza zachodzi w osłonie gazu, dzięki temu zapewnione jest formowanie spoiny w bardzo korzystnych warunkach cieplnych i metalurgicznych. Warunkiem uzyskania wysokiej jakości połączeń spawanych jest zachowanie parametrów procesowych na optymalnym poziomie. Wielkością pozwalającą na prawidłowe dobranie parametrów spawania łukowego jest energia liniowa spawania  $E_s$  wyrażona jako stosunek mocy źródła ciepła do prędkości spawania:

$$E_s = \frac{U_s \cdot I_s \cdot \eta}{v_s} \left[ \frac{J}{mm} \right], \quad (1)$$

gdzie:

- $I_s$  – natężenie prądu spawania [A],
- $U_s$  – napięcie łuku [U],
- $v_s$  – prędkość spawania [mm/s],
- $\eta$  – współczynnik sprawności nagrzewania.

W trakcie spawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazowej generowana jest duża ilość energii cieplnej, której głównym źródłem jest łuk elektryczny. Temperatura, w osi słupa łuku spawalniczego, może wynosić od 5000 do 30000 K [20], natomiast temperatura, kropeł materiału dodatkowego jest rozłożona niejednorodnie i przy spawaniu stali metodą MIG/MAG mieści się w granicach od 2000K-3000K [21]. W czasie spawania stali niskostopowej metodą MAG w osłonie CO<sub>2</sub>, średnia temperatura metalu w jeziorce spawalniczym wynosi około 2000 K, a temperatura metalu na powierzchni jeziorka spawalniczego jest wyższa o około 450 K.

Wielkość kropeł tworzących się na końcu elektrody zależy od wielu czynników. Badania zaprezentowane w pracy [22], wykazują, że wraz ze wzrostem natężenia prądu spawania średnica kropli przenoszonej w łuku elektrycznym maleje, natomiast ilość kropli w jednostce czasu rośnie. Według Kima i Eagara [23], przy spawaniu w osłonie mieszanki gazowej Ar+2% O<sub>2</sub> średnica kropli przy kropłowym przenoszeniu metalu dla drutu elektrodowego o średnicy 2,6 mm wynosi 3,6÷4,2 mm, natomiast wzrost natężenia prądu powyżej 210 A powoduje zmniejszenie średnicy kropli od 3,2 mm do 0,1 mm.

Szybkość przemieszczania się kropli w przestrzeni międzyelektrodowej zależy od składu chemicznego atmosfery gazowej łuku elektrycznego [24]. Przy spawaniu metodą MIG/MAG prądem stałym pulsującym czas przejścia ciekłej kropli metalu (tj. czas od momentu jej oderwania od końca drutu elektrodowego do momentu kontaktu z jeziorkiem spawalniczym) przy zachowaniu tych samych parametrów spawania w osłonie argonu wynosi od 2,8 do 3,0 ms; dla mieszanki gazowej Ar+2% O<sub>2</sub> - od 2,9 do 3,1 ms i około 4,0 ms dla mieszanki gazowej Ar+20% CO<sub>2</sub>.

W czasie spawania do otoczenia emitowana jest duża ilość promieniowania elektromagnetycznego obejmującego szerokie spektrum częstotliwości począwszy od ultrafioletu poprzez promieniowanie widzialne aż do podczerwieni (Tab. 1) [25]. Źródłem emisji są m.in. łuk spawalniczy, rozgrzane do wysokiej temperatury gazy spawalnicze i pary metali, elementy spawane, materiał elektrody itp. [26]. Proces spawania generuje również pary metali, dymy spawalnicze, pyły oraz rozprysk metalu. Wszystkie te czynniki mają bezpośredni wpływ na jakość obserwacji procesu spawania

oraz bezpieczeństwo urządzeń obserwacyjnych, dlatego powinny być one uwzględniane w trakcie doboru cech układu wizyjnego.

Tab. 1. Promieniowanie emitowane przez łuk w trakcie spawania [25]  
Tab. 1. Radiation emitted by welding arc during welding process [25]

Zakres promieniowania	Długość fali [nm]
Promieniowanie nadfioletowe krótkofalowe UV-C	100÷280
Promieniowanie nadfioletowe średniofalowe UV-B	280÷315
Promieniowanie nadfioletowe długofalowe UV-A	315÷400
Promieniowanie widzialne	400÷700
Promieniowanie podczerwone bliskie IRA	700÷1400
Promieniowanie podczerwone średnie IRB	1400÷3000

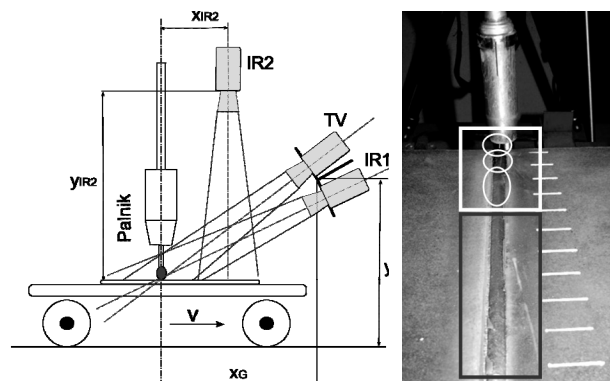
## 3. Wizyjny monitoring procesu spawania

Monitoring wizyjny procesu spawania ma na celu usprawnienie kontroli poprawności przebiegu procesu oraz oceny jakości wykonania złącza. Prowadzenie monitoringu wizyjnego wymaga przygotowania systemu monitorującego, którego budowa uzależniona jest od takich czynników jak: usytuowanie, konstrukcja, rozmiary i przeznaczenie stanowiska spawalniczego, zakres kontroli procesu, liczba wykonywanych złączy, możliwości finansowe itp. Niezbędnymi i podstawowymi elementami wizyjnego systemu monitorowania procesu spawania są:

- urządzenie(a) obrazowania (kamera) wraz z odpowiednim układem optycznym i interfejsem komunikacyjnym,
- serwer systemu (komputer) wraz układem przechwytywania obrazów (ang. frame grabber) z interfejsem komunikacyjnym kompatybilnym z urządzeniem obrazowania,
- oprogramowanie do przechwytywania, rejestracji, przetwarzania, analizy i/lub rozpoznawania obrazów.

W zależności od potrzeb i posiadanych urządzeń obrazowania, monitoring wizyjny procesu spawania można rozpatrywać w kontekście różnych obszarów obserwacji [27]. Na rysunku 1 wskazano rozpatrywane przez autorów możliwości umiejscowienia kamery wraz z obszarami widzenia. Z punktu widzenia kontroli jakości złącza istotne jest pozyskiwanie i analiza obrazów powierzchni wykonanej spoiny. Dla potrzeb kontroli stabilności procesu spawania celowa jest obserwacja obszaru łuku spawalniczego. W tych dwóch podstawowych obszarach istnieją możliwości wyodrębnienia podobszarów przedstawiających jeziorko spawalnicze, fragmenty stygnącej spoiny, strefę wpływu ciepła, materiał dodatkowy i obszar, w którym występuje jego przeniesienie do materiału rodzimego.

Każdy z wymienionych obszarów może być monitorowany niezależnie, z zastosowaniem jednego lub wielu urządzeń obrazowania, działających w różnych zakresach widma elektromagnetycznego. Stosowanie wielu różnych urządzeń pozwala na pozyskanie obrazów o różnej zawartości informacji, co z jednej strony podnosi skuteczność oceny stanu procesu spawania a z drugiej zwiększa koszty systemu i komplikuje późniejszą analizę danych.



Rys. 1. Obszary mogące być przedmiotem obserwacji wizyjnej  
Fig. 1. Areas possible to be observed

Kluczowym elementem wizyjnego systemu monitorowania procesu spawania jest urządzenie obrazujące składające się z takich podstawowych elementów jak:

- detektor - odpowiedzialny za przetworzenie promieniowania elektromagnetycznego na proporcjonalny do niego sygnał elektryczny,
- układ przetwarzania sygnałów – odpowiedzialny za dopasowanie i zamianę elektrycznych sygnałów analogowych pochodzących z detektora na sygnały cyfrowe,
- interfejs komunikacyjny – odpowiedzialny za komunikację kamery z zewnętrznym komputerem,
- układ optyczny – decydujący o rozdzielczości przestrzennej obrazu, polu widzenia i jakości obrazowania.

Dla potrzeb dalszych rozważań urządzenia podzielono na kamery światła widzialnego i kamery działające w zakresie podczerwieni.

### 3.1. Dobór urządzeń obrazowania procesu spawania w zakresie światła widzialnego

Obserwację procesu spawania w zakresie promieniowania widzialnego można prowadzić za pomocą kamer cyfrowych i analogowych. Kamery te mogą być wyposażone w dwa rodzaje układów detekcji promieniowania:

- detektory ze sprzężeniem ładunkowym CCD (*Charge Coupled Device*) składające się z elementów światłoczułych, w których podczas naświetlania uwalniają się nośniki ładunku (elektrony lub dziury). Nośniki te są przesuwane skokowo przez zmiany potencjału elektrycznego. Wzdłuż każdej kolumny matrycy znajduje się kanał CCD, którym ładunki przepływają do rejestrów odczytu, wzmacniacza sygnału, a następnie do przetwornika analogowo-cyfrowego. Ilość uwolnionych nośników prądu jest wprost proporcjonalna do ilości (natężenia i czasu działania) padającego światła. W ten sposób otrzymywana jest informacja o luminancji szczegółów rejestrowanego obiektu. Przetworniki CCD charakteryzują się dużym zakresem dynamicznym oraz łatwością resetowania (rozpoczynania akwizycji po zamknięciu migawki). Ze względu na małą liczbę elementów elektronicznych matrycy uzyskuje się jej duży współczynnik wypełnienia elementami światłoczułymi, przy jednocześnie niewielkich szumach [28],
- detektory CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) zbudowane są z tzw. „inteligentnych pikseli”, które składają się z fotodiody, wzmacniacza sygnału, przetwornika analogowo-cyfrowego, rejestratora oraz mikrosoczewki, której zadaniem jest skupianie światła. Przetwarzanie ładunków na napięcie odbywa się równocześnie dla wszystkich pikseli matrycy. Dzięki zintegrowaniu układu elektronicznej konwersji ładunku z każdym fotoelementem matrycy CMOS czas odczytu całej matrycy jest krótszy niż w przypadku CCD. Fotoelementy CMOS charakteryzują się niższym napięciem zasilania, mniejszym poborem mocy i większą odpornością na zakłócenia w porównaniu z elementami matryc CCD. Matryce CMOS mają również wadę, wynikająca z niejednorodności fotoelementów zamieniających ładunek na napięcie. Objawia się to tym, że przy jednakowym naświetleniu całej matrycy CMOS z każdego piksela odczytamy nieco inne napięcie, co na obrazie będzie widoczne, jako szum.

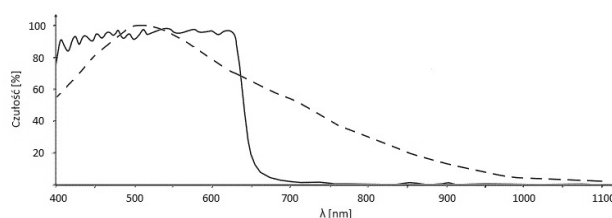
Liczba elementów światłoczułych w matrycy decyduje o rozdzielczości, a zatem i odwzorowaniu szczegółów obrazów pochodzących z kamery. Aktualnie produkowane są kamery z detektorami o rozdzielczościach np. od 128 x 128 pikseli do np. 17168 x 4096 pikseli (typowe rozdzielczości matryc to: 640 x 480 pikseli (format 1/4”), 1024 x 768 pikseli (format 1/3”), 1280 x 960 pikseli (format 1/2”). Wielkości pojedynczego piksela wynoszą od 2.2/2.2 μm do 14/14 μm. Należy zaznaczyć, że w przypadku większych kamer liczba pikseli detektora związana jest z szybkością obrazowania i ceną urządzenia.

Im większa rozdzielczość tym mniejsza prędkość akwizycji i wyższa cena. Szczególnym przypadkiem są kamery ultraszybkie

z detektorami CMOS [29], które przy ograniczonej wielkości ramki (np. 128 x 8 pikseli) umożliwiają obrazowanie z szybkością dochodzącą do 1,4 mln ramek/s. Tego typu rozwiązania pomimo wysokich cen coraz częściej znajdują zastosowanie w badaniu zjawisk fizycznych występujących w trakcie spawania [14].

Biorąc pod uwagę rozmiary detali sceny obserwowanej podczas spawania (por. rozdz. 1), najbardziej korzystne wydaje się zastosowanie kamer z matrycami o rozdzielczości nie mniejszej niż 640 x 480 pikseli. Szybkość obrazowania zależy od celu obserwacji. Jeśli istotna jest obserwacja procesu przenoszenia materiału dodatkowego, prędkość rejestracji ramki nie powinna być mniejsza niż 350 ramek/s. Takie parametry można uzyskać z zastosowaniem kamer CMOS pozwalających na programowy wybór obszaru ramki.

Kamery z przetwornikami CCD i CMOS zwykle umożliwiają obserwację promieniowania w zakresie 350 do 1000 nm (rys. 2 i rys. 4) co poza promieniowaniem widzialnym pokrywa również zakres ultrafioletu i bliskiej podczerwieni. Istnieją jednak urządzenia obrazowania, które nie są czułe na promieniowanie podczerwone, ze względu na naklejony na detektor filtr podczerwieni. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe charakterystyki dwóch kamer CCD bez filtra (linia przerywana) i z filtrem podczerwieni (linia ciągła) [30].

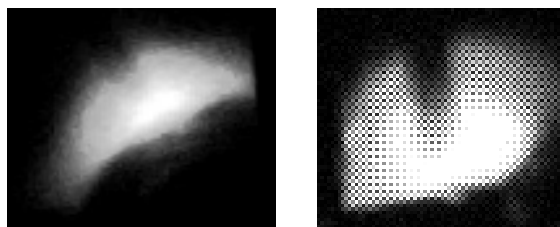


Rys. 2. Charakterystyki kamer CCD bez filtra podczerwieni (linia przerywana) i z naklejonym na matrycę filtrem odcinającym podczerwień (linia ciągła)  
Fig. 2. Camera characteristics without infrared filter (dotted line) and with filter stuck to the matrix (continuous line)

Kamery światła widzialnego pozwalają na obserwację sceny w odcieniach szarości lub w kolorze.

Obrazy kolorowe powstają w wyniku stosowania siatki filtrów barwnych (zgodne z wzorem np. Bayera) umieszczonych nad warstwą fotoelementów matrycy monochromatycznej. W takim przypadku każdy fotoelement pokryty jest innym filtrem: czerwonym, zielonym lub niebieskim i rejestruje informacje tylko o jednej składowej barwnej (R, G lub B). W celu otrzymania rzeczywistej barwy piksela informacja o udziale składowych chromatywnych RGB na sąsiednich fotoelementach jest interpolowana.

Z punktu widzenia, m.in. możliwości dalszej analizy obrazu zaleca się, aby proces spawania obserwowany był z zastosowaniem kamery monochromatycznej. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe obrazy łuku spawalniczego w odcieniach szarości zarejestrowane kamerą monochromatyczną i kamerą kolorową.



Rys. 3. Przykładowe obrazy łuku spawalniczego zarejestrowane kamerą CCD monochromatyczną i kolorową  
Fig. 3. Exemplary images of welding arc acquired with use of mono and colour CCD cameras

W przypadku kamery kolorowej dostrzegalne są artefakty będące efektem filtrowania obrazu przez siatkę filtrów barwnych naklejonych na detektor.

Na wybór kamery światła widzialnego do obserwacji procesu spawania duży wpływ mają warunki oświetleniowe sceny.

Podczas spawania oświetlenie sceny obrazującej złącze jest wypadkową oświetlenia zewnętrznego niezmiennego w czasie oraz oświetlenia zmieniającego się dynamicznie wynikającego z jarzenia się łuku elektrycznego. Oświetlenie zewnętrzne należy rozpatrywać w kontekście warunków oświetleniowych zastanych na stanowisku spawalniczym lub warunków wynikających z zastosowania dodatkowych specjalizowanych źródeł światła (por. rozdz. 3.5.). Biorąc pod uwagę złożony stan oświetlenia sceny podczas spawania dobór kamery najlepiej poprzedzić pomiarami natężenia światła z zastosowaniem światłomierza. Pozwoli to nie tylko dobrać dynamikę i czułość kamery, ale także umożliwi dobór dodatkowego oświetlenia.

Pomiary oświetlenia prowadzone przez autorów podczas procesu spawania metodą MIG/MAG wskazują, że średnie natężenie oświetlenia emitowane przez łuk wynosi ok. 5500 luksów. Średnie natężenie światła odbitego od powierzchni spawanego elementu wynosi około 600 luksów. Pomiary przeprowadzono luksomierzem z odległości ok. 1m. W trakcie pomiarów nie stosowano dodatkowego oświetlenia. Natężenie oświetlenia w pomieszczeniu wynosiło około 20 luksów.

W przypadku obserwacji obszaru łuku elektrycznego, gdzie mamy do czynienia z dużym natężeniem promieniowania świetlnego zmiennego w czasie, wskazane jest dobranie takiej kamery, która pozwoli uzyskać obraz o wysokiej jakości, charakteryzujący się dużym zróżnicowaniem odcieni szarości. Efekt taki można uzyskać stosując kamerę o dużym zakresie dynamicznym.

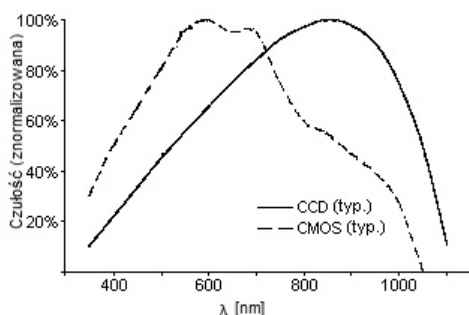
Zakres dynamiczny jest parametrem zależnym od zastosowanego przetwornika analogowo cyfrowego kamery i często podawany jest przy konkretnej wartości wzmocnienia kamery.

Urządzenia średniej klasy z matrycami CCD i CMOS posiadają przetworniki 12, 14 i 16 bitowe, co zapewnia poziom dynamiki między 60 dB a ponad 78 dB [30, 31, 32].

Należy zaznaczyć, że ze względu na szeroką ofertę kamer i dużą różnorodność w opisie ich parametrów, dobór kamery a szczególnie porównywanie kamer między sobą może się okazać trudne. Najlepszym sposobem prowadzącym do zidentyfikowania parametrów kamery jest analiza specyfikacji technicznej detektora oraz posługiwanie się parametrami scharakteryzowanymi wg normy EMVA 1288 [33], która definiuje warunki pomiarów parametrów technicznych kamer.

Współcześnie w monitorowaniu procesu spawania stosowane są zarówno kamery z przetwornikami CCD jak i urządzenia z matrycami CMOS. Różne publikacje wskazują, że do obserwacji spawania metodą MIG/MAG częściej stosowane są kamery CCD, co może wynikać m.in. z ich ceny i możliwości uzyskania jednorodnego odwzorowania obszarów o podobnej jasności, co ma związek z zastosowaniem jednego elektronicznego układu przetwarzającego dla matrycy. Dodatkowym powodem zastosowania przetworników CCD jest ich większa światłoczułość w stosunku do CMOS [28].

Na rys. 4 przedstawiono porównanie charakterystyki czułości kamer z matrycą CMOS i CCD o tych samych rozdzielczościach [34, 35].



Rys. 4. Porównanie charakterystyk kamer CCD i CMOS [34]  
Fig. 4. Comparison of CCD and CMOS camera characteristics [34]

Jak pokazują badania przeprowadzone m.in. przez [36], kamery z przetwornikami CCD pozwalające obserwować bliską podczerwień skutecznie zostały zastosowane do pomiarów temperatury jeziora i kropli materiału dodatkowego.

Kamery z detektorami CMOS, poza wcześniej wymienionymi zastosowaniami w ultraszybkiej fotografii, znalazły zastosowanie przy obserwacji spawania laserowego [37] oraz ocenie geometrycznej poprawności złączy spawanych z zastosowaniem linii laserowej. W tych przypadkach, dzięki możliwości obserwacji sceny za pomocą niezależnych detektorów tworzących matrycę CMOS, możliwe jest poprawne obrazowanie połączenia oraz bardzo jasnej linii laserowej [38].

W specyficznych zastosowaniach, do wizyjnego monitoringu procesu spawania mogą być zastosowane kamery z detektorami liniowymi. Standardowe kamery liniowe monochromatyczne posiadają jedną linię, aczkolwiek istnieją również urządzenia z matrycami składającymi się z dwóch, trzech lub więcej linii. W kamerach wieloliniowych obraz jest wynikiem uśredniania wartości jasności pikseli w liniach. Kamery liniowe charakteryzują się czułościami w zakresie od 30 do 408 DN/(nJ/cm<sup>2</sup>). Przy stosowaniu kamer liniowych zaleca się stosowanie dodatkowych oświetlaczy celem odpowiedniego doświetlenia sceny [35].

### 3.2. Dobór urządzeń obrazowania procesu spawania w zakresie podczerwieni

W przypadku obserwacji procesu spawania w zakresie podczerwieni, na wybór urządzenia mają wpływ takie parametry jak: rodzaj, rozdzielczość i zakres widmowy detektora, zakres temperaturowy, rozdzielczość temperaturowa, prędkość rejestracji obrazów, możliwość stosowania wymiennych obiektywów o dużych ogniskowych. Przy doborze kamery należy uwzględnić fakt, że większość promieniowania emitowanego w obszarze łuku spawalniczego ma długość fali między 0,34μm a 1,8μm, podczas gdy promieniowanie podczerwone spoiny ma długość większą od 2μm. Jeśli przedmiotem zainteresowania jest pomiar temperatury jeziora spawalniczego, gazów wydzielanych podczas spawania, krolek materiału dodatkowego, lub spoiny, celowe jest zastosowanie kamer pomiarowych krótkofalowych (0,8-2,5μm) i średniofalaowych (2,5-5,1μm), które mogą być wyposażone w chłodzone detektory CMT lub MCT wykonane z tellurku kadmowo rtęciowego (HgCdTe), detektory ze „studniami kwantowymi” (QWIP) wykonane z arsenku galowo-indowego (InGaAs) lub detektory wykonane z antymonku indu (InSb) [39]. Detektory MCT znajdują również zastosowanie w kamerach długofalowych pracujących w zakresie 8-12μm. Aktualnie najbardziej rozpowszechnione są kamery z niechłodzonymi detektorami mikrobolometrycznymi działającymi w zakresie fal podczerwieni o długościach od 7,5 do 14μm [40]. W ostatnich latach nastąpił rozkwit produkcji i sprzedaży kamer z tego typu detektorami, co w znaczący sposób wpłynęło na obniżenie ich cen.

Kamery z detektorami matrycowymi mają najczęściej rozdzielczości 320 x 240 pikseli, 640 x 480 pikseli i większe. Podobnie jak w przypadku kamer światła widzialnego większa rozdzielczość determinuje wyższą cenę urządzenia. Dla potrzeb obserwacji rozkładu temperatury spoiny można zastosować również urządzenia skanujące posiadające detektory liniowe. Pomimo niskich rozdzielczości matryc kamer termowizyjnych, w porównaniu z kamerami wizyjnymi, odpowiedni dobór optyki i pola widzenia kamery pozwala na pozyskanie obrazów o dużej zawartości informacyjnej.

Wybór kamery z detektorem pracującym w konkretnym zakresie pasma podczerwieni determinuje pozostałe parametry urządzenia, takie jak rozdzielczość temperaturowa (NETD- *Noise Equivalent Temperature Difference*), zakres temperatury i prędkość akwizycji obrazów. W przypadku tańszych kamer z detektorami mikrobolometrycznymi rozdzielczość temperaturowa w zależności do kamery mieści się w zakresie od 40 do 100mK. W przypadku kamer krótko i średniofalaowych z detektorami chłodzonymi rozdziel-

czość jest zdecydowanie lepsza i w zależności od detektora wynosi od 20mK (MCT) do 25mK (InSb, QWIP).

Pozostałe parametry techniczne jak np. zakres temperatur i prędkość akwizycji przyjmują wartości najwyższe w przypadku drogich kamer chłodzonych, a najniższe dla tanich kamer niechłodzonych. Typowy wzorcowany zakres pomiarowy dla kamer niechłodzonych w zależności od modelu mieści się w przedziale 300 - 1500°C, przy czym opcjonalne wartości oferowane przez producentów nie przekraczają 2000°C. Kamery chłodzone mogą mierzyć temperatury do 3000°C (wartość wzorcowana), przy czym podobnie jak w przypadku tanich kamer niechłodzonych zakres ten stanowi dodatkową płatną opcję. Należy zaznaczyć, że zastosowanie podczas spawania odpowiednich filtrów tłumiących promieniowanie podczerwone pozwala na obserwację procesów cieplnych kamerami o małym zakresie pomiarowym.

Prędkości akwizycji pełnej ramki obrazowej dla kamer z detektorami mikrobolometrycznymi ze względu na uwarunkowania fizyczne, nie przekraczają 50 ramek/s. Kamery z detektorami chłodzonymi pozwalają na obserwację zjawisk cieplnych z prędkościami przekraczającymi 350 ramek/s przy pełnej rozdzielczości. Dla ograniczonego obszaru obrazowania prędkości akwizycji wzrastają i tak np. dla kamery FLIR SC7900-VL przy obszarze 64 x 3 pikseli prędkość akwizycji wynosi 30 900 ramek/s [41].

Precyzyjny pomiar temperatury z zastosowaniem kamer termowizyjnych jest zagadnieniem trudnym, dlatego do monitorowania i kontroli procesu spawania stosuje się obserwację względnych zmian rozkładu temperatury na obrazach termograficznych zarejestrowanych w dwóch różnych chwilach czasu  $t_i$  i  $t_{i-1}$ .

Aktualnie na rynku dostępny jest bardzo szeroki wybór urządzeń wykonywanych w postaci kamer pomiarowych i obserwacyjnych do zastosowań przemysłowych i laboratoryjnych [41, 42, 43]. Znajdują one zastosowanie w obserwacji rozkładu i pomiarze temperatury złączy spawanych i strefy wpływu ciepła, a także w ocenie zmian w obszarze łuku i jeziorka spawalniczego, jak również ocenie geometrycznej złączy spawanych [3, 10, 27, 44]. Pomimo ciągle rosnącej popularności termowizji w ocenie procesu spawania wysokie koszty szczególnie urządzeń krótko i średniofalowych nadal stanowią barierę dla ich powszechnego zastosowania w warunkach przemysłowych. Jak już wspomniano, tanią alternatywą pozwalającą na pomiary temperatury w zakresie bliskiej podczerwieni jest stosowanie odpowiednio skalibrowanych i wyposażonych w odpowiednie filtry, kamer z matrycami CCD.

### 3.3. Dobór układów optycznych i ich ochrona

Układy optyczne kamer wizyjnych i termowizyjnych mają na celu jak najwierniejsze odwzorowanie obszaru obserwowanej sceny w postaci obrazu powstającego na powierzchni detektora kamery.

Różnice w budowie obiektywów kamer wizyjnych i termowizyjnych wynikają z zakresu obserwowanego widma elektromagnetycznego. W przypadku kamer termowizyjnych układy optyczne wykonane są z materiałów przepuszczających promieniowanie podczerwone takich jak german, krzem, szafir, Irtran2. Szkło, z którego wykonywane są soczewki obiektywów kamer wizyjnych tłumi promieniowanie podczerwone o długości fali większej niż ok. 1,1 – 1,7  $\mu\text{m}$ .

Przy doborze układu optyki kamer wizyjnych i termowizyjnych stosowane są powszechnie znane założenia wynikające z podstaw optyki dla układów rektaliniarnych (rys. 5). Zależności wiążące parametry układu optycznego mogą być wyrażone przez kąt widzenia (2) lub (3) bądź zamiennie przez pole widzenia (FOV) (4). Oba parametry zwykle podawane są w stopniach i rozpatruje się je dla kierunku poziomego i pionowego.

$$\alpha_i = 2 \arctan \frac{k}{2f} \quad [^\circ] \quad (2)$$

lub

$$\alpha_i = 2 \arctan \frac{K}{2l} \quad [^\circ] \quad (3)$$

gdzie:

$i=\{h,v\}$  – indeks kąta widzenia w kierunku poziomym i pionowym

$k=\{h,v\}$  – oznaczenie wymiaru detektora odpowiednio poziomego i pionowego [mm]

$K=\{H,V\}$  – oznaczenie odpowiednio poziomego i pionowego rozmiaru pola widzenia kamery [mm]

$f$  – ogniskowa obiektywu [mm]

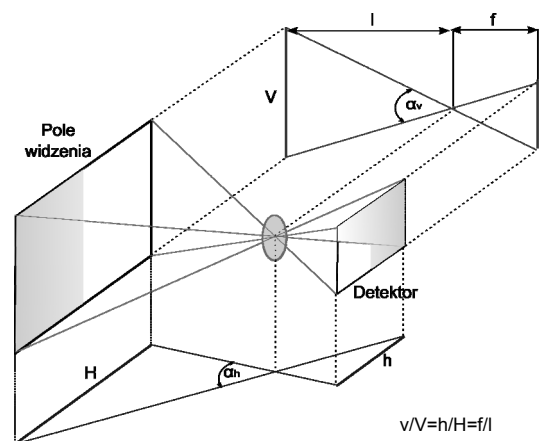
$l$  – odległość obiektu do płaszczyzny obiektywu, przy której obserwowany obiekt jest ostry [mm]

$$FOV_i = \alpha_i \frac{D_i}{d_i} \quad [^\circ] \quad (4)$$

gdzie:

$D$  – rozmiar pełnego obrazu

$d$  – rozmiar obiektu na obrazie



Rys. 5. Zależności geometryczne w układach optycznych  
Fig. 5. Geometrical relationships in optical systems

Pole widzenia określa przestrzenną (geometryczną) zdolność rozdzielczą układu obrazowania i zwykle jest podawane dla konkretnej wartości odległości kamery od obserwowanego obiektu. Im optyka charakteryzuje się mniejszym kątem widzenia a zatem większą ogniskową, a matryca posiada większą rozdzielczość, tym można obserwować mniejsze szczegóły obiektów.

Przy doborze parametrów optyki kamery należy zwrócić także uwagę, na fakt, że przy stosowaniu obiektywów o większych ogniskowych, obserwowane elementy sceny umieszczone za pierwszoplanowym obiektem ulegają zmniejszeniu.

Wybór obiektywu kamery polega na określeniu wymaganej ogniskowej lub wymaganego pola widzenia i doborze obiektywu o parametrach najbliższych zdefiniowanemu potrzebom. Odpowiednie parametry geometryczne można wyliczyć porównując ze sobą wzory (2) i (3) lub posługując się zależnościami geometrycznymi z rysunku 5.

Wybór obiektywów kamer termowizyjnych ograniczony jest zwykle tylko do asortymentu obiektów oferowanych przez producenta kamery. Zwykle parametry oferowanych obiektów są wystarczające, aby realizować nawet bardzo wyszukane zadania obserwacyjno-pomiarowe. Należy dodać, że zakup dodatkowego obiektywu dla kamery termowizyjnej wymaga przeprowadzenia procesu rekalkibracji kamery, co podwyższa koszty zakupu i tak bardzo drogiej optyki. Obiektywy kamer termowizyjnych różnych producentów posiadają odmienne standardy mocowania ograniczające możliwość zamiennego ich stosowania. W większości kamer niechłodzonych obiektyw jest mocowany na bagnet, innym sposobem mocowania jest kołnierz lub gwint [45].

Problem zmienności obiektywów jest mniej dotkliwy w przypadku kamer działających w świetle widzialnym. Dzięki istniejącym standardom mocowania (np. S/C/F mount) oraz adapterom, możliwe jest posługiwanie się szerokim asortymentem obiektywów o różnych parametrach technicznych i jakościowych.

Różnorodność układów optycznych kamer światła widzialnego powoduje, że przy wyborze obiektywu należy uwzględnić szereg parametrów technicznych m.in.: ogniskowa, format obsługiwane go sensora, wielkość pola obrazowego, apertura, minimalna odległość ostrego widzenia MOD (*Minimal Object Distance*) i sposób mocowania. Parametry te podawane są przez producentów obiektywów. Wytwórcy kamer i optyki ułatwiają użytkownikowi wybór obiektywu podając w swoich katalogach zestawy obiektywów kompatybilnych z określonymi kamerami. Obiektyw kamery światła widzialnego powinien być dobrany tak, by format obiektywu był większy bądź równy formatowi sensora kamery. Nieprawidłowy dobór obiektywu może skutkować uzyskaniem obrazu nieostrego lub zniekształconego (np. aberracja).

Przy doborze obiektywu kamery światła widzialnego należy zwrócić uwagę również na jego jasność tzw. liczbę aperturową (zwykle oznaczaną literą F). Jest to wskaźnik teoretycznej zdolności przepuszczania światła obiektywu. Dostępne jasności obiektywów to: 1; 1,4; 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22; 32; 45; 64 itd. W katalogach najczęściej podawane są dwie wartości liczby F, pierwsza z nich określa maksymalne otwarcie przysłony, a druga minimalne.

#### Filtry i osłony

Występująca w trakcie spawania duża dynamika zmian emisji promieniowania elektromagnetycznego wymaga zastosowania odpowiednich osłon oraz filtrów. Ich podstawowym zadaniem jest ochrona urządzenia i układu optycznego przed możliwym rozpryskiem metalu i zanieczyszczeniami oraz kształtowanie mocy i zakresu pasma promieniowania szczególnie podczas bezpośredniej obserwacji łuku spawalniczego. W przypadku kamer wizyjnych dostępna jest szeroka gama filtrów [46, 47] nakręcanych lub nasadzanych na obiektywy, umożliwiających dowolne kształtowanie i/lub tłumienie pasma promieniowania docierającego do detektora. Możliwe jest również zastosowanie samodzielnie wykonanych osłon z wykorzystaniem szkieł ochronnych stosowanych w spawalnictwie. Filtry spawalnicze charakteryzują się różnymi współczynnikami przepuszczania światła w odpowiednim paśmie promieniowania, co opisano szczegółowo w normie [48]. Współczynnik przepuszczania światła podawany jest w procentach. Filtry oznaczone są kolejno numerami od 1 do 16, gdzie najniższy numer oznacza najsłabszy filtr, dla którego maksymalny średni widmowy współczynnik przepuszczania w podczerwieni (od 780 do 1400nm) wynosi 69%, w nadfiolecie (dł. promieniowania od 313 do 365nm) wynosi 50%, najmocniejszy filtr oznaczony jest numerem 16, dla którego współczynnik przepuszczania światła wynosi odpowiednio dla podczerwieni: 0,003% i nadfioletu – 0,000023%.

W przypadku kamer termowizyjnych filtry głównie mają za zadanie chronić optykę, przepuszczać promieniowanie w sposób selektywny lub tłumić promieniowanie uniemożliwiając przekroczenie zakresu pomiarowego kamery.

Jako filtry ochronne kamer termowizyjnych, mogą być stosowane okna germanowe, jednakże są one bardzo drogie. Alternatywnym rozwiązaniem, stosowanym przez autorów, jest wykorzystanie filtru wykonanego z płyty polietylenowej o grubości 1mm. Polietylen jest materiałem przepuszczającym promieniowanie podczerwone w zakresie pracy detektorów mikrobolometrycznych. Stopień tłumienia można określić doświadczalnie i tak dobrać parametry metrologiczne kamery, aby zakres mierzonych temperatur odpowiadał temperaturze rzeczywistej.

#### 3.4. Dobór dodatkowych źródeł światła

Proces spawania charakteryzuje się zmiennymi w czasie warunkami oświetleniowymi o bardzo dużej dynamice zmian jasno-

ści. Wpływa to niekorzystnie, na jakość rejestrowanych obrazów, które w zależności od obserwowanej sceny i momentu rejestracji, mogą być niedoświetlone lub prześwietlone. Aby zmniejszyć dynamikę zmian jasności oświetlenia możliwe jest stosowanie dodatkowych źródeł światła.

Rynek oferuje szeroki asortyment różnorodnych oświetlaczy charakteryzujących się różnymi rozmiarami, mocą i barwą emitowanego światła (najczęściej jest to światło białe, niebieskie, czerwone lub zielone) oraz rozwiązaniami technologicznymi. Dostępne są również oświetlacze emitujące promieniowanie o długościach wykraczających poza obszar pasma promieniowania widzialnego np. oświetlacze IR i UV.

Dobór odpowiedniego oświetlenia wiąże się z zastosowaniem oświetlaczy światła białego, rozproszonego o dużej mocy i intensywności emitowanego światła. Należy zwrócić szczególną uwagę na możliwość pojawienia się refleksów świetlnych.

Interesującym sposobem oświetlenia sceny może być zastosowanie źródeł laserowych [49], synchronizowanych z kamerą. Tego typu rozwiązania znajdują zastosowanie w fotografii ultraszybkiej. Kolejnym przydatnym źródłem oświetlenia dodatkowego może być linia laserowa, która przy odpowiedniej konfiguracji geometrycznej kamera – oświetlacz - obiekt, pozwala na pozyskanie informacji o trzecim wymiarze np. wysokości i kształcie lica wykonywanej spoiny.

W zależności od specyfiki badań, przy prawidłowo dobranych urządzeniach obrazowania można zrezygnować ze stosowania dodatkowego oświetlenia.

#### 3.5. Dobór parametrów serwera systemu monitorowania

Przeznaczenie systemu wizyjnego determinuje nie tylko wybór kamer, czy oświetlaczy, ale również konfigurację serwera, którym najczęściej jest komputer PC. Serwer systemu może realizować oddzielnie lub łącznie dwie podstawowe funkcje:

- rejestrację obrazów lub sekwencji obrazów,
  - przetwarzanie, analizę i rozpoznawanie obrazów.
- Podział ten wynika z wpływu poszczególnych elementów zestawu komputerowego na czas realizacji poszczególnych zadań. W przypadku rejestracji obrazów kluczową rolę odgrywają:
- frame grabber i interfejs wideo,
  - interfejsy magistrali dostępne na płycie głównej,
  - szybkość magistrali,
  - pamięć operacyjna,
  - pamięć masowa.
- Kiedy mamy do czynienia z aplikacjami dotyczącymi przetwarzania, analizy i rozpoznawania obrazów, dodatkową uwagę należy zwrócić na:
- szybkość magistrali,
  - wielkość pamięci operacyjnej,
  - procesor – CPU,
  - kartę graficzną i jej procesor – GPU.

Do popularnych interfejsów sieciowych wykorzystywanych do przesyłania danych między kamerami, a jednostką centralną należą: USB, IEEE 1394 (FireWire), GigaEthernet (GigE Vision).

Dodatkowo występują interfejsy specjalnie opracowane na potrzeby komunikacji kamera-komputer: Camera Link, CoaXPres.

Maksymalna przepustowość tych interfejsów waha się od 0,4 do blisko 7 Gb/s.

Obsługa wielu kamer FireWire wymaga kontrolera o odpowiedniej przepustowości. Zastosowanie kontrolerów opartych o magistralę PCI staje się niewystarczające ze względu na maksymalną przepustowość magistrali wynoszącą 1Gb/s (dotyczy wszystkich urządzeń podłączonych do magistrali).. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie kontrolerów wykorzystujących magistralę PCIe x1 w przypadku której, każdy kontroler wykorzystuje pełne pasmo (250 MB/s), bez konieczności jego podziału pomiędzy wszystkie urządzenia magistrali [50].

Pamięć masowa serwera pozwala archiwizować pozyskiwane obrazy. Można stosować pamięci HDD (*Hard Disk Drive*) (klasyczne dyski twarde) i SSD (*Solid State Drive*). Wybór rodzaju pamięci uzależniony jest głównie od warunków pracy serwera i jego przeznaczenia. Aktualnie napędy HDD oferują w porównaniu z napędami SSD dużo większą pojemność (kilka TB dla HDD, poniżej 500 GB dla SSD). Pomimo mniejszej pojemności dyski SSD, dzięki technologii wykonania w postaci pamięci elektronicznych charakteryzują się większą odpornością na wstrząsy, wpływ wysokich temperatur i uszkodzenia mechaniczne. Jeśli jako parametr decydujący brana jest pod uwagę prędkość zapisu, zdecydowanie lepsze okazują się dyski SSD. Średnia prędkość zapisu na dysk SSD może dochodzić do 250 MB/s, przy ok. 120-130 MB/s dla dysków HDD. Czas dostępu jest również dużo krótszy dla dysków SSD i kształtuje się na poziomie ~0,13ms (odczyt), ~0,15 ms (zapis), podczas gdy dla wysokiej klasy dysków HDD wynosi odpowiednio ~8ms i ~3,3 ms. Pomimo wysokiej szybkości, pewnym ograniczeniem w stosowaniu pamięci SSD może być ograniczona trwałość wynikająca z liczby operacji zapisu i odczytu danych.

Problem ograniczenia szybkości zapisu dysków HDD można rozwiązać łącząc dyski w macierze RAID (*Redundant Array of Independent Disks*) [51]. Tego typu podejście dodatkowo może zwiększyć bezpieczeństwo magazynowanych danych. Największy wzrost wydajności uzyskiwany jest w przypadku zastosowania macierzy typu RAID0. W tym przypadku, przy N dyskach składających się na macierz, szybkość zapisu jest równa iloczynowi, liczby napędów N i szybkości zapisu najwolniejszego napędu.

Autorzy przeprowadzili testy m.in. dla systemu wizyjnego składającego się z trzech kamer CDD o rozdzielczościach nie przekraczających 640 x 480 pikseli, podłączonych do 3 niezależnych kontrolerów FireWire. Testy wykazały, że w takim przypadku wystarczającym rozwiązaniem jest zastosowanie dwóch dysków fizycznych pełniących różne funkcje. Na jednym z dysków zainstalowano system operacyjny oraz niezbędne oprogramowanie, drugi przeznaczono do magazynowania pobranych obrazów. Zastosowano dysk o średniej prędkości zapisu ok. 130 MB/s, co przy zainstalowanej pamięci RAM na poziomie 6 GB, pełniące funkcję bufora niwelującego wahania w szybkości zapisu, zapewniło płynne działanie całego systemu.

W przypadku obserwacji procesu spawania należy również zwrócić uwagę na to czy środowisko, w którym działa serwer, nie stanowi zagrożenia dla jego długotrwałej i stabilnej pracy. W trudnych warunkach działania, zasadne wydaje się zastosowanie przemysłowej obudowy serwera zapewniającej lepszą ochronę wewnętrznych podzespołów serwera przed wpływem niekorzystnych warunków środowiskowych (pył, zadymienie, wilgoć, wstrząsy, uderzenia itp.).

### 3.6. Oprogramowanie serwera systemu

Oprogramowanie serwerów systemów wizyjnych w dużej mierze zdeterminowane jest przez wymagania użytkownika. Wiele popularnych zastosowań aplikacji systemów wizyjnych, np. do kontroli geometrii obiektów lub odczytywania kodów może zostać zrealizowana przy użyciu jednej z dostępnych na rynku komercyjnych aplikacji, np. NI Vision Builder for Automated Inspection [52], ESP® Easy Setup Program Software [53], iNspec Vision System [32], Matrox Imaging Library [54]. Niekiedy jednak specyfika realizowanego zadania wymaga opracowania dedykowanej aplikacji. Bardzo duże możliwości szybkiego tworzenia i wdrażania oprogramowania systemów wizyjnych dają aplikacje bazujące na wizualnych językach programowania (*Visual Programming Language, VPL*). Przykładem może być język G stosowany w oprogramowaniu LabView, które autorzy stosowali w trakcie własnych prac. Aplikacja opracowana przez autorów pozwala na akwizycję, przetwarzanie i analizę obrazów podczas procesu spawania [18]. Do zapisu obrazów z kamery termowizyjnej zastosowano bibliotekę udostępnioną przez producenta kamery. Bezpośrednie odwołania do odpowiednich funkcji biblioteki pozwoliły

na bezstratny zapis wymaganej liczby termogramów na dysk twardy. Zapis obrazów pochodzących z kamer wizyjnych, ze względu na ich rozmiar, realizowano bezpośrednio poprzez funkcje biblioteki. WinAPI. Obrazy te zapisywano do jednego pliku binarnego, co zmniejszyło liczbę koniecznych do wykonania operacji dyskowych polegających na otwieraniu i zamykaniu plików.

## 4. Podsumowanie

Artykuł przedstawia spostrzeżenia autorów, dotyczące wizyjnej i termowizyjnej obserwacji procesu spawania, wynikające z własnych doświadczeń nabytych przy projektowaniu i aplikacji systemu wizyjnego.

Jak pokazuje analiza procesu spawania przeprowadzona w rozdziale 1, dobór elementów systemu do wizyjnej i termowizyjnej obserwacji procesu spawania powinien uwzględniać zjawiska mające wpływ na wybór obszaru obrazowania, zakres widmowy oraz szybkość rejestracji. Dobór urządzeń jest również ściśle uwarunkowany celem badań oraz dostępnymi środkami finansowymi. Można zauważyć, że najtrudniejszym zadaniem jest dobór odpowiedniego urządzenia obrazowania i systemu oświetlenia. Główne czynniki mające wpływ na dobór odpowiedniej kamery to trudność w identyfikacji odpowiedniego urządzenia i stwierdzenia jego przydatności w konkretnym zastosowaniu, jedynie na podstawie jego parametrów technicznych. W przypadku kamer termowizyjnych system opisu ich parametrów jest spójny a główne ograniczenia w doborze odpowiedniego urządzenia to jego cena. Należy również zwrócić uwagę na ograniczoną liczbę akcesoriów dodatkowych dla kamer termowizyjnych. Mowa tutaj głównie o obiektywach, filtrach, osłonach i obudowach ochronnych, które zwykle dostarczane są na zamówienie a ich cena często bywa wysoka. W przypadku kamer wizyjnych, problem z odpowiednim doбором urządzenia związany jest głównie z niespójnym określeniem parametrów technicznych urządzeń przez producentów. Prowadzi to do trudności w porównywaniu urządzeń między sobą. Pomimo powyższych problemów, producenci i dostawcy w pewien sposób ułatwiają podjęcie decyzji klasyfikując swoje wyroby pod kątem ich zastosowania.

Z przedstawionych w artykule rozważań wynika, że obserwacja procesu spawania do celów identyfikacji i opisu zjawisk fizycznych powinna być realizowana szybkimi kamerami CMOS przy odpowiednio dobranym i zsynchronizowanym oświetleniu. Dla potrzeb monitorowania procesu spawania poprzez obserwację łuku, można zastosować kamery CMOS lub CCD o dużej dynamice. Do obserwacji spoiny i identyfikacji niezgodności spawalniczych najkorzystniejsze jest stosowanie kamer CMOS oraz linii laserowej pozwalającej identyfikować profil łożyska złącza spawanego.

W przypadku kamer termowizyjnych, do obserwacji i pomiaru temperatury spoiny i strefy wpływu ciepła wystarczające są kamery z niechłodzonym detektorem bolometrycznym. Obserwację łuku, kropli ciekłego metalu i jeziora spawalniczego najlepiej prowadzić chłodzonymi kamerami krótkofalowymi.

Dobierając urządzenia obserwacyjne, koniecznie należy zwrócić uwagę na dostępność i liczbę dodatkowych akcesoriów, które mogą być stosowane z kamerą. Uwaga ta dotyczy szczególnie filtrów ochronnych i kształtujących widmo oraz obiektywów.

Biorąc pod uwagę sposób komunikacji kamery z serwerem systemu, najbardziej uniwersalnym rozwiązaniem jest zastosowanie interfejsu sieciowego Giga Ethernet. Przy doborze serwera, koniecznie należy uwzględnić stosowanie macierzy dyskowych RAID zwiększających wydajność zapisu danych.

Ważnym, z punktu widzenia integracji zasobów sprzętowych jest oprogramowanie dostarczane razem z kamerami. Należy zwrócić uwagę na to czy dostępne są dodatkowe biblioteki pozwalające na sterowanie kamerą i dostęp do danych rejestrowanych przez kamerę. Ważnym aspektem jest kompatybilność oprogramowania z 64 bitowymi systemami operacyjnymi pozwalającymi osiągać większą wydajność w trakcie przetwarzania i analizy obrazów.



Przedstawione w artykule uwagi dotyczące doboru elementów systemu wizyjnego do obserwacji spawania nie wyczerpują całego spektrum zagadnień, dotyczących tej tematyki.

Autorzy liczą, że artykuł ten dostarczy wskazówek i pomoże w projektowaniu systemu wizyjnego osobom rozpoczynającym działalność w tym obszarze.

## 5. Literatura

- [1] iShot® Weld-i Automated Weld Viewer System <http://www.remotevisionsource.com/> z dnia 2011.03.07.
- [2] Noruk J., Boillot J.P.: Laser Vision Technology Ensures Six Sigma-level Quality is Achieved in Robotic Welding. Canadian Welding Association Journal. Summer 2006.
- [3] Al-Karawi, J.; Schmidt, J.: Application of Infrared Thermography to the analysis of Welding processes. 7th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, Belgium, July 5-8, 2004, H.9.1-H.9.6.
- [4] Lucas W., Smith J., Balfour C., Bertaso D., Melton G.: Wizyjna kontrola rozmiaru jeziora spawalniczego w czasie rzeczywistym, Przegląd Spawalnictwa nr 1/2009 (81), pp. 11-16.
- [5] Kim J.S., Son Y.T., Cho H.S., Koh K.II.: A robust method for vision-based seam tracking in robotic arc welding, Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control 1995.
- [6] Smith J.S., Balfour C.: Real time top-face vision based control of weld pool size, An international journal Industrial robot, No 32/2/2005.
- [7] Balfour C., Smith J.S., Amin-Nejad S.: Feature correlation for weld image-processing applications, International Journal of Production Research 2004, vol 42, no 5, pp 975-995.
- [8] Cook, G.E.; Barnett, R.J.; Andersen, K.; Springfield, J.F.; Strauss, A.M.: Automated visual inspection and interpretation system for weld quality evaluation, Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE, vol.2, no., pp.1809-1816 vol.2, 8-12 Oct 1995.
- [9] Rong-Ho Lin, Fisher G.W.: An on-line arc welding quality monitor and process control system Industrial Automation and Control: Emerging Technologies, 1995., International IEEE/IAS Conference.
- [10] Govardhan S.M., Wikle H.C., Nagarajan C., Chin B.A.: Real-Time Welding Process Control Using Infrared Sensing, Proceedings of the American Control Conference, Seattle: 1995, pp. 1712-1716.
- [11] Yamamoto M., Kaneko Y., Fujii K., and others.: Adaptive Control of Pulsed MiG Welding Using Image Processing System, IEEE, 1988.
- [12] Lanzetta M., Santochi M., Tantussi G.: On-line control of robotized Gas Metal Arc Welding. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 50, Issue 1, 2001, Pages 13-16.
- [13] Węglowski M.S.: Investigation on the arc light spectrum in GTA welding, Manufacturing Engineering, vol. 20, 2007, pp. 519-522.
- [14] Pilarczyk A.: Wizualna rejestracja łuku spawalniczego z równoczesną rejestracją parametrów prądowo-napięciowych procesu spawania MIG/MAG. XVI Naukowo –Techniczna Krajowa Konferencja Spawalnicza „postęp, innowacje i wymagania jakościowe procesów spawania” Międzyzdroje 25-27.05.2010.
- [15] Czajewski W.: Automacyjne rozpoznawanie i śledzenie spawów przez robotą przemysłowego z wykorzystaniem analizy obrazów PAK 7-8/2002.
- [16] Nowacki J., Wypych A.: Ocena cyklu cieplnego napawania stali 13CrMo4-5 nadstopem inconel 625 metodą termowizyjną. Przegląd Spawalnictwa 12/2007, s. 3-7.
- [17] Fidali M., Bzymek A., Timofiejczuk A., Czupryński A., Jamrozik W.: Ocena stanu procesu spawania na podstawie analizy obrazów wizyjnych i termowizyjnych. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 2/2009.
- [18] Bzymek A., Fidali M., Jamrozik W., Timofiejczuk A.: Diagnostic vision system for welded joint and welding process assessment Problemy Eksploatacji 4/2008.
- [19] Bzymek, A, Timofiejczuk A.: Estimation of welding process stability based on image analysis and recognition. Diagnostyka 4(52)/2009, s. 41-44.
- [20] Klimpel A.: Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali. Technologie, Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, Warszawa 1999.
- [21] Manabu T., Kenji W., Shinichi T., Kazuhiro N., Eri Y., Kei Y., Keiichi S.: Visualizations of 2D Temperature Distribution of Molten Metal in Arc Welding Process, Transactions of JWRI, vol. 38, 2009, pp. 1-4.
- [22] Sliwinski A. M., Gajewski O. A., Korszenko E. A., Zworykij K. O.: Parametry rasprjedjeljenija znaczenij diamjetra kappel eljektrodnowo mjetaHa, Fiziko – chemiczni procjesi, zwarzjuwalni matjeriali, Kijow, 1996 s. 145-148.
- [23] Kim Y. S., Eagar T. W.: Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding, Welding Journal, June, 1993, s. 279-288.
- [24] Subramaniam S., White D. R.: Effect of Shield Gas Com-position on Surface Tension of Steel Droplets in a Gas-Metal-Arc Welding Arc, Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 32B, April, 2001, s. 313-318.
- [25] Luksa K., Węglowski M.: Badania widma promieniowania świetlnego łuku spawalniczego metody GTA. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2004, nr 2, s. 51-55.
- [26] Marzec S., Janosik E.: Wpływ promieniowania łuku spawalniczego na organizm spawacza. Biuletyn Spawalnictwa, 1995, nr 6, s. 33-37.
- [27] Huang R., Liu L., and Song G.: Infrared temperature measurement and interference analysis of magnesium alloys in hybrid laser-TIG welding process. Materials Science and Engineering: A, vol. 447, Feb. 2007, pp. 239-243.
- [28] Litwiller D.: CCD vs. CMOS: Facts and Fiction, Photonics Spectra, January 2001.
- [29] <http://www.visionresearch.com/Products/High-Speed-Cameras/v710/>
- [30] <http://www.theimagingsource.com> z dnia 11.04.2011
- [31] <http://www.photonfocus.com> z dnia 11.04.2011
- [32] <http://www.dalsa.com> z dnia 11.04.2011
- [33] EMVA Standard 1288 Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras Release 3.0 November 29, 2010 Issued by European Machine Vision Association [www.emva.org](http://www.emva.org)
- [34] <http://www.fen-net.de/walter.preiss/e/slomoinf.html>
- [35] The Imaging & Visioan Hadnbook, SIS Stemmer Imaging Services, Germany 2010.
- [36] Renier E., Suzeau P., Truchetet F., Geveaux P.: Spatial and thermal measurements using Thermography CCD during HF Soldering of metallic tubes, Industrial Electronics Society, 1998. IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, 1998, pp. 1699-1702.
- [37] Beersiek J.: New Aspects of Monitoring with a CMOS camera for Laser Materials Processing. Published at ICALEO'02
- [38] Wilson A.: CMOS camera checks automotive laser welds, Vision System Design, Issue June 2004, Automotive Inspection, pp 35 – 39.
- [39] Madura H.: Pomiary termowizyjne w praktyce. Praca zbiorowa. Agencja wydawnicza PAK, Warszawa 2004.
- [40] Characteristics and use of infrared detectors. Technical Information. Hamamatsu.
- [41] <http://www.flir.com> z dnia 05.04.2011
- [42] <http://www.infratec.de> z dnia 05.04.2011
- [43] <http://www.irPOD.net> z dnia 11.04.2011
- [44] Camilleri D., Gray T., and Comleki T.: Use of Thermography to Calibrate Fusion Welding Procedures in Virtual Fabrication Applications, Proceedings of Inframation 2004.
- [45] [http://www.militaryinfrared.com/SFOV\\_Lens\\_Systems.html](http://www.militaryinfrared.com/SFOV_Lens_Systems.html) z dnia 11.04.2011
- [46] <http://www.accuteoptical.com> z dnia 11.04.2011
- [47] <http://www.tiffen.com> z dnia 11.04.2011
- [48] PN-EN 169 „Ochrona indywidualna oczu. Filtry spawalnicze i filtry dla technik pokrewnych. Wymagania dotyczące współczynnika przepuszczania i zalecane stosowania”.
- [49] [http://www.cavitar.com/en/page.tmpl?sivu\\_id=10](http://www.cavitar.com/en/page.tmpl?sivu_id=10) z dnia 11.04.2011
- [50] <http://computer.howstuffworks.com/pci-express.htm> z dnia 11.04.2011
- [51] <http://compreviews.about.com/od/storage/1/aaRAIDPa-ge1.htm> z dnia 11.04.2011
- [52] <http://www.ni.com/vision/vbai.htm> z dnia 11.04.2011
- [53] <http://www.microscan.com/en-us/Products/Barcode-Software-and-Connectivity/ESP-Easy-Setup-Program-Software.aspx> z dnia 11.04.2011
- [54] <http://www.matrox.com> z dnia 11.04.2011
- [55] Bicknell A., Smith J.S., Lucas J.: Infrared sensor for top face monitoring of weld pools, Measurement Science and Technology, vol. 5(4), 1994, pp. 371-378.
- [56] Mathieu A., Mattei S., Deschamps A., Martin B., Grevey D.: Temperature control in laser brazing of a steel/aluminium assembly using thermographic measurements, NDT & E International, vol. 39, Jun. 2006, pp. 272-276.
- [57] <http://www.baslerweb.com> z dnia 11.04.2011